

Recebido: 12-02-2015 Aceito: 26-02-2016

Propriedades mecânicas de compósitos cimento-madeira com serragem tratada de *Pinus elliottii*

Mônica Regina Garcez^{1*}, Thiara Santos², Estela Oliari Garcez², Darci Gatto³

¹Departamento Interdisciplinar, Campus Litoral Norte, universidade Federal do Rio Grande do Sul, Km 92, RS 030, n. 11700, CEP 95590-000, Tramandaí - RS - Brasil

²Centro de Engenharias, Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pelotas, Rua Benjamin Constant, 989 - Sala 112A, CEP 96010-020 - Pelotas - RS - Brasil

³Centro de Engenharias, Curso de Engenharia Industrial Madeireira, Universidade Federal de Pelotas, Rua Conde de Porto Alegre, 793, CEP 96010-290 - Pelotas - RS - Brasil

RESUMO Este trabalho foi idealizado com o intuito de investigar a compatibilidade entre o cimento e a madeira através do estudo da influência de diferentes tratamentos prévios aplicados em serragem nas propriedades mecânicas de compósitos do tipo argamassa. Para tanto, 10% ou 20% da massa de areia foi parcialmente substituída pelo mesmo volume de serragem de *Pinus elliottii* submetida a dois diferentes tratamentos superficiais, banho de imersão e recobrimento com ortossilicato de tetraetil (TEOS). O limite de resistência e os módulos de elasticidade estático e dinâmico diminuíram quanto maior o percentual de serragem presente nos compósitos. O tratamento com TEOS resultou no maior percentual de redução do limite resistência e nos menores percentuais de redução dos módulos de elasticidade estático e dinâmico. As imagens obtidas por MEV permitiram a visualização da macro e meso porosidade presentes no compósito, geradas pelas partículas de madeira e pela matriz.

Palavras-chave: limite de resistência, módulo de elasticidade, banho de imersão, tratamento superficial, TEOS.

Mechanical properties of cement-wood composites with treated *Pinus elliottii* sawdust

ABSTRACT The aim of this research was to investigate the compatibility between cement and wood through the influence of different treatments applied in the sawdust on the mechanical properties of mortars, in which 10% or 20% of the sand in mass was partially replaced by the same volum of *Pinus elliottii* sawdust with boil treatment and surface treatment with tetraethyl orthosilicate (TEOS). Compressive strength and static and dynamic Young's modulus decreased with the increase of the percentage of sawdust present in the composites. Treatment with TEOS resulted the highest reduction in compressive strength and the smallest reductions in static and dynamic Young's modulus. MEV images allowed the identification of composites macro and meso porosity, generated by wood particles and matrix.

Keywords: compressive strength, Young's modulus, boil treatment, surface treatment, TEOS.

Introdução

As indústrias de base florestal, em geral, apresentam baixo rendimento, gerando grande quantidade de resíduos, principalmente no caso das indústrias de transformação primária, como as serrarias. Como muitas vezes estão localizadas em locais afastados dos grandes centros consumidores, a disposição inadequada dos resíduos acaba por gerar grandes passivos

ambientais, devido principalmente ao alto custo de transporte (BARBOSA et al., 2014; RONQUIM et al., 2014). Como alternativa, a serragem vem sendo muito utilizada para fabricação de compósitos cimentícios (ASHORI et al., 2012; TESSARO et al., 2015; TORKAMAN et al., 2014; BETOLINI et al., 2014). Estes compósitos em geral apresentam baixa massa específica,

baixa condutividade térmica, resistência ao fogo, impermeabilidade e resistência mecânica que, embora não seja tão elevada quanto a do concreto, mostra-se adequada para aplicações na construção civil como fabricação de blocos de alvenaria de vedação, argamassas, placas delgadas e elementos de enchimentos para lajes (PIMENTEL et al., 2006). Os compósitos cimento-madeira vêm sendo desenvolvidos cada vez mais com características desejáveis, como durabilidade, estabilidade dimensional, resistência contra biodegradação e vantagens econômicas (FRYBORT et al., 2008).

As propriedades mecânicas dos compósitos cimento-madeira podem ser influenciadas por variáveis como: espécies florestal, características físico-químicas, granulometria e geometria das partículas, tipo de cimento, presença de eventuais aditivos, proporção de água, temperatura do ambiente e o tempo de reação para hidratação do cimento (GARCEZ et al., 2016; JORGE et al., 2004). Além disso, é consenso entre pesquisadores, a influência de fatores como posição geográfica, estações do ano, espécie, período de armazenamento de madeira, componentes da árvore e índice de casca e açúcares, que inibem significativamente a hidratação do cimento (WEI et al., 2000). Outro fator relevante é a porosidade da matriz, no processo de hidratação do cimento a água não usada na hidratação evapora, originando assim porosidade na matriz do compósito. Esta estrutura porosa é geralmente complexa e influencia nas propriedades mecânicas e térmicas do compósito (BOUGUERRA et al., 1998).

A compatibilidade entre o cimento Portland e a madeira, especialmente quando de espécies tropicais, diminui quanto maior for a percentagem de serragem na pasta e altera a estrutura da pasta hidratada (FAN, et al., 2012), prejudicando o comportamento mecânico dos compósitos (GARCEZ et al., 2016). Devido à morfologia química do cimento e da celulose, as ligações químicas do tipo pontes de hidrogênio podem de-

sempear um papel importante na ligação destes componentes (FRYBORT et al., 2008). Por outro lado, hemiceluloses, amidos, açúcares, fenóis e ácidos existentes nas fibras de madeira, em níveis diferentes para cada espécie, tendem a inibir a hidratação do cimento, aumentar o tempo de pega e limitar a resistência do compósito devido a microfratura da matriz que ocorre durante a hidratação do cimento (FRYBORT et al., 2008; LIN et al., 1994). O complexo processo de hidratação do cimento é influenciado pela concentração de Ca(OH)_2 , bem como pelo pH e temperatura. Estas condições, que são características de cada compósito, determinam patamares diferenciados para o desencadeamento das reações de hidratação, gerando diferentes produtos finais (JORGE et al., 2004). A inibição da hidratação do cimento ocorre quando o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) cuja superfície é originalmente carregada positivamente, interage com os ácidos e açúcares, carregados negativamente. A superfície das fibras de madeira é provavelmente o local mais provável para encontrar os efeitos inibitórios relacionados com a hidratação do cimento (PEHANICHA et al., 2004).

Tratamentos prévios aplicados na madeira podem minimizar problemas de compatibilidade e sua magnitude pode ser acompanhada por possíveis alterações no comportamento mecânico destes compósitos (FAN et al. 2012). Os tratamentos em geral incluem retirada de extrativos por imersão em água fria ou água quente, imersão em solução alcalina de hidróxido de sódio ou hidróxido de cálcio, utilização de aditivos aceleradores de pega como cloreto de cálcio (CASTRO et al., 2014; FAN et al., 2012) e cloreto de magnésio (FRYBORT et al., 2008), bem como mineralização através do recobrimento com cimento (FRYBORT et al., 2008; GARCEZ et al., 2016). Outra possibilidade de minimizar questões relativas à compatibilidade entre o cimento e a madeira é a modificação da matriz do compósito com inclusão, por exemplo, de sílica ativa (FRYBORT et al., 2008; LIN et al., 1994). Estudos recentes

têm investigado a possibilidade de utilização da técnica denominada core-shell, de recobrimento com nanopartículas (LIBOR et al., 2009; TESSARO, 2015).

Este trabalho foi idealizado com o intuito de investigar a compatibilidade entre o cimento e a madeira através do da influência de dois diferentes tratamentos superficiais aplicados em serragem de *Pinus elliottii* nas propriedades mecânicas de compósitos do tipo argamassa, em que 10% ou 20% da massa de areia foi parcialmente substituída pelo mesmo volume de serragem. Os tratamentos propostos consideram duas abordagens diferenciadas: i) tentativa de remoção dos extrativos por lavagem da serragem, denominada tratamento térmico por banho de imersão, que é uma técnica de simples aplicação e baixo custo; ii) recobrimento das partículas de serragem com TEOS, técnica inovadora que atuaria na busca da formação de uma barreira de difusão para controlar a modificação das propriedades físicas da matriz e nas propriedades químicas da superfície das partículas (SILVA et al., 2011).

Material e Métodos

Matéria-prima

A serragem utilizada na pesquisa foi obtida junto à serraria Madecom, localizada no município de Pelotas-RS. O cimento CP IV-32, que atende as especificações da NBR 5736 (ABNT, 1999), foi selecionado por ser produzido na Região Sul do Brasil e estar disponível no mercado local. A areia normal, produzida e fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) de São Paulo, segue especificações da NBR – 7214 (ABNT, 2012).

A serragem recebeu dois tipos de tratamento superficiais prévios: i) tratamento térmico por banho de imersão (BERALDO e CARVALHO, 2004; FAN et al., 2012; CASTRO et al., 2014), com a finalidade de remover extrativos que inibem a pega do cimento; ii) tratamento ao ar livre com

ortossilicato de tetraetila – TEOS ($\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$), com a finalidade de recobrir as partículas de serragem com silício, promovendo uma selagem para amenizar o efeito higroscópico da madeira, que pode impedir uma adequada hidratação do cimento, além de amenizar efeitos inibitórios da pega do cimento.

No tratamento térmico as partículas de serragem foram mantidas em um recipiente contendo água a 90°C por 2h. O tratamento ao ar livre com TEOS foi realizado em duas etapas: imersão da serragem em uma mistura de TEOS e álcool etílico na proporção 1:3, por 10 minutos, seguida por imersão da serragem apenas em TEOS, por 10 minutos. Entre as duas etapas foi respeitado um intervalo de 30 minutos, em que a serragem permaneceu em recipiente a parte, ao ar livre. Após receberem os tratamentos, as partículas foram climatizadas em estufa até atingirem um teor de umidade de 12%.

Os elementos químicos presentes na serragem tratada e na areia, determinados por fluorescência de raios X (EDX), po-

Tabela 1. Elementos químicos presentes na areia e na serragem.

Table 1. Chemical elements of sand and sawdust.

Elemento (%)	Serragem			
	Areia	<i>In natura</i>	Banho de imersão	Ao ar livre com TEOS
Si	91,81	0,00	9,84	99,03
Ca	0,00	47,71	50,37	0,00
K	4,35	12,31	9,64	0,00
Fe	1,66	5,54	3,05	0,27
Ti	1,54	0,00	0,00	0,00
Zr	0,42	0,00	0,00	0,00
S	0,12	2,11	3,54	0,00
Mn	0,11	23,53	15,82	0,59
Co	0,00	5,16	0,00	0,00
Cu	0,00	3,65	0,00	0,12
Er	0,00	0,00	7,73	0,00

Em que: Si = Silício; Ca = Cálcio; K= Potássio; Fe = Ferro; Ti = Titânio; Zr = Zircônio; S = Enxofre; Mn = Manganês; Co = Cobalto; Cu = Cobre; e Er = Érbio.

dem ser visualizados na Tabela 1.

A Figura 1 mostra como foi organizado o programa experimental.

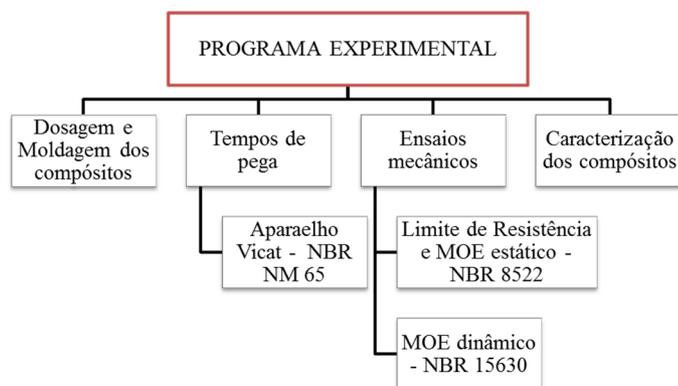


Figura 1. Programa experimental.

Figure 1. Experimental program.

Dosagem, determinação do tempo de pega e moldagem dos corpos de prova

A moldagem dos corpos de prova seguiu as especificações da NBR 7215 (ABNT, 1996): traço 1:3 (cimento:areia normal), em massa, com relação água/cimento de 0,48, conforme quantitativos da Tabela 2. A relação cimento:madeira:água para os compósitos, proposta com base nos resultados de Garcez et al. (2013) foi 1:0,038:0,48 e

Tabela 2. Quantidade de materiais utilizada em cada compósito.

Table 2. Amount of materials used to produce each composite.

Material	Quantidades (g)						
	CR	C10N	C20N	C10B	C20B	C10T	C20T
Cimento Portland	624,0	624,0	624,0	624,0	624,0	624,0	624,0
Água	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0
Areia Normal	Fração Grossa						
	Fração Média Grossa	468,0	421,2	374,4	421,2	374,4	421,2
	Fração Média Fina						
Fração Fina							
Serragem <i>in natura</i>	0,0	24,0	48,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Serragem com banho de imersão	0,0	0,0	0,0	24,0	48,0	0,0	0,0
Serragem com TEOS ao ar livre	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	24,0	48,0

Em que: CR = referencial; C10 e C20 = compósitos com 10% e 20% de serragem; N, B e T = serragem *in natura*, tratamento por banho de imersão, tratamento superficial ao ar livre com TEOS.

1:0,076:0,48, para os compósitos com 10% e 20% de serragem, respectivamente.

Para cada tipo de compósito foram determinados a pasta de consistência normal segundo a NM 43 (ABNT, 2002) e os tempos de pega inicial e final, com o aparelho de Vicat (Figura 2), segundo a NBR NM 65 (ABNT, 2003).

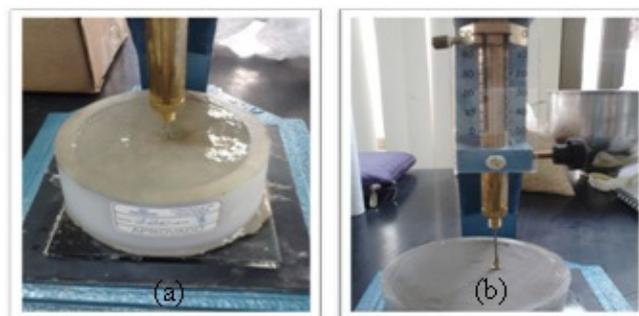


Figura 2. Medidas realizadas com o aparelho de Vicat: Início (a) e fim (b) de pega.

Figure 2. Vicat apparatus measurements: Start (a) and end (b) of setting.

Após a moldagem dos corpos de prova, os mesmos foram mantidos submersos em um tanque de cura saturado de cal, conforme a NBR 9479 (ABNT, 1984), até atingirem a idade requerida para os ensaios.

Ensaio mecânicos

O módulo de elasticidade estático e o limite de resistência

dos compósitos foram determinados de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2003).

Para determinação do módulo de elasticidade dinâmico foi utilizado um aparelho de Ultrassom da marca Proceq, modelo Tico, com transdutores de 54kHz, de acordo com as prescrições da NBR 15630 (ABNT, 2008).

Caracterização dos compósitos

Os compósitos foram caracterizados quanto à composição química por fluorescência de raios X (EDX). Quanto à morfologia dos poros e estrutura formada, os compósitos foram analisados por meio de imagens obtidas em microscópio de varredura eletrônica (MEV) da marca SHIMADZU modelo SSX-550.

Análise estatística

Os resultados obtidos para as propriedades mecânicas foram analisados através da análise de variância (ANOVA) com 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey.

Resultados e Discussão

Determinação do tempo de pega

A pasta de consistência normal (Tabela 3) foi determinada, para cada compósito, quando estes atingiam a leitura de 6 ± 1 mm no aparelho de Vicat.

Para determinação da consistência da pasta referente ao compósito CR, foi adicionada água na massa de 500 g de cimento até que fosse atingida a leitura desejada, assim ficou estabelecida a necessidade de 175 g de água para a obtenção de uma leitura de 6 mm. Nas pastas com 10% de serragem foram utilizadas 205 g (C10N e C10B) e 200 g (C10B) de água, com leituras 5 mm, 7 mm e 6 mm, respectivamente. Nas pas-

tas dos compósitos com 20% de serragem foi necessário adicionar 225 g (C20N), 220 g (C20B) e 215 g (C20T) de água para 6 mm, 5 mm e 6 mm de leitura, respectivamente.

A serragem in natura necessitou de maior quantidade de água para atingir 6 ± 1 mm, sendo seguida da serragem com tratamento por meio do banho de imersão, e por último pela serragem com tratamento superficial ao ar livre com TEOS, comprovando a eficiência do tratamento quanto à selagem da partícula visando amenizar o efeito higroscópico da madeira.

Com a consistência das pastas definida, foram então determinados os tempos de pega no aparelho de Vicat (Tabela 4), utilizados como indicativo de compatibilidade entre a madeira e o cimento.

Tabela 4. Tempos de pega obtidos no aparelho de Vicat.

Table 4. Time of setting obtained by Vicat apparatus.

Compósitos	Tempos de pega (minutos)	
	Inicial	Final
CR	300	360
C10N	300	390
C20N	285	435
C10B	240	360
C20B	240	390
C10T	165	295
C20T	60	120

Em que: C = Compósito; R = Referencial; 10 = Com 10% de serragem; 20 = Com 20% de serragem; N = in natura; B = Com tratamento por meio do banho de imersão; T = Com tratamento superficial ao ar livre com TEOS.

Os tempos de pega encontram-se de acordo com o que prescreve a NBR 5736 (ABNT, 1999), onde consta que, para o cimento Portland Pozolânico CPIV32 o tempo de início de pega deve ser ≥ 60 min e o tempo de fim de pega ≤ 720 min. Logo, a utilização de serragem de *Pinus elliotti* nas proporções empregadas neste estudo não interfere negativamente no tempo de pega dos compósitos. De fato, Castro et al. (2014), em seus estudos, enfatizaram que não há necessidade de pré-tratamento em madeiras que são naturalmente compatíveis

Tabela 3. Resultados das medidas do aparelho de Vicat com a sonda de Tetmajer.**Table 3.** Results of Vicat Tetmajer apparatus measurements.

Compósitos	Leitura (mm)	Componentes (g)				
		Cimento	Água	Serragem		
				<i>In natura</i>	Banho de imersão	Tratamento superficial
CR	6	500,00	175,00	0,00	0,00	0,00
C10N	5	500,00	205,00	19,23	0,00	0,00
C20N	6	500,00	225,00	38,50	0,00	0,00
C10B	7	500,00	205,00	0,00	19,23	0,00
C20B	5	500,00	220,00	0,00	38,50	0,00
C10T	6	500,00	200,00	0,00	0,00	19,23
C20T	6	500,00	215,00	0,00	0,00	38,50

Em que: C = Compósito; R = Referencial; 10 = Com 10% de serragem; 20 = Com 20% de serragem; N = *in natura*; B = Com tratamento por meio do banho de imersão; T = Com tratamento superficial ao ar livre com TEOS.

com o cimento. Contudo, deve-se levar em conta que esse ensaio é subjetivo, devido a critérios indicativos de condições, como por exemplo, a prática de observação do operador e a perda de umidade por evaporação, que em longos períodos de tempo, podem induzir a um falso resultado de início de pega (ZUCCO; BERALDO, 2012).

Limite de Resistência, Módulos de Elasticidade Estático e Dinâmico

A Tabela 5 apresenta os resultados, valores médios de 5 repetições, obtidos para o limite de resistência (f_{cj}), o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) e o módulo de elasticidade estático (E_{ci}) aos 28 dias. Os valores de f_{cj} , E_d e E_{ci} diminuíram com o aumento do percentual de serragem inserido nos compósitos.

Existem, comparativamente aos dados de testes de flexão e tração direta, poucas publicações que reportem resultados de ensaios à compressão em compósitos cimento-madeira (TORKAMAN et al., 2014).

Estudos de Bertolini et al. (2014) em compósitos com serragem de *Pinus sp.* na proporção cimento:madeira:água 1:0,21:0,60, resultaram em valores para o limite de resistência

de cerca de 5 MPa, para serragem *in natura* e 10 MPa para serragem tratada por banho de imersão. No presente trabalho não se evidencia a mesma eficiência para este tratamento, uma vez que não se observou diferença estatística (Tabela 5). Por outro lado, a média dos limites de resistência foram superiores: 27,26 MPa para a proporção 1:0,038:0,48 e 24,14 MPa para 1:0,076:0,48 (Tabela 5). Ensaios de Torkaman (2014) com proporção 1:0,25:0,55 resultaram resistências médias de 1,60 MPa.

Em comparação com o compósito CR, houve redução do limite de resistência (f_{cj}) para os compósitos com 10% e 20% de serragem: C10N (14,08%), C10B (16,86%) e C10T (18,94%), C20B (21,30%), C20N(23,69%) e C20T (36,22%). A serragem com tratamento superficial ao ar livre com TEOS resultou nos compósitos com menores limites de resistência, para ambos os níveis de substituição de areia por serragem.

Os limites de resistência encontrados nos compósitos com serragem (Tabela 5) não impedem sua utilização em certas aplicações práticas da construção civil (BOUGUERRA et al., 1998), como, por exemplo, a fabricação de blocos de vedação e artefatos de cimento.

A determinação do módulo de elasticidade é de fundamental importância (CHRISTÓFORO et al., 2013), que remete ao fato de esta propriedade mecânica estar relacionada diretamente com a rigidez dos compósitos cimento-madeira, refletindo também na sua capacidade de deformação e no controle de fissuração. A Figura 3 relaciona o módulo de elasticidade dinâmico com o módulo de elasticidade estático e o limite de resistência dos compósitos deste estudo.

Tabela 5. Limite de resistência (f_{cj}), módulo de elasticidade dinâmico (E_d) e módulo de elasticidade estático (E_{ci}), aos 28 dias.

Table 5. Compressive strength (f_{cj}), Dynamic Young's modulus (E_d) and static Young's Modulus (E_{ci}), at 28 days.

Compósitos	f_{cj} (MPa)	E_d (MPa)	E_{ci} (MPa)
CR	33,10 ^a	8025,48 ^a	47700 ^a
C10N	28,44 ^b	7447,05 ^b	37850 ^b
C20N	25,26 ^{b,c}	6818,79 ^d	31400 ^c
C10B	27,52 ^b	7158,39 ^c	34900 ^{b,c}
C20B	26,05 ^b	6719,18 ^d	30700 ^c
C10T	26,83 ^b	7138,98 ^c	39500 ^b
C20T	21,11 ^c	6955,77 ^{c,d}	32400 ^c
F	7,19	28,73	15,16
P	< 0,01	< 0,01	< 0,01

Em que: CR = referencial; C10 e C20 = compósitos com 10% e 20% de serragem; N, B e T = serragem *in natura*, tratamento por banho de imersão, tratamento superficial ao ar livre com TEOS; F = Valor de F calculado; P = Probabilidade de erro. Em um mesmo tratamento, médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente em nível de 5% de probabilidade de erro, pelo teste de Tukey.

Existe (Figura 3) alta determinação entre os dados dos módulos de elasticidade dinâmico e estático (90,6%), o que não ocorre com relação ao limite de resistência (68,0%). Há de se observar que as medições de velocidade do pulso ultrassônico podem ser afetadas tanto pela própria heterogeneidade do compósito cimento-madeira quanto por fatores como caminho percorrido pela onda, teor de umidade, temperatura, forma e tamanho da amostra (GARCEZ et al.,

2016). A influência do tipo de agregado no módulo de elasticidade, muitas vezes, pode ser mais relevante que a resistência ou a idade, sendo que em compósitos com diferentes tipos de agregados esta relação pode ser ainda mais complexa (GUTIERREZ e CÁNOVAZ, 1995).

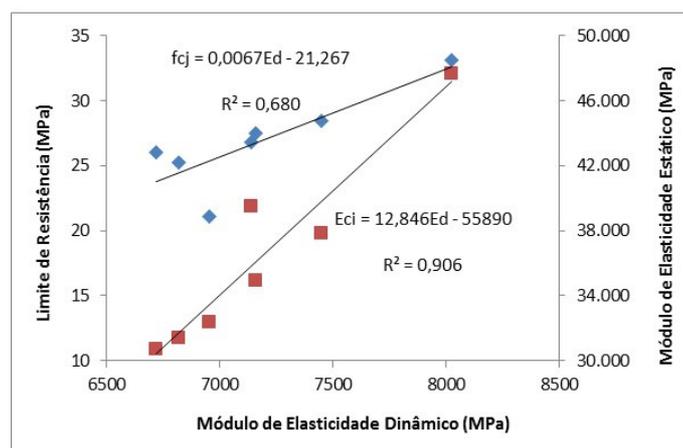


Figura 3. Módulo de elasticidade dinâmico, estático e limite de resistência.

Figure 3. Dynamic Young's modulus, static Young's modulus and compressive strength.

Em relação ao módulo de elasticidade dinâmico (E_d), os percentuais de redução em relação ao CR foram C10N (7,21%), C10B (10,80%), e C10T (11,05%), para os compósitos com 10% de serragem, e C20T (13,33%), C20N (15,04%) e C20B (16,28%) para os compósitos com 20% de serragem. O comportamento quanto ao módulo de elasticidade dinâmico, também foi observado por Beraldo et al. (2012), que verificaram que os valores dos módulos de elasticidade dinâmicos obtidos para os diferentes compósitos reduziram acentuadamente para teores mais elevados de substituição de areia por partículas de cana.

Quanto ao módulo de elasticidade estático (E_{ci}), não houve diferença estatística entre os compósitos com 10% e 20% de serragem. Tessaro et al. (2015) em seus estudos, comprovaram que o aumento da porcentagem de fibras de madeira, independente do tratamento, resulta em mais elasti-

dade e flexibilidade da matriz de cimento. O módulo de elasticidade de uma pasta de cimento depende, basicamente, da sua porosidade e da relação água:cimento. Entretanto, em um compósito cimento-madeira, a proporção entre a pasta e o agregado, a espécie de madeira e os tratamentos aplicados nas partículas de madeira podem ser também relevantes (GARCEZ et al., 2016)

A interface entre a matriz cimentícia e a fibra de madeira é muito influenciada pela presença de água, uma vez que as fibras de madeira úmida apresentam menor resistência à flexão, o que as torna mais flexíveis e menos capazes de inibir a fissuração da matriz de cimento (FRYBORT et al., 2008). Desta forma, é esperado que os módulos de elasticidade dos compósitos cimento-madeira sejam inferiores em relação ao referencial e diminuam quanto maior o percentual de madeira presente no compósito.

Frybort et al. (2008) observaram que existe uma correlação linear inversa entre a proporção cimento:madeira e o módulo de elasticidade. De fato, os resultados da Tabela 5 mostram que os compósitos com 10% de serragem (1:0,038) possuem maiores módulos de elasticidade em relação àqueles com 20% de serragem (1:0,076).

Para ambos percentuais de substituição de areia por serragem, portanto, os menores valores para o limite resistência decorreram do tratamento superficial ao ar livre com TEOS. Por outro lado, estes compósitos apresentaram maiores módulos de elasticidade estático em relação aos demais, um indicativo de maior rigidez.

Caracterização dos compósitos

Analisando a composição química dos compósitos (Tabela 6) observa-se que o CR apresentou o maior percentual de silício em sua composição, 25,80%, seguido pelos compósitos C10T (24,83%) e C20T (24,71%), o que comprova a impreg-

nação de Si na serragem tratada com TEOS, também reportada por Tessaro et al. (2014) e Potulski et al. (2014). Os compósitos C10N e C10B contém 10% menos areia que o CR, o que justifica os 23,16% e 22,33% de Si encontrados. O mesmo ocorre nos compósitos C20N e C20B, que contém 20% menos areia que o CR e 21,07% e 18,73% de Si.

Tabela 6. Composição química obtida por fluorescência de raio X (EDX).

Table 6. Chemical composition obtained by X-Rays fluorescence (EDX).

Elementos químicos presentes nos compósitos, em %							
	CR	C10N	C20N	C10B	C20B	C10T	C20T
Si	25,80	23,16	21,07	22,33	18,73	24,83	24,71
Ca	61,93	65,05	66,03	64,53	61,60	63,40	59,92
K	2,47	1,99	2,31	3,26	3,70	1,81	2,25
Fe	6,73	7,42	8,18	8,39	8,24	7,26	6,90
Ti	0,73	0,98	0,83	0,00	0,00	1,30	0,00
S	1,54	1,41	1,58	1,49	1,09	1,41	1,45
Al	0,00	0,00	0,00	0,00	6,65	0,00	4,77

Em que: C10 e C20 = compósitos com 10% e 20% de serragem; N, B e T = serragem *in natura*, tratamento por banho de imersão, tratamento superficial ao ar livre com TEOS.

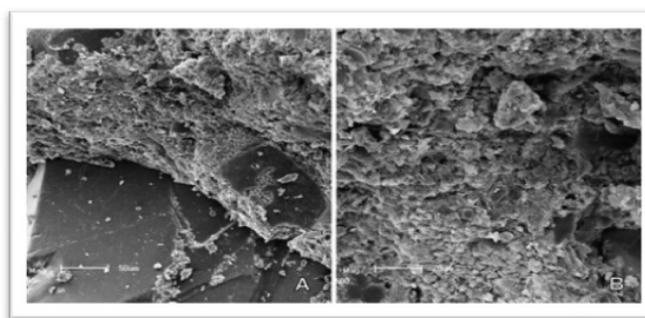


Figura 4. Imagens obtidas por MEV para o CR – (A) 200X; (B) 500X.

Figure 4. Images obtained by MEV for CR – (A) 200X; (B) 500X.

A Figura 4 mostra imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura do compósito CR que apresenta apenas areia e cimento em sua composição com 89 dias, onde se pode observar a interface pasta-agregado e a estrutura homogênea e porosa, embora compacta, da pasta.

A Figura 5 apresenta imagens de secções de ruptura dos compósitos obtidas nos compósitos C10N com 85 dias, C20N com 83 dias, C10B com 81 dias, C20B com 78 dias, C10T com 76 dias e C20T com 74 dias, em microscópio eletrônico de varredura (MEV) sob magnificação de 200 vezes. As imagens obtidas a partir do MEV permitiram uma análise morfológica tanto da matriz quanto das fibras do compósito e complementando a análise dos resultados obtidos através dos ensaios mecânicos.

Partículas de serragem *in natura* e tratadas com banho de imersão podem ser observadas claramente na Figura 5 (A e

D) e não mostram diferença quanto ao aspecto visual. O recobrimento das fibras de madeira por silício decorrente do tratamento superficial ao ar livre com TEOS, que pode ser observado na Figura 5 (E e F), não refletiu mudanças positivas no comportamento mecânico dos compósitos C10T e C20T com relação ao limite de resistência. Por outro lado, C10T e C20T se mostraram mais rígidos em relação aos demais compósitos com serragem, o que, segundo Tessaro et al. (2015) pode indicar um maior controle de fissuração e de absorção

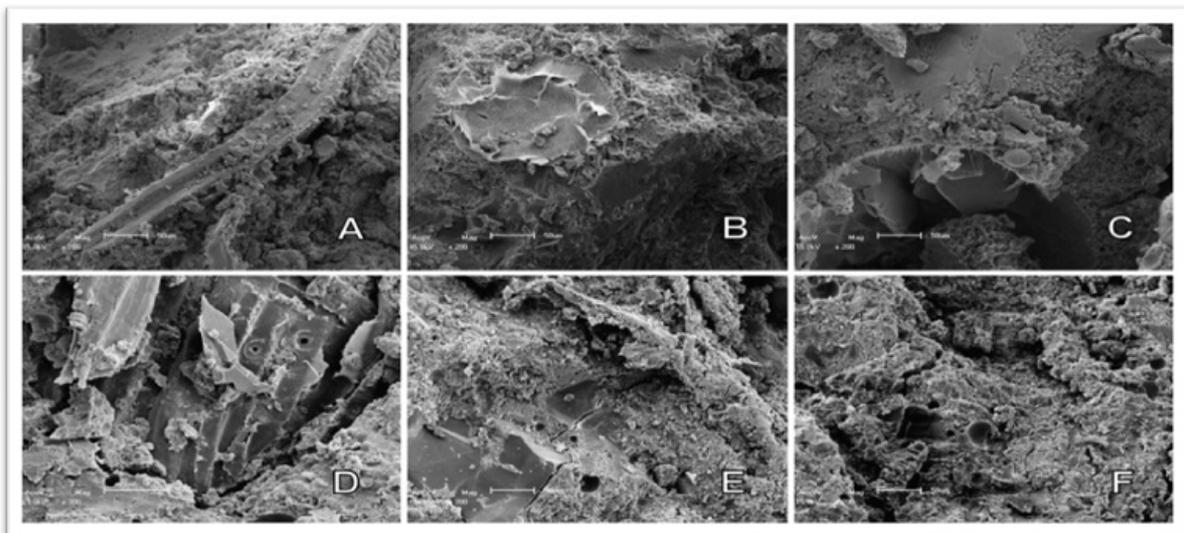


Figura 5. Imagens obtidas por MEV (200X): (A) C10N; (B) C20N; (C) C10B; (D) C20B; (E) C10T; (F) C20T.

Figure 5. Images obtained by MEV (200X): (A) C10N; (B) C20N; (C) C10B; (D) C20B; (E) C10T; (F) C20T.

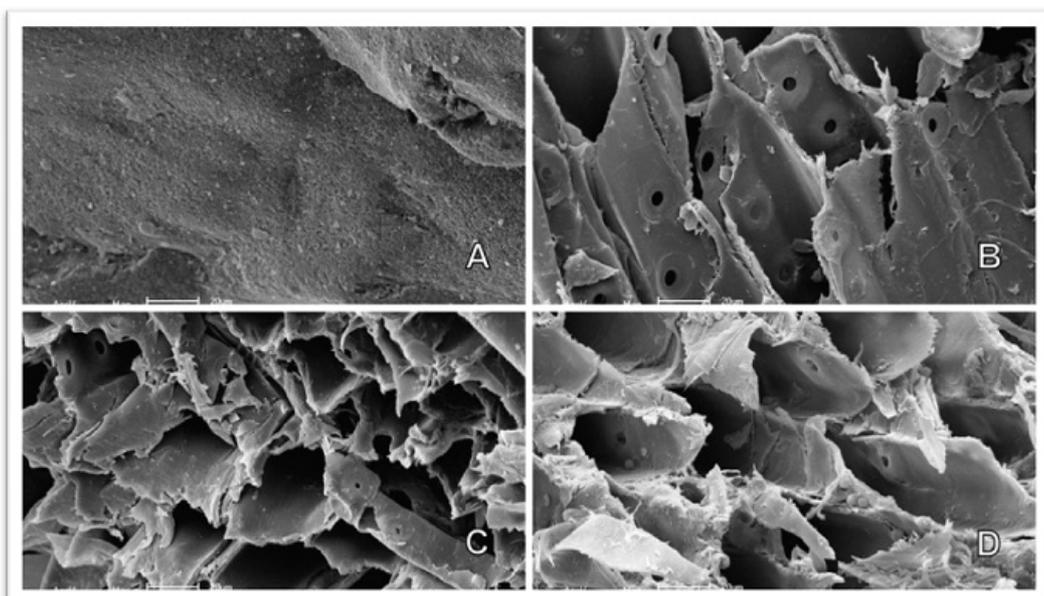


Figura 6. Imagens obtidas por MEV (500X): (A) Areia; (B) Serragem *in natura*; (C) Serragem com tratamento por meio do banho de imersão; (D) Serragem com tratamento superficial ao ar livre com TEOS.

Figure 6. Images obtained by MEV(500X): (A) Sand; (B) Sawdust *in natura*; (C) Sawdust with boil treatment; (D) Serragem with surface treatment with tetraethyl orthosilicate – TEOS.

de energia após a fratura da matriz de cimento.

De fato, a aderência de particulados às fibras não pode ser considerada a única característica para definir um compósito em relação ao seu desempenho durante o carregamento. A ligação da fibra à matriz pode ser afetada por suas dimensões, condições da superfície, número de fibras presentes num dado volume de material e até mesmo por uma baixa densidade relativa, que podem dificultar a homogeneidade das fibras ao compósito (HAMZEH et al., 2013).

O aspecto visual dos compósitos com 10% e 20% de serragem (Figura 5) se mostra semelhante ao do compósito referencial (Figura 4) quanto ao aspecto poroso da matriz. Há de se considerar, entretanto, que a porosidade intrínseca das fibras de madeira (Tessaro et al., 2015), mostrada em detalhe na Figura 6, contribui para a redução nas propriedades mecânicas destes compósitos em relação ao referencial (Figura 3).

Fica evidenciado nas imagens A, C, D e E da Figura 5 e na Figura 6, que a macro porosidade presente no compósito é gerada pelas partículas de madeira (BOUGUERRA et al., 1998), enquanto a meso porosidade é essencialmente relacionada à matriz.

Conclusões

Os tempos de pega se mostraram de acordo com as prescrições da NBR – 5736 (ABNT, 1999), independente do percentual de serragem e do tipo de tratamento utilizado.

Os limites de resistência e os módulos de elasticidade estático e dinâmico diminuíram com o aumento dos percentuais de substituição de areia por serragem nos compósitos.

O recobrimento das fibras de madeira por silício com TEOS não refletiu em mudanças positivas no comportamento mecânico dos compósitos com relação ao limite de resistência. Entretanto, estes compósitos se mostraram mais rígidos em relação aos que receberam serragem com tratamento térmico.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) permitiu a visualização da macro e meso porosidade presentes no compósito, geradas pelas partículas de madeira e pela matriz, que contribuíram para a redução das propriedades mecânicas dos compósitos com substituição de areia por serragem.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro por intermédio de bolsas de pesquisa e de pós-graduação.

Referências

ASHORI, A.; TABARSA, T.; AMOSI, F. Evaluation of using waste timber railway sleepers in wood–cement composite materials. *Construction and Building Materials*, v. 27, n.1, p. 126–129, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5736**: Cimento Portland Pozolânico. Rio de Janeiro: ABNT, 1999. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7214**: Areia normal para ensaio de cimento – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1996. 11p.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8522**: Concreto - Determinação do módulo elástico de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 16p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9479**: Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos de prova de argamassa e concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 2p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15630**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 4p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 43**: Cimento portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro: ABNT, 2002. 8p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 65**: Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 4p.
- BARBOSA, L. C., PEDRAZZI, C., FERREIRA, E. S., SCHNEID, G. N., WILLE, V. K. D. Avaliação de resíduos de uma serraria para produção de celulose kraft. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 2, p. 491-500, 2014.
- BERALDO, A. L.; CARVALHO, J. V. Compósito de *Eucalyptus Grandis* - cimento Portland. **Scientia Forestalis**, v. 65, p. 150-161, 2004.
- BERALDO, A. L.; PAYÁ, J.J.; MONZÓ, J. M. END aplicado a compósito de cimento e resíduo vegetal. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO, 2012, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo, 2012.
- BERTOLINI, M. S.; CAMPOS, C. I.; SOUZA, A. M.; PANZERA, T. H.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Wood-cement composites from wastes of *Pinus* sp. wood: Effect of particles treatment. **International Journal of Composite Materials**, v. 4, n 2, p. 146-149, 2014.
- BOUGUERRA, A.; LEDHEM, F.; BERQUIN, F.; DHEILLY, R.M.; QUÉNEUDEDEC, M. Effect of microstructure on the mechanical and thermal properties of lightweight concrete prepared from clay, cement, and wood aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n.8, p. 1179-1190, 1998.
- CASTRO V.; ARAÚJO R. D.; PARCHEN, C.; IWAKIRI, S. Avaliação dos efeitos de pré-tratamentos da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden & Cambage no grau de compatibilidade com cimento Portland. **Revista Árvore**, v. 38, n. 5, p. 945-952, 2014.
- CHRISTOFORO, A. L., RIBEIRO FILHO, S. L. M., PANZERA, T. H., LAHRI, F. A. R. Metodologia para o cálculo dos módulos de elasticidade longitudinal e transversal em vigas de madeira de dimensões estruturais. **Ciência Rural**, v.43, n.4, p.610-615, 2013.
- FAN, M., NDIKONTAR, M. K., ZHOU, X., NGAMVENG, J. H. Cement-bonded composites made from tropical woods: Compatibility of Wood and cement. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 135-140, 2012.
- FRYBORT, S.; MAURITZ, R.; TEISCHINGER, A.; MULLER, U. Cement bonded composites - A mechanical review. **Bio-Resources**, v.3, n. 2, p. 602-626, 2008.
- 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, n. 2, p. 95-104, 2013.
- GARCEZ, M. R.; GARCEZ, E. O.; MACHADO, A. O.; GATTO, D. A. Cement-Wood Composites: Effects of Wood Species, Particle Treatments and Mix Proportion. **International Journal of Composite Materials**, v. 6, n. 1, p. 1-8, 2016.
- HAMZEH Y, ZIABARI KP, TORKAMAN J, ASHORI A, JAFARI M. Study on the effects of white rice husk ash and fibrous materials additions on some properties of fiberecement composites. **Journal of Environmental Management**, v. 17, p. 263-267, 2013.
- JORGE, F. C.; PEREIRA, C.; FERREIRA, J. M. F. Wood-cement composites: a review. **Holz Roh Werkst**, v.62, p. 370-377, 2004.
- LIBOR, Z.; ZHANG, Q.; ISRAEL, C.; MATHUR, N.D. Nano-coatings on micro- or nano-particles. **Materials Science and Technology**, v.25, n.11, p.1307-1311, 2009.
- LIN, X.; SILSBEE, M. R.; ROY, D. M.; KESSLER, R.; BLANKENHORN, P. R. Approaches to improve the properties of wood fiber reinforced cementitious composites. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 8, p. 1558-1566, 1994.
- PEHANICHA, J. L.; BLANKENHORN, P. R.; SILSBEEB, M. R. Wood fiber surface treatment level effects on selected mechanical properties of wood fiber-cement composites. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 59-65, 2004.

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

POTULSKI, D. C.; MUNIZ, G. I. B.; KLOCK, U.; ANDRADE, A. S. Influência da incorporação de celulose microfibrilada nas propriedades de resistência mecânica do papel. **Scientia Forestalis**, v.42, p. 345-351, 2014.

RONQUIM R. M., FERRO F. S., ICIMOTO F. H., CAMPOS C. I., BERTOLINI M. S., CHRISTOFORO A L., LAHR F. A. R. Physical and Mechanical Properties of Wood-Cement Composite with Lignocellulosic Grading Waste Variation. **International Journal of Composite Materials**, v. 4, n. 2, p. 69-72, 2014.

SILVA, T. P.; RAUBACH, C. W.; ULLMANN, M. A.; CARREÑO, N. L. V.; CAVA, S.; GONÇALVES, M. R. F.; NUNES, M. R. Development and characterization of nano-coated particles based on halloysitenanoclay. **Cerâmica**, v.57, p.115-121, 2011.

TESSARO, A. B.; GONÇALVES, M. R. F.; GATTO, D. A.; POLLNOW, E. N.; CARREÑO, N. L. V.; DELUCIS, R. de A. Compósitos cimentícios reforçados com fibras de eucalipto puras e tratadas com tetraetilortossilicato (TEOS 98%). **Ambiente Construído**, v. 15, n. 3, p. 47-55, 2015.

TORKAMAN, J.; ASHORI, A.; MOMTAZI, A. S. Using wood fiber waste, rice husk ash, and limestone powder waste as cement replacement materials for lightweight concrete blocks. **Construction and Building Materials**, v.50, p. 432-436, 2014.

WEI, M. W.; ZHOU, Y. G.; TOMITA, B. Hydration behavior of wood cement-based composite I: evaluation of wood species effects on compatibility and strength with ordinary Portland cement. **Journal of Wood Science**, v.46, n. 4, p. 296-302, 2000.

ZUCCO, L. L.; BERALDO, A. L. Avaliação de compósitos por meio de ensaio combinado. In: VIII ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2002, Uberlândia. **Proceedings...** Uberlândia, 2002.