

Recebido: 12-02-2015 Aceito: 13-06-2016

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

Mônica Regina Garcez<sup>1\*</sup>, Thiara Santos<sup>2</sup>, Estela Oliari Garcez<sup>2</sup>, Darci Alberto Gatto<sup>3</sup>

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

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

<sup>3</sup>Centro 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 visa estudar o comportamento de compósitos cimento-madeira do tipo argamassa, nos quais 10 ou 20% da massa de areia foi parcialmente substituída pelo mesmo volume de serragem de *Pinus elliottii*. Foi utilizada serragem *in natura*, tratada, por meio de banho de imersão ou por recobrimento com ortosilicato de tetraetila, procurando avaliar sua compatibilidade com o cimento. Foram realizados ensaios físicos para identificar possíveis alterações nas massas específicas seca, saturada, real e aparente, no índice de vazios, na absorção de água e no teor de umidade dos compósitos. A variação do percentual de serragem inserida influenciou nos valores das massas específicas e o teor de umidade dos compósitos. O tipo de tratamento utilizado na serragem antes do processo de moldagem dos corpos de prova não provocou alterações nas propriedades físicas dos compósitos. Entretanto, a escolha de um percentual de substituição de areia por serragem ou a utilização de um determinado tratamento prévio na serragem deve estar baseada não somente na análise das propriedades físicas do compósito, mas também nas suas propriedades mecânicas e de durabilidade, que devem ser compatíveis com sua utilização prática e condições de exposição.

**Palavras-chave:** banho de imersão, tratamento superficial, TEOS.

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

**ABSTRACT** This research aims to investigate the behavior of cement-wood mortar composites, in which 10 or 20% of sand, in mass, was partially replaced by the same volume of *Pinus elliottii* sawdust. Aiming to improve the interaction between cement and wood, replacements of sawdust, *in natura*, boiled, or coated with tetraethyl orthosilicate were used. Physical tests were performed aiming to identify changes on the specific gravity (bulk, bulk saturated surface dry, effective and apparent), void ratio, water absorption and moisture content of the cement-wood composites. The percentage of sawdust influenced the values of specific gravity and moisture content of the composites. Treatments applied in the sawdust before the molding process did not change the physical properties. However, the choice of a replacement percentage or a specific previous treatment depends not only on the mechanical and physical properties of the composite but also on its application in practical situations and exposure conditions.

**Keywords:** boil treatment, surface treatment, TEOS.

### Introdução

Ao longo das últimas décadas, muitos trabalhos de pesquisa têm se voltado à produção de materiais compósitos. Normalmente aplicados a uma matriz de cimento, materiais

de origem natural e sintética ou até mesmo resíduos podem ser utilizados na sua produção. Os resíduos de indústrias de base madeireira podem ser uma alternativa viável para aplicação na matriz de cimento, pois além de se tratar de um re-

curso natural renovável, de versátil utilização e baixo consumo energético, apresentam baixa massa específica, o que os torna apropriados para substituir parcialmente o agregado miúdo do compósito, por exemplo.

O cimento é composto pela queima de uma mistura de matérias-primas contendo quatro óxidos principais – Óxido de Cálcio (CaO), Óxido de Silício (SiO<sub>2</sub>), Óxido de Alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e Óxido de Ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) – que produz o clínquer, um dos dois ingredientes básicos exigidos para fabricar o cimento Portland, conforme salientado por Bye (1999). O outro ingrediente é o sulfato de cálcio na forma de gesso (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O), hemidrato (CaSO<sub>4</sub>·½H<sub>2</sub>O), anidrita, sulfato de cálcio (CaSO<sub>4</sub>), ou uma mistura de dois ou três deles. O processo de hidratação do cimento pode ser entendido, de acordo com Kihara; Centurione (2005), como a estabilização pela água dos minerais do clínquer, metaestáveis a temperatura ambiente, gerando uma assembleia mineralógica distinta, constituída predominantemente por fases de baixa cristalinidade, como o Silicato de Cálcio Hidratado, ou C-S-H (proporções variáveis de CaO, SiO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O), etringita (Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub>·3CaSO<sub>4</sub>·32H<sub>2</sub>O) e Ca(OH)<sub>2</sub>, ou portlandita.

Quimicamente, a madeira é constituída de celulose, hemiceluloses (polioses), lignina e extrativos. A celulose é considerada o componente mais importante da parede celular em termos de massa e efeitos nas características da madeira. É o componente majoritário, perfazendo aproximadamente a metade das madeiras de coníferas e de folhosas. A madeira ainda apresenta em sua constituição, não havendo diferenças consideráveis entre folhosas e coníferas, 49-50% de carbono (C), 6% de hidrogênio (H), 44-45% de oxigênio (O) e 0,1-1% de nitrogênio (N), e poucas quantidades de substâncias minerais, como cálcio (Ca), potássio (K), magnésio (Mg) e outros (BALLONI; BARREIROS, 2010).

Algumas reações inibitórias podem se desenvolver na matriz ou na interface madeira-cimento, causando o enfraquecimento das ligações químicas e mecânicas. Em geral, não existe incompatibilidade da celulose com o cimento, mas as hemiceluloses solúveis e os açúcares simples, ao se combinarem com íons metálicos, podem provocar certa incompatibilidade. Por outro lado, existem técnicas estabelecidas que avaliam a intensidade desse fenômeno, sendo essas baseadas nas características térmicas de um processo de fixação de cimento ou sobre as propriedades físicas dos compósitos produzidos em laboratório (BERALDO; CARVALHO, 2004).

De acordo com Batista (2001/2002), as coníferas apresentam maior compatibilidade química com o cimento do que as folhosas, devido a essas últimas apresentarem maior número de componentes que o atacam. Logo, a ideia de misturar cimento, serragem e água só é possível, de maneira direta, para um número reduzido de espécies.

Diversas técnicas, tais como lavagem e tratamentos químicos das partículas de madeira, vêm sendo adotadas com o propósito de amenizar a interferência negativa sobre a pega do cimento. Beraldo et al. (2012), por exemplo, efetuaram a lavagem de partículas de madeira em água quente (80°C) por 1h, com posterior lavagem em água fria, visando minimizar a interferência negativa da biomassa vegetal em misturas com argamassa de cimento. No trabalho de Zziwa (2006), por outro lado, partículas de *Pinus caribaea* foram impregnadas em água durante 24h para reduzir a quantidade de solúveis em água, açúcares e taninos. Silva et al. (2009) optaram por tratar partículas de *Pinus* spp. por meio da imersão destas em água a 80°C. O sucesso de cada técnica está relacionado também com a espécie e a porcentagem de serragem inserida no compósito, o tipo de cimento, a época de corte e a idade das árvores, entre outros (BERALDO; CARVALHO, 2004). Como a estrutura das células vegetais é caracterizada pela presença de

espaços vazios, onde são armazenados os extrativos, os tratamentos de impregnação inibem a liberação desses extrativos devido à obstrução desses espaços. Com o intuito de envolver as partículas vegetais, Batista (2001/2002) realizou a mineralização das mesmas com metassilicato de sódio e sulfato de alumínio. Beraldo et al. (2012), por outro lado, salientam que também é possível minimizar ou até mesmo evitar efeitos da incompatibilidade química existente entre a madeira e o cimento por meio de tratamentos físico-químicos aplicados sobre as partículas vegetais, destacando que a utilização de impermeabilizantes, como o neutrol, pode criar uma camada impermeável impedindo que a água solubilize os extrativos da madeira, os quais são nocivos à hidratação do cimento.

Recentemente, começou a chamar a atenção o uso de uma técnica de recobrimento de partículas, também conhecida como *core-shell*. Materiais híbridos com esse tipo de estrutura são usualmente compostos por núcleos recobertos por nanopartículas, que resultam em estruturas com propriedades elétricas, magnéticas, ópticas ou mecânicas diferentes daquelas encontradas nas matérias-primas originais (LIBOR et al., 2009). Nesse sentido, há de se considerar as propriedades do composto químico ortosilicato de tetraetil (TEOS), sob a fórmula molecular  $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ , que, como apresenta silício em sua composição, poderia servir como um precursor de sílica molecular, atuando no recobrimento de partículas de madeira, em busca da formação de barreiras de difusão para controlar a modificação das propriedades físicas da matriz e nas propriedades químicas da superfície das partículas (SILVA et al., 2011).

Esse trabalho foi idealizado com o intuito de investigar a compatibilidade entre o cimento e a madeira através do estudo da influência de diferentes tratamentos aplicados em serragem nas propriedades físicas de compósitos cimento-

madeira do tipo argamassa, em que uma determinada porcentagem de agregado miúdo foi substituída por serragem de *Pinus elliotii* submetida a diferentes tratamentos superficiais.

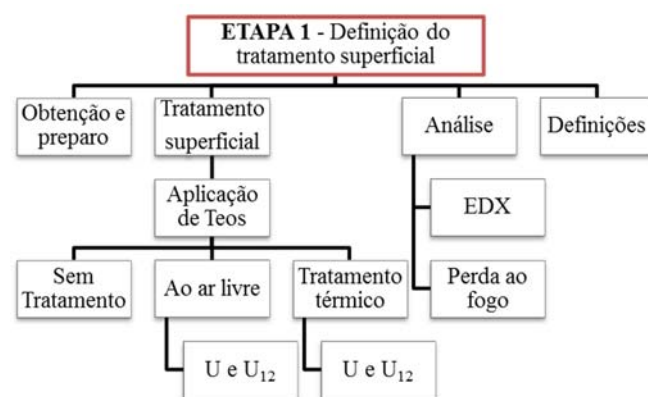
## Material e Métodos

O programa experimental foi dividido em três etapas. Na primeira etapa, foram realizados ensaios preliminares para determinação do tratamento superficial a ser utilizado na serragem. Após esta etapa, foi realizada a caracterização dos materiais e, em seguida, a moldagem dos compósitos e realização dos ensaios físicos.

A serragem utilizada na pesquisa foi obtida junto à serraria Madecom, localizada no município de Pelotas-RS. A serraria realiza o desdobro primário de toras de *Eucalyptus* e principalmente *Pinus*, e apresenta, assim como muitas serrarias do mesmo porte, um elevado índice de resíduos provenientes de seus equipamentos.

### Etapa 1 – Ensaios preliminares para determinação do tratamento superficial a ser utilizado na serragem

A primeira etapa do programa experimental pode ser visualizada na Figura 1.



**Figura 1.** Etapa 1 do programa experimental.  
**Figure 1.** Stage 1 of experimental program.

As partículas de serragem receberam tratamento superficial com ortosilicato de tetraetila - TEOS, de fórmula  $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ , aplicado nas partículas de duas formas: ao ar livre ( $U$  e  $U_{12}$ ) e por meio de tratamento térmico ( $U$  e  $U_{12}$ ). Para a definição do tipo de tratamento superficial a ser utilizado nas partículas de serragem foram consideradas questões como: a impregnação de silício nos tratamentos analisados, a condição da serragem, úmida ou com 12% de umidade, os percentuais de redução de massa, o custo e tempo de preparação.

Para o tratamento superficial da serragem ao ar livre, primeiramente foi feita uma mistura de 30mL de TEOS com 90mL de álcool etílico absoluto em um becker de 250mL. Foram imersos nesta mistura 15g de serragem, por 10 minutos, e, em seguida, a serragem foi reservada em um recipiente a parte, por 30 minutos. Este procedimento foi realizado duas vezes. As 15 g de serragem foram imersas em uma solução contendo apenas 30mL de TEOS por 10 minutos. Finalmente, a serragem foi mantida ao ar livre até a sua secagem.

Para o tratamento superficial térmico da serragem, primeiramente foram adicionados 30mL de TEOS e 90mL de álcool etílico absoluto em um becker de 500mL. Posteriormente, 15 g de serragem foram adicionados à mistura. Em uma chapa de aquecimento a 100°C com agitação, foi colocado o becker com a mistura, até a evaporação total dos líquidos. Em seguida, foram inseridos 30mL de TEOS no becker; o mesmo foi mantido na chapa aquecedora até a evaporação do líquido. A serragem foi então transferida para uma estufa a 50°C até a sua secagem.

As amostras foram submetidas ao ensaio de EDX (Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raio-X), para análise da absorção de Si, e ao ensaio de perda ao fogo, com taxa de aquecimento de 15°C por minuto, até atingir uma temperatura de 300°C, por 1h.

Os resultados obtidos foram analisados através da análise de variância (ANOVA) com 5% de significância, pelo teste de Tukey, considerando os percentuais de Si presentes nas partículas e os percentuais de perda de massa das amostras.

### Etapa 2 - Caracterização dos materiais

A Figura 2 descreve a segunda etapa do programa experimental.

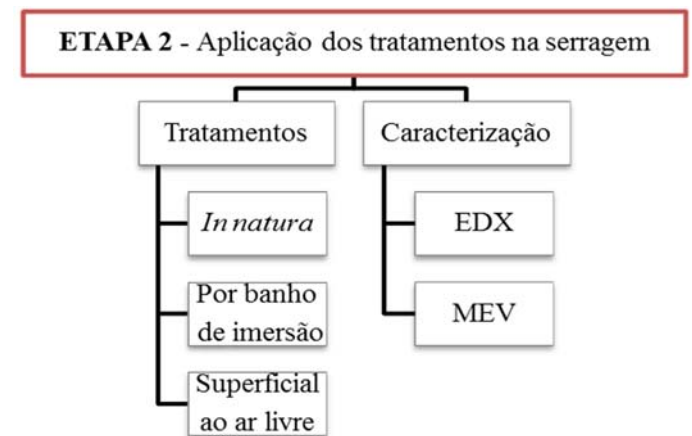


Figura 2. Etapa 2 do programa experimental.

Figure 2. Stage 2 of experimental program.

Os elementos químicos presentes na serragem e na areia podem ser visualizados na Tabela 1. O cimento utilizado foi o CP IV-32, cujas especificações atendem a NBR 5736 (ABNT, 1999).

### Etapa 3 – Moldagem dos compósitos e realização dos ensaios físicos

A terceira etapa do programa experimental está detalhada na Figura 3. Na Tabela 2 encontram-se os quantitativos utilizados nas substituições de areia por serragem. A moldagem dos corpos de prova seguiu as especificações da NBR 7215 (ABNT, 1996): traço 1:3 (cimento: e areia normalizada), em massa, com relação água/cimento de 0,48. Para cada compósito foi determinado o tempo de pega, segundo as prescrições estabelecidas na NBR NM 65 (ABNT, 2003). Foram utilizados moldes cilíndricos de 50 mm de

diâmetro e 100 mm de altura e determinado o índice de consistência normal, conforme NBR 7215 (ABNT, 1996).

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

**Table 1.** Chemical elements of sand and sawdust.

Elemento (%)	Areia	Serragem		
		In natura	Banho de imersão	Tratamento superficial
	91,8			
Si	1	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

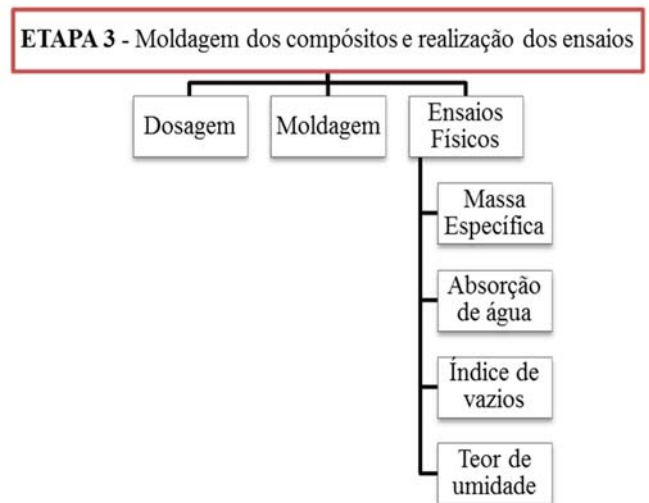
A quantidade de água para o preparo das argamassas foi mantida para todos os compósitos. Com isso, aqueles com 10% de serragem apresentaram uma melhor trabalhabilidade, em relação aos compósitos com 20% de serragem (Tabela 3). Após a moldagem, foram mantidas placas de vidro quadradas (70 x 70 mm) por 24 h sobre os corpos de prova, conforme a

**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

Figura 4, durante a cura inicial. Decorridas 24 h da moldagem, foi realizada a desforma. Os mesmos foram mantidos submersos em um tanque de cura saturado de cal, conforme NBR 9479 (ABNT, 1984), até atingirem a idade requerida para os ensaios. Após o período de cura, dois corpos de prova de cada tipo de compósito foram ensaiados fisicamente (Tabela 4), conforme a NBR 9778 (ABNT, 2009).



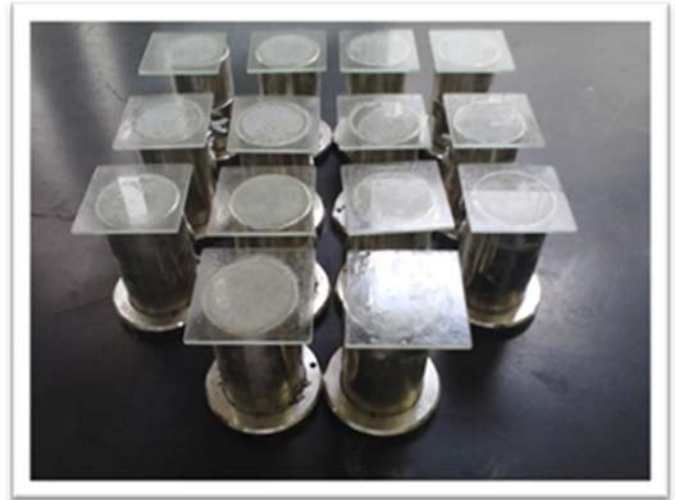
**Figura 3.** Etapa 3 do programa experimental.

**Figure 3.** Stage 3 of experimental program.

**Tabela 3.** Abatimento determinado na mesa de consistência.  
**Table 3.** Slump obtained by flow table method.

	Abatimento (cm)			F	P
	A	B	Médio		
CR	17,50	16,70	17,10 <sup>a</sup>		
C10N	15,70	15,70	15,70 <sup>b</sup>		
C20N	13,60	13,90	13,75 <sup>c</sup>		
C10B	15,50	15,40	15,45 <sup>b</sup>	42,29	<0,01
C20B	13,70	13,90	13,80 <sup>c</sup>		
C10T	14,50	15,00	14,75 <sup>b</sup>		
C20T	13,90	13,90	13,90 <sup>c</sup>		

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; Em um mesmo tratamento, médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente em nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste de Turkey.



**Figura 4.** Cura inicial dos corpos de prova.  
**Figure 4.** Initial cure process of specimens.

**Tabela 4.** Relação de ensaios físicos.  
**Table 4.** List of physical tests.

Propriedade	Fórmula para Cálculo NBR 9778 (ABNT, 2009)
Massa Específica seca ( $\rho_s$ )	$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i}$ Em que: $\rho_s$ = Massa específica seca, g/cm <sup>3</sup> ; $m_s$ = Massa específica do corpo de prova na condição seca, g; $m_{sat}$ = Massa específica do corpo de prova saturada em água após imersão e fervura, g; $m_i$ = Massa específica do corpo de prova saturada imersa em água, g.
Massa Específica saturada ( $\rho_{sat}$ ) -	$\rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i}$ Em que: $\rho_{sat}$ = Massa específica saturada, g/cm <sup>3</sup> ; $m_{sat}$ = Massa específica do corpo de prova saturada em água após imersão e fervura, g; $m_i$ = Massa específica do corpo de prova saturada imersa em água, g.
Massa Específica Real ( $\rho_r$ )	$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i}$ Em que: $\rho_r$ = Massa específica real, em g/cm <sup>3</sup> ; $m_s$ = Massa específica do corpo de prova na condição seca, g; $m_i$ = Massa específica do corpo de prova saturada imersa em água, g.
Massa específica aparente ( $\rho_{ap}$ )	$\rho_{ap} = \frac{m_s}{V}$ Em que: $\rho_{ap}$ = Massa específica aparente, g/cm <sup>3</sup> ; $m_s$ = Massa seca, g; $V$ = Volume, cm <sup>3</sup> .
Absorção de água por imersão (A)	$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100$ Em que: A = Absorção de água por imersão, %; $m_s$ = Massa específica do corpo de prova na condição seca, g; $m_{sat}$ = Massa específica do corpo de prova saturada em água após imersão e fervura, g.
Índice de vazios ( $I_v$ )	$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100$ Em que: $I_v$ = Índice de vazios, %; $m_s$ = Massa específica do corpo de prova na condição seca, g; $m_{sat}$ = Massa específica do corpo de prova saturada em água após imersão e fervura, g; $m_i$ = Massa específica do corpo de prova saturada imersa em água, g.
Teor de umidade ( $T_u$ )	$T_u = \frac{m_u - m_s}{m_s} \times 100$ Em que: $T_u$ = Teor de umidade, %; $m_u$ = Massa úmida, g; $m_s$ = Massa seca, g.

## Resultados e Discussão

### Dados preliminares usados para determinação do tratamento superficial

Os dados da Tabela 5 mostram que independentemente da granulometria utilizada (material retido na peneira 4,8

mm para as amostras 0, 1, 6, 11, e 16; material retido na peneira 2,36 mm para as amostras 2, 7, 12 e 17; material retido na peneira 1,18mm para as amostras 3, 8, 13 e 18; material retido na peneira 600  $\mu$ m para amostras 4, 9, 14 e 19 e material retido na peneira 300 $\mu$ m para amostras 5, 10, 15 e 20) os tratamentos superficiais realizados com o objetivo de equiparar

o percentual de Si da serragem com teos com o da areia (91,81%, conforme Tabela 1) apresentam resultados satisfatórios.

A Tabela 6 mostra o teste de médias, realizado entre os resultados obtidos em cada tratamento, para impregnação de Si e perda ao fogo, independentemente da granulometria utilizada.

A análise dos dados das Tabelas 5 e 6 indica que, após receberem tratamento superficial com TEOS, todas as granulometrias apresentaram percentuais de Si compatíveis com o da areia, dispensando a necessidade de peneiramento para seleção de granulometria mais adequada. Não houve diferença estatística quanto à aplicação de TEOS ao ar livre ou por tratamento térmico e a serragem com 12% de umidade apresentou menor redução de massa quando comparada à serragem úmida, para ambos os tratamentos.

**Tabela 5.** Percentual de elementos químicos nas amostras analisadas nos ensaios preliminares.

**Table 5.** Percentage of chemical elements in the specimens analyzed in preliminary tests.

Amostra		Elementos químicos presentes nas amostras (%)											
		Si	Ca	K	Al	S	Mn	Fe	Zn	Cu	Co	P	
Sem tratamento	0	0,00	61,87	20,57	0,00	4,32	7,43	3,20	0,00	0,00	0,00	2,60	
	U	1	88,99	4,49	3,16	0,72	1,58	0,40	0,49	0,00	0,17	0,00	0,00
		2	90,98	4,25	2,82	0,59	1,29	0,37	0,36	0,00	0,13	0,00	0,00
		3	88,62	4,76	2,96	1,10	1,34	0,42	0,60	0,00	0,22	0,00	0,00
		4	89,24	4,16	3,62	0,00	1,76	0,55	0,41	0,00	0,26	0,00	0,00
		5	89,41	4,42	2,89	0,71	1,43	0,40	0,62	0,14	0,00	0,00	0,00
	U <sub>12</sub>	6	82,69	9,42	5,98	0,00	0,00	0,85	0,74	0,00	0,32	0,00	0,00
		7	72,41	16,31	6,52	0,00	2,15	1,01	1,38	0,00	0,00	0,23	0,00
		8	92,49	2,89	3,51	0,00	0,00	0,59	0,53	0,00	0,00	0,00	0,00
		9	93,33	2,67	2,93	0,00	0,00	0,36	0,50	0,00	0,21	0,00	0,00
10		92,47	3,82	2,79	0,00	0,00	0,43	0,49	0,00	0,00	0,00	0,00	
Por tratamento térmico	11	91,49	3,43	2,46	1,13	0,88	0,33	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	
	U	12	91,83	3,19	2,02	1,55	0,90	0,30	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00
		13	91,14	4,31	2,81	1,12	0,35	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		14	91,18	2,99	2,20	1,51	1,02	0,38	0,72	0,00	0,00	0,00	0,00
		15	94,16	2,45	1,82	0,00	0,80	0,27	0,31	0,10	0,10	0,00	0,00
		16	90,05	4,70	2,98	0,00	1,21	0,55	0,52	0,00	0,00	0,00	0,00
	U <sub>12</sub>	17	91,66	3,60	2,07	0,58	1,25	0,39	0,29	0,00	0,16	0,00	0,00
		18	88,47	5,10	3,13	0,81	1,48	0,46	0,36	0,00	0,20	0,00	0,00
		19	93,05	3,09	2,13	0,00	0,82	0,33	0,43	0,00	0,16	0,00	0,00
		20	91,94	4,02	2,27	0,00	0,85	0,43	0,39	0,10	0,00	0,00	0,00

Em que: U= Serragem úmida; U<sub>12</sub>= Serragem com 12% de umidade; Si= Silício; Ca= Cálcio; K= Potássio; Al= Alumínio; S= Enxofre; Mn=Manganês; Fe= Ferro; Zn= Zinco; Cu= Cobre; Co= Cobalto; P= Fósforo.

**Tabela 6.** ANOVA para dados de impregnação de Si e redução em massa após a queima.

**Table 6.** ANOVA for Si impregnation and loss on ignition data.

Tratamento Superficial		Silício (%)	Redução de massa após queima (%)
Sem tratamento	U	0,00 <sup>a</sup>	70,37 <sup>a</sup>
	U <sub>12</sub>	89,44 <sup>b</sup>	55,81 <sup>b</sup>
Ao ar livre	U	86,68 <sup>b</sup>	42,02 <sup>c</sup>
	U <sub>12</sub>	91,96 <sup>b</sup>	66,96 <sup>a</sup>
Por tratamento térmico	U <sub>12</sub>	91,03 <sup>b</sup>	45,02 <sup>c</sup>

Em que: U= Serragem úmida; U<sub>12</sub>= Serragem com 12% de umidade; Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente em nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste de Turkey.

Há de se considerar, entretanto, que a perda de massa das serragem ocorre em duas fases, sendo que na primeira ocorre a decomposição dos materiais voláteis dispersos nas fi-

bras, incluindo principalmente a água, e na segunda ocorre a degradação térmica da celulose, hemicelulose e lignina (HILLIG et al. 2008). Por outro lado, a característica higroscópica da madeira permite a absorção de água a níveis bastante elevados, podendo chegar a 260% de seu peso em 30 minutos, limitando assim a quantidade de água disponível para hidratar o cimento (KASIM; ZEYNAL, 2014). Portanto, considerando que a perda de massa superior na amostra úmida tenha ocorrido devido a presença de água, que é benéfica para a hidratação do cimento, não se pode afirmar que a serragem a 12% de umidade apresente melhor desempenho que a serragem úmida.

Com base nessas observações e, considerando questões como tempo de execução e custo, optou-se por aplicar o tratamento superficial ao ar livre com serragem úmida, na granulometria natural (passante na peneira 4,80mm). Este procedimento apresenta resultados adequados quanto ao percentual de Si e perda de massa, não demanda gasto energético para estabilização da madeira a 12% e aquecimento durante a aplicação do tratamento e não requer a utilização de equipamentos e recursos complexos.

### **Massa específica seca, saturada, real e aparente**

A Tabela 7 mostra os dados da massa específica seca, saturada, real e aparente, aos 28 dias para os compósitos estudados.

Os valores de massa específica seca e aparente para os compósitos com 10% de serragem são inferiores ao CR, embora o compósito C10T não tenha se mostrado diferente, estatisticamente, do compósito CR. Em relação aos compósitos com 20% de serragem, os valores foram em média 5,59% inferiores ao CR, com relação à massa específica seca e 5,13% quanto à massa específica saturada.

**Tabela 7.** Resumo estatístico da massa específica seca, saturada, real e aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), aos 28 dias.

**Table 7.** Statistical summary of specific gravity data ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), at 28 days.

	$\rho_s$	$\rho_{\text{sat}}$	$\rho_r$	$\rho_{\text{ap}}$
CR	1,79 <sup>a</sup>	1,95 <sup>a</sup>	2,13 <sup>a</sup>	2,25 <sup>a</sup>
C10N	1,71 <sup>a,b</sup>	1,88 <sup>a,b</sup>	2,07 <sup>a,b</sup>	2,15 <sup>b,c</sup>
C20N	1,68 <sup>b</sup>	1,84 <sup>b</sup>	2,01 <sup>b</sup>	2,13 <sup>b</sup>
C10B	1,72 <sup>a,b</sup>	1,88 <sup>a,b</sup>	2,05 <sup>a,b</sup>	2,17 <sup>c</sup>
C20B	1,69 <sup>b</sup>	1,85 <sup>b</sup>	2,02 <sup>b</sup>	2,12 <sup>b</sup>
C10T	1,74 <sup>a</sup>	1,91 <sup>a</sup>	2,09 <sup>a,b</sup>	2,14 <sup>b,c</sup>
C20T	1,70 <sup>b</sup>	1,87 <sup>a,b</sup>	2,05 <sup>a,b</sup>	2,13 <sup>b</sup>
F	2,09	6,50	2,59	21,86
P	< 0,18	< 0,01	< 0,12	< 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). Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente em nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste de Turkey.

Houve uma redução na massa específica real de 2,90% e 4,41%, respectivamente, e uma redução na massa específica aparente de 4,65% e 5,63%, respectivamente, para os valores médios obtidos nos compósitos com 10% e 20% de serragem, em relação ao CR. Em geral observa-se que quanto maior o percentual de substituição de areia por serragem, menor é a massa específica aparente deste tipo de compósito (LIMA; IWAKIRI, 2013; GARCEZ et al., 2013).

De um modo geral, observa-se, que os valores das massas específicas foram levemente superiores para os compósitos referência, seguidos pelos compósitos com 10% de serragem e pelos compósitos com 20% de serragem, respectivamente. Observa-se que os compósitos que receberam serragem de *Pinus elliottii* com tratamento superficial ao ar livre com TEOS, apresentaram menor redução nas massas específicas, com relação aos outros tratamentos.

A importância de se estudar as propriedades físicas dos compósitos cimento-madeira, em especial as massas específicas, remete ao fato de que reduções na massa



específica, conforme a elevação do percentual de substituição da areia por serragem, ocasionam redução no limite de resistência (GARCEZ et al., 2013; JORGE et al., 2004). Maiores massas específicas resultam valores superiores de módulo de elasticidade e ruptura em flexão estática em painéis com partículas de *Pinus* spp. (IWAKIRI et al., 2008). Por outro lado, a diminuição da massa específica, por resultar em peças mais leves, poderia ser uma vantagem em relação a transporte manuseio e montagem.

### Índice de vazios, absorção de água e teor de umidade

O índice de vazios, absorção de água e teor de umidade dos compósitos com substituição parcial de areia por serragem podem ser visualizados na Tabela 8. A avaliação destes parâmetros é importante porque eles influenciam na estabilidade dimensional dos compósitos, requisito fundamental para sua aplicação prática.

Quanto à absorção de água e ao índice de vazios, que expressa a porosidade do material, não houve diferença estatística entre os compósitos, independentemente da quantidade de serragem inserida e do tipo de tratamento realizado na serragem.

Lima;Iwakiri (2014) observaram que a substituição de agregado miúdo por serragem em percentuais superiores a 20% aumenta a porosidade e a absorção de água dos compósitos, sendo estes valores superiores quando é utilizada serragem sem tratamento, *in natura*. Tessaro et al. (2015) observaram em seus estudos que compósitos fabricados com fibras de eucalipto tratadas com TEOS 98% apresentaram menores valores de absorção de água e porosidade aparente quando comparados com o compósito de referência.

Há diferença estatística no teor de umidade aos 28 dias conforme o percentual substituição de serragem, o que pode ser explicado, conforme Garcez et al. (2013), pelo fato de que

a madeira é um material higroscópico, capaz de absorver ou perder água para o meio ambiente, devido a sua constituição química. Dessa forma, quanto maior o percentual de serragem, maior o teor de umidade do compósito. Com relação aos tratamentos prévios, os compósitos com serragem *in natura*, com tratamento por banho de imersão ou com tratamento superficial ao ar livre com TEOS não mostraram diferença estatística no teor de umidade aos 28 dias, embora estes valores sejam superiores ao do compósito de referência.

**Tabela 8.** Resumo estatístico: índice de vazios, absorção de água e teor de umidade.

**Table 8.** Statistical resume: void ratio, water absorption and moisture content.

	I <sub>v</sub> (%)	A (%)	T <sub>u</sub> (%)
CR	15,85 <sup>a</sup>	8,89 <sup>a</sup>	9,71 <sup>a</sup>
C10N	17,32 <sup>a</sup>	10,15 <sup>a</sup>	10,81 <sup>b</sup>
C20N	16,68 <sup>a</sup>	10,02 <sup>a</sup>	12,17 <sup>c</sup>
C10B	16,29 <sup>a</sup>	9,50 <sup>a</sup>	11,29 <sup>b</sup>
C20B	16,74 <sup>a</sup>	9,95 <sup>a</sup>	12,04 <sup>c</sup>
C10T	16,67 <sup>a</sup>	9,57 <sup>a</sup>	10,84 <sup>b</sup>
C20T	17,43 <sup>a</sup>	10,28 <sup>a</sup>	12,04 <sup>c</sup>
F	0,10	0,18	25,30
P	< 0,99	< 0,97	< 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). Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente em nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste de Turkey.

## Conclusões

As massas específicas dos compósitos diminuíram com o aumento do percentual de serragem inserido, porém os tratamentos utilizados na serragem não resultaram alterações nos valores das massas específicas.

O índice de vazios e absorção de água dos compósitos não foram alterados pelos tratamentos e tampouco pelos percentuais de serragem utilizados.

Quanto maior o percentual de serragem inserido no compósito, maior o teor de umidade medido, independentemente do tipo de tratamento aplicado na serragem.

Uma indicação de uso de compósitos cimentícios com inserção de serragem seria para a fabricação de artefatos de cimento, blocos para alvenaria ou até mesmo a confecção de placas para montagem de tapumes de obra, que necessariamente não precisam ser executados com compósitos de resistência elevada e se beneficiam da reduzida massa específica, principalmente quanto ao transporte, manuseio e montagem das peças.

A utilização de serragem de *Pinus elliottii in natura* como substituição parcial do agregado miúdo para a produção de compósitos cimentícios do tipo argamassa é viável do ponto de vista das propriedades físicas, não sendo necessário nenhum tipo de tratamento prévio para os teores de substituição estudados.

## Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5736**: Cimento Portland Pozolânico. Rio de Janeiro: ABNT, 1999. 5p.
- 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 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 9778**: Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 4p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 65**: Cimento Portland – Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 4p.
- BALLONI, C.J.V.; BARREIROS, R.M. Caracterização física e química da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. In: XII ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2010, Lavras. **Anais...** Lavras: 2010.
- BATISTA, A.M. A influência do tratamento em compósitos de cimento-madeira. **Projeções**, v.19/20, p.1-3, 2001/2002.
- BERALDO, A.L.; CARVALHO J.V. Compósito *Eucalyptus grandis* – cimento Portland. **Scientia Forestalis**, n. 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. **Anais...** São Paulo, 2012.
- BYE, G. C. **Portland Cement: Composition, Production and Properties**. Londres: Thomas Telford, 1999. 225p.
- GARCEZ, M. R.; SANTOS, T.; GATTO, D. A. avaliação das propriedades físicas e mecânicas de concretos pré-moldados com adição de serragem em substituição ao agregado miúdo. **Ciência & Engenharia**, v. 22, p. 95-104, 2013.
- HILLIGI, E., IWAKIRI, S., ANDRADE, M. Z., ZATTERA, A.J. Caracterização de compósitos produzidos com polietileno de alta densidade (HDPE) e serragem da indústria moveleira. **Árvore**, v. 32, n. 2, 2008.
- IWAKIRI, S., STINGHEN, A. B. M., SILVEIRA, E. L., ZAMARIAN, E. H. C., PRATA, J. G., BRONOSKI, M. Influência da massa específica sobre as propriedades mecânicas de painéis aglomerados. **Floresta**, v. 38, n. 3, 2008.
- JORGE, F. C.; PEREIRA, C.; FERREIRA, J. M. F. Wood-cement composites: a review. **Holz Roh Werkst**, v.62, p. 370-377, 2004.
- KASIM, M. M., ZEYNAL, E. K. Mechanical properties of wood shavings-cement lightweight composites. **Al-Rafidain Engineering**, v. 23, n. 2, 2015.
- KIHARA, Y.; CENTURIONE, S. L. **O cimento Portland. In: CONCRETO: Ensino, pesquisa e realizações – volume 1**. São Paulo: IBRACON, 2005, p. 295-322.
- 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.

LIMA, J. M.; IWAKIRI, S. Utilização de resíduos da madeira de *Pinus* spp. como substituição ao agregado miúdo na produção de blocos de concreto para alvenaria estrutural. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 1, p. 223-235, 2014.

SILVA, I. C.; CAMPOS, C. I.; BERTOLINI, M. S.; QUINTANA, N. M. G. Análise do tratamento do resíduo de *Pinus* sp. para produção do compósito cimento-madeira. In: XXI CONGRESSO DE ICICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNESP, 2009, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2009.

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.

ZZIWA, A.; KIZITO, S.; BANANA, A. Y.; KABOGGOZA, J. R. S.; KAMBUGO, R. K.; SSEREMBA, O. E. Production of composite bricks from sawdust using Portland cement as a binder. **Uganda Journal of Agricultural Sciences**, v.12, n.1, p.38-44, 2006.