

## Durabilidade a campo da madeira de três espécies de *Eucalyptus* tratadas por imersão simples

Bruno D. Mattos<sup>1</sup>, Darci A. Gatto<sup>1</sup>, Pedro H. Gonzalez de Cademartori<sup>2</sup>,  
Diego M. Stangerlin<sup>3</sup> & Rafael Beltrame<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Pelotas, Centro de Engenharias, Engenharia Industrial Madeireira, Conde de Porto Alegre, 793, Centro, CEP 96010-290, Pelotas-RS, Brasil. E-mail: brunodufamattos@yahoo.com.br; darcigatto@yahoo.com; browbeltrame@yahoo.com.br

<sup>2</sup> Centro de Ciências Florestais e da Madeira (PPGEF), Universidade Federal do Paraná, Av. Pref. Lothário Meissner, 900, Jardim Botânico, CEP 80210-170, Curitiba-PR, Brasil. E-mail: pedrocademartori@gmail.com

<sup>3</sup> Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais, Av. Alexandre Ferronato, 1200, Setor Industrial, CEP 78550-000, Sinop-MT, Brasil. E-mail: diego\_stangerlin@yahoo.com.br

### RESUMO

O presente estudo objetivou avaliar a durabilidade das madeiras de *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus tereticornis* tratadas pelo método de imersão simples, quando expostas em campo aberto e floresta plantada. Para os tratamentos da madeira foram utilizados borato de cobre cromatado (CCB) e o óleo queimado, além de corpos de prova sem tratamento para comparação de resultados. Os corpos de prova foram expostos durante um ano com coletas a cada 45 dias. Para a caracterização do material fez-se uso de análises de perda de massa, perda de velocidade ultrassônica, variação de massa específica, teor de umidade de equilíbrio e módulo de elasticidade dinâmico. De acordo com os resultados verificou-se que a madeira de *Eucalyptus saligna* é a mais susceptível a deterioração e para esta mesma madeira o tratamento com CCB e óleo queimado foi mais eficiente; por outro lado, para as madeiras de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus tereticornis* os tratamentos se mostraram poucos efetivos. Foi observada correlação positiva e forte entre as variáveis de perda de massa e perda de velocidade ultrassônica.

**Palavras-chave:** CCB, óleo queimado, preservação da madeira, tratamento químico

### *Durability to field from three eucalypts wood treated by short-term soak*

### ABSTRACT

This study aimed to evaluate the decay resistance of *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus saligna* and *Eucalyptus tereticornis* wood treated through short-term soak and exposed to outdoor and forest canopy. Wood were treated with copper chrome borate (CCB) and used motor oil, beyond untreated samples were the control treatment. The wood samples were exposed for 1 year and collected every 45 days. The characterization of wood samples were carried out through weight loss, loss of ultrasonic velocity, specific gravity, equilibrium moisture content and dynamic modulus of elasticity tests. The main results showed that *Eucalyptus saligna* is the most susceptible wood to fungal decay. Moreover, *Eucalyptus saligna* wood presented the best efficiency for both treatments (CCB and used oil motor). On the other hand, treatments with CCB and used oil motor showed low effective for *Corymbia citriodora* and *Eucalyptus tereticornis* wood. A strong and positive correlation between weight loss and loss of ultrasonic velocity was observed.

**Key words:** CCB, used motor oil, wood preservation, chemical treatment

## Introdução

Os produtos à base de madeira são permanentemente expostos a processos de deterioração de origem mecânica, química, ambiental ou biológica, comum à taxa de deterioração do material que depende diretamente do ambiente no qual será exposto.

As madeiras de *Corymbia citriodora* Hill & Johnson, *Eucalyptus saligna* Smith e *Eucalyptus tereticornis* Smith foram introduzidas no Brasil provenientes da Austrália e são reconhecidas em seu país de origem pela alta durabilidade natural. De acordo com a Australian Standard 5604 (2003) são classificadas como Classe 2 e 3 e apresentam expectativa de vida em serviço em torno de 15 a 25 anos em solos australianos; todavia, estudos mostraram que a madeira dessas espécies plantadas e utilizadas no Brasil tende a apresentar vida útil em serviço bem menor (de 3 a 4 anos) do que em seu ambiente nativo (Araújo et al., 2012).

Em ambientes nos quais a madeira é suscetível à ação de organismos xilófagos, sua integridade físico-mecânica tende a diminuir com o tempo de serviço em níveis que dependem de suas propriedades anatômicas e composição química (tipo e teor de extrativos e lignina), dos tratamentos preservativos caseiros (sem pressão) e industriais (com pressão) e das condições de clima (temperatura, umidade relativa e precipitação) e solo (teor de umidade, matéria orgânica e pH). Dentre esses fatores, o tratamento preservativo é o que apresenta maior facilidade de controle para prolongar a vida útil da madeira em serviço (Magalhães et al., 2012).

Desta maneira, biocidas à base de cobre vêm sendo aplicados com sucesso há mais de dois séculos. São aplicados juntamente com cromo para melhorar a fixação e arsênio para aumentar o desempenho contra insetos e fungos tolerantes a cobre (Richardson, 1997). Todavia, devido à toxidez elevada do arsênio, o uso deste biocida sofre severas restrições em países europeus, bem como Estados Unidos, Japão e Indonésia (Humar et al., 2006). Por este motivo, a alternativa mais amplamente utilizada é a substituição do arsênio pelo boro, na qual tem apresentado bons resultados (Humar et al., 2005; Carmona & Durán, 2005).

Além dos biocidas hidrossolúveis supracitados, tem-se o óleo queimado de motores de combustão utilizado por pequenos produtores rurais para preservação de mourões, cercas e estruturas de madeira; a facilidade de aplicação, juntamente com o baixo preço, torna este biocida uma boa alternativa para aplicações sem pressão. Além disto, Ssemaganda et al. (2011) afirmaram que, embora o óleo queimado não seja reconhecido como preservante de madeira, ele pode oferecer boa proteção durante algum tempo se aplicado adequadamente no recobrimento da superfície da madeira.

Tanto para a avaliação de novos biocidas como para a avaliação da aplicação de biocidas já consolidados no mercado por diferentes métodos em diferentes madeiras, diversos autores optam pelos ensaios de campo ao invés dos ensaios de deterioração biológica acelerada (Edwin & Ashraf, 2006; Ali et al., 2011; Melo et al., 2010; Palanti et al., 2011; Magalhães et al., 2012). Conforme Edwin & Ashraf (2006), em muitos casos a escolha por esse tipo de ensaio se deve às

dificuldades de simulação de condições reais de serviço em laboratório e também devido aos custos envolvidos; por outro lado, os mecanismos de intemperismo, tais como lixiviação e fotodegradação, podem ser avaliados em ensaios de campo.

Desta maneira, o presente estudo tem por objetivo avaliar a durabilidade a campo, da madeira de três espécies de eucalipto tratada pelo método de imersão simples.

## Material e Métodos

### Seleção do material

Foram selecionadas, ao acaso, 12 árvores adultas, com aproximadamente 25 anos, de *Eucalyptus tereticornis* Smith, *Eucalyptus saligna* Smith e *Corymbia citriodora* Hill & Johnson, com fuste retilíneo, grã linheira e diâmetro, à altura do peito (DAP - 1,30 m) de aproximadamente 35 cm; de cada árvore foram retiradas as duas primeiras toras com 2,8 m de comprimento.

### Confeção dos corpos de prova

Por meio de sistema de cortes tangenciais, as toras foram desdobradas em tábuas com dimensões nominais de 2,5 x 15 x 280 cm (espessura, largura e comprimento, respectivamente). Das tábuas foram confeccionados os corpos de prova, de acordo com a ASTM D143-94 (American Standard Testing Materials - ASTM, 2000) adaptada, com dimensões nominais de 2,0 x 2,0 x 31,0 cm (espessura, largura e comprimento, respectivamente).

Os corpos de prova confeccionados foram acondicionados em câmara climatizada nas condições de 20 °C de temperatura e 65% de umidade relativa do ar até massa constante (umidade de equilíbrio da madeira em 12%).

### Tratamentos preservativos

Os tratamentos (Tabela 1) foram realizados pelo método sem pressão em um procedimento de imersão simples, no qual os corpos de prova ficaram imersos na substância preservativa por um período de 2 h.

O preservativo químico hidrossolúvel utilizado em um dos processos de tratamento foi o borato de cobre cromatado (CCB), com composição especificada pela NBR 9480 (Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 2009).

No segundo tratamento utilizou-se óleo queimado do tipo mineral com viscosidade SAE-15W, proveniente da combustão de motores. Adicionalmente, avaliaram-se corpos de prova sem tratamento preservativo (testemunhas), a fim de comparar a eficiência dos dois tratamentos supracitados.

**Tabela 1.** Delineamento experimental dos tratamentos

Tratamento		Espécie	Tratamento
Campo	Floresta		
T1	T10	<i>Eucalyptus saligna</i>	CCB
T2	T11		Óleo
T3	T12		Testemunha
T4	T13	<i>Eucalyptus tereticornis</i>	CCB
T5	T14		Óleo
T6	T15		Testemunha
T7	T16	<i>Corymbia citriodora</i>	CCB
T8	T17		Óleo
T9	T18		Testemunha

### Caracterização da área experimental e instalação dos ensaios de deterioração de campo

O experimento foi realizado no município de Morro Redondo, Rio Grande do Sul, latitude S 31°58'18" e longitude W 52°63'55", altitude de 245 m. O clima no local do experimento, segundo a classificação de Köppen, é denominado Cfa, com invernos relativamente frios com geadas ocasionais e, raramente, a ocorrência de neveiros, com verões moderados e precipitações regularmente distribuídas durante o ano. A temperatura média anual é de 16,7 °C e a precipitação média anual é de 1400 mm (Embrapa, 2012).

Foram selecionados dois tipos de ambiente para a instalação dos campos de deterioração, o primeiro em campo aberto, com vegetação dominante de gramíneas rasteiras e o segundo em floresta plantada de Acácia negra (*Acacia mearnsi* De Willd.) com aproximadamente seis anos de idade, num espaçamento de 3 x 2 m. Os corpos de prova foram distribuídos em cada ambiente, na forma de blocos, nos quais se colocaram três corpos de prova, um para cada espécie e tratamento preservativo; para que não houvesse favorecimentos, os blocos foram dispostos nos campos, aleatoriamente.

Os corpos de prova foram enterrados 15 cm abaixo do solo para que a zona de afloramento ficasse localizada na metade do comprimento da peça. O espaçamento adotado entre corpos de prova foi de 10 cm e entre os blocos de 1 m, como é observado na Figura 1.

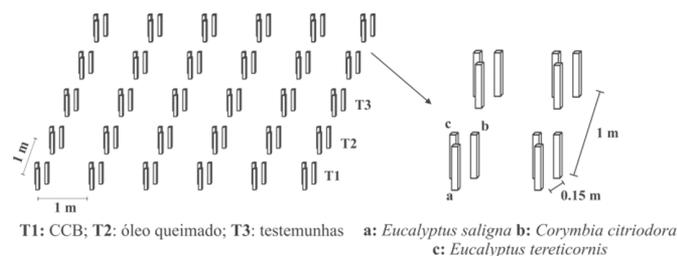


Figura 1. Croqui de instalação dos campos de deterioração

Os corpos de prova foram retirados a cada 45 dias até completar um ano, totalizando 8 coletas (45, 90, 135, 180, 225, 270, 315, 360 dias). Em cada coleta foram retirados quatro corpos de prova (4 blocos) por ambiente de deterioração, tratamento preservativo e espécie; esses foram limpos com escova e encaminhados para a câmara climatizada, em condições descritas anteriormente.

### Determinação da massa específica aparente ( $ME_{ap}$ ) e teor de umidade de equilíbrio ( $TU_{eq}$ )

De acordo com procedimentos da ASTM D143-94 (American Standard Testing Materials - ASTM, 2000) determinaram-se a massa específica aparente ( $ME_{ap}$ ) e o teor de umidade de equilíbrio ( $TU_{eq}$ ), considerando-se o condicionamento em câmara climatizada nas condições supracitadas para os corpos de prova antes da instalação dos ensaios de campo e após a retirada nos ambientes de deterioração.

### Perda de massa

A perda de massa foi calculada (Eq. 1) com base na massa inicial dos corpos de prova, antes da instalação dos ensaios

de campo, e a massa final, após a retirada nos ambientes de deterioração. Em ambas as etapas foi considerada a massa constante em câmara climatizada, nas condições supracitadas.

$$PM(\%) = \frac{(m_i - m_o)}{m_i} \times 100 \quad (1)$$

em que: PM = perda de massa (%),  $m_i$  = massa inicial antes da exposição ao campo (g) e  $m_o$  = massa final (g).

### Avaliação por ultrassom e perda de velocidade de onda

Por meio do equipamento de ultrassom mediu-se, pelo método direto, o tempo de propagação da onda, em microssegundos ( $\mu$ s). Os transdutores utilizados foram do tipo ponto seco com frequência de 54 kHz. Foram realizadas três leituras da velocidade de propagação da onda no sentido longitudinal dos corpos de prova condicionados para 12% de umidade, antes e depois da exposição nos ambientes de deterioração.

A partir da velocidade da onda de ultrassom ( $V$ ) e da massa específica aparente ( $ME_{ap}$ ), foram calculados o módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ) obtida por meio da Eq. 2 e a perda de velocidade da onda de ultrassom pela Eq. 3.

$$E_d = V^2 \times ME_{ap} \quad (2)$$

$$PV(\%) = \frac{(V_i - V_o)}{V_i} \times 100 \quad (3)$$

em que: PV = perda de velocidade da onda de ultrassom (%),  $v_i$  = velocidade inicial antes da exposição ao campo ( $m s^{-1}$ ) e  $V_o$  = velocidade final ( $m s^{-1}$ ).

### Análise dos dados

Para a análise dos resultados empregou-se o delineamento em blocos casualizados com arranjo fatorial, em que se analisaram os fatores espécie (três níveis), tratamento (três níveis) e sítio (dois níveis).

Os fatores tidos como significativos pelo teste F, em caso de rejeição de hipótese nula, foram desdobrados e analisados separadamente pelo teste HSD de Tukey em níveis de 1 e 5% de probabilidade de erro. Para auxiliar na análise dos resultados foi realizada correlação simples de Pearson entre as variáveis perda de massa e perda de velocidade de onda de ultrassom.

Foram ajustados modelos matemáticos por meio de análises de regressão, em que se avaliou o percentual de perda de massa e de velocidade de onda de ultrassom em função do tempo em que as amostras permaneceram nos ensaios de campo. A qualidade de ajuste dos modelos foi avaliada por meio do coeficiente de determinação ( $r^2$ ) e do erro absoluto médio dos resíduos (EAM).

Realizou-se a análise de agrupamento em clusters, pelo método de Ward utilizando-se a distância euclidiana e a padronização dos dados pelo método Z, para os tratamentos em função das variáveis: perda de massa, perda de velocidade de onda ultrassônica, massa específica aparente e teor de umidade de equilíbrio.

## Resultados e Discussão

Os resultados da análise de variância multifatorial (Tabela 2) mostraram que as variáveis dependentes possuem diferença significativa em função da madeira e do tratamento preservativo, com exceção do  $TU_{eq}$ . Quanto ao fator ambiente de deterioração, verifica-se que apenas as variáveis  $E_d$  e  $TU_{eq}$  se mostraram significativas.

**Tabela 2.** Análise de variância multifatorial para os parâmetros avaliados

Variável	Fonte	SQ	GL	QM	F <sub>Calc</sub>
Perda de massa (%)	Espécie	253,48	2	126,74	8,64**
	Sítio	22,51	1	22,51	1,54 <sup>ns</sup>
	Tratamento	1538,38	2	769,19	52,44**
	Resíduos	7392,01	504	14,66	
Perda de velocidade (%)	Espécie	77,08	2	38,54	3,39*
	Sítio	0,11	1	0,11	0,01 <sup>ns</sup>
	Tratamento	1986,35	2	993,17	87,31**
	Resíduos	5732,92	504	11,37	
$ME_{ap}$ (Kgm <sup>-3</sup> )	Espécie	$3,83 \times 10^6$	2	$1,91 \times 10^6$	189,11**
	Sítio	3545,70	1	3545,7	0,35 <sup>ns</sup>
	Tratamento	$1,17 \times 10^6$	2	589828,00	58,22**
	Resíduos	$5,10 \times 10^6$	504	10130,4	
$E_d$ (MPa)	Espécie	$9,95 \times 10^8$	2	$4,97 \times 10^8$	196,21**
	Sítio	$8,01 \times 10^8$	1	$8,01 \times 10^8$	3,16*
	Tratamento	$4,59 \times 10^8$	2	$2,29 \times 10^8$	90,59**
	Resíduos	$1,27 \times 10^9$	504	$2,54 \times 10^6$	
$TU_{eq}$ (%)	Espécie	172,23	2	86,11	87,64**
	Sítio	49,63	1	49,63	50,51**
	Tratamento	3,94	2	1,97	2,01 <sup>ns</sup>
Resíduos	495,23	504	0,98		

Em que: SQ = soma dos quadrados; GL = grau de liberdade; QM = quadrado médio; F<sub>Calc</sub> = Valor F calculado; \*\* significativo em nível de 1% de probabilidade de erro; \* significativo em nível de 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup> = Não significativo.  $ME_{ap}$  = massa específica aparente a 12% de umidade;  $E_d$  = módulo de elasticidade dinâmico  $TU_{eq}$  = teor de umidade de equilíbrio.

Ao contrário do observado por Melo et al. (2010), a madeira exposta em ambiente florestal não apresentou maior perda de massa do que aquelas expostas a campo aberto. Estima-se que o principal motivo reside no porte florestal, ou seja, no tamanho da copa das árvores de *Acacia mearnsi*, o qual não proporcionou a formação de um microclima mais úmido, de modo a desencadear processos de deterioração mais acentuados.

Para o percentual de perda de massa, apresentado na Tabela 3, os tratamentos com CCB e óleo queimado não apresentaram diferença estatisticamente significativa entre si. Porém, as testemunhas referentes aos tratamentos obtiveram maiores valores no percentual de perda de massa para a madeira das três espécies, diferindo estatisticamente.

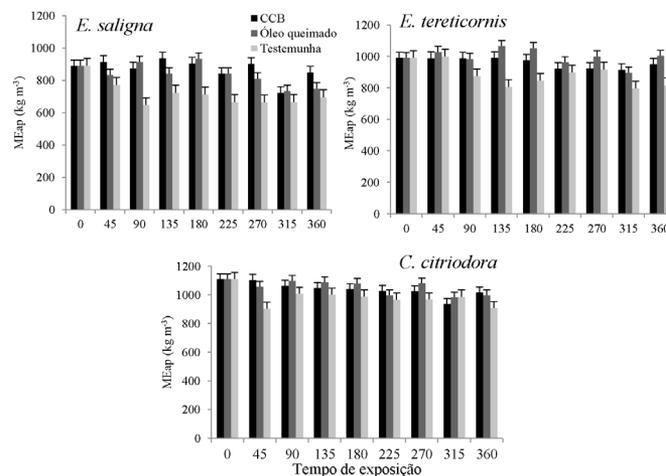
**Tabela 3.** Percentual de perda de massa da madeira entre os tratamentos e espécies florestais

Parâmetro	Tratamento		
	CCB	Óleo	Testemunha
$\mu$	7,10 <sup>A</sup>	7,75 <sup>A</sup>	11,42 <sup>B</sup>
$\zeta$	0,28	0,27	0,33
cv	3,94	3,48	2,88
Madeira			
	<i>E. saligna</i>	<i>C. citriodora</i>	<i>E. tereticornis</i>
$\mu$	9,84 <sup>B</sup>	7,89 <sup>A</sup>	8,53 <sup>A</sup>
$\zeta$	0,29	0,29	0,30
cv	2,94	3,67	3,51

Em que:  $\mu$  = média;  $\zeta$  = desvio padrão; cv = coeficiente de variação (%). Médias seguidas pela mesma letra na linha não possuem diferença estatisticamente significativa entre si, de acordo com o teste de Tukey em nível de 1% de probabilidade de erro.

A madeira de *Eucalyptus saligna* sofreu maior perda de massa em relação às madeiras de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus tereticornis* devido, dentre outros fatores, ao seu baixo teor de extrativos (em média 1,5%) em comparação com as demais (Reis et al., 2003; Oliveira et al., 2005). Além disto, observou-se que a variação da massa específica aparente apresentou o mesmo comportamento da perda de massa.

Na Figura 2 observa-se que as madeiras de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus tereticornis* apresentaram pequena variação da massa específica em função do tempo de exposição em campo; todavia, a madeira de *Eucalyptus saligna* mostrou-se menos resistente às alterações de tal propriedade. Tal fato pode ser associado à diferença da massa específica das espécies, pois, segundo Panshin & De Zeeuw (1980) a massa específica das madeiras pode ser um indicador de resistência à deterioração, tanto em folhosas como em coníferas, em que a madeira com baixa massa específica tende a sofrer mais facilmente processos de deterioração.



**Figura 2.** Variação da massa específica aparente (12%) para as madeiras das três espécies em função do tempo de exposição aos ensaios de campo

De acordo com a Tabela 4, pode-se verificar que todos os modelos foram significativos e apresentaram  $r^2$  entre 74,6 e 95,3%; além disto, os modelos apresentaram baixos erros médios.

Para *Eucalyptus saligna* foram observados os melhores  $r^2$  (de 74 a 95%), enquanto os maiores foram verificados para o ambiente de campo aberto. Melo et al. (2010) observaram, ao estudarem o comportamento das madeiras de cerne e alborno de açoita cavalo, nogueira pecã e plátano, com exposição em sub-bosque de um plantio florestal de *Pinus* spp. e em campo aberto, o mesmo tipo de comportamento e encontraram modelos significativos e com coeficientes de determinação entre 43 e 84%.

Por meio da Tabela 5, pode-se verificar que as madeiras tratadas com os dois tipos de biocida (CCB e óleo) não apresentaram diferença estatisticamente significativa entre si para a perda da velocidade de onda de ultrassom; entretanto, as testemunhas referentes aos tratamentos obtiveram maiores valores no percentual de perda velocidade de onda para as três espécies, diferindo estatisticamente.

Mendes & Alves (1988) afirmaram que fungos apodrecedores deterioram tanto a celulose como as hemiceluloses e lignina,

**Tabela 4.** Modelos matemáticos ajustados para perda de massa das madeiras de eucalipto em função do tempo de exposição aos ensaios de campo

Tratamento	Modelo	r <sup>2</sup>	EMA	Razão F
T1	PM = 1/(0,370474 - 0,0154366*√t)	95,3	0,59	593,27**
T2	PM = 1/[0,680848 - 0,103232*ln(t)]	93,5	0,01	389,05**
T3	PM = 1/(0,138911 - 0,000231297*t)	82,8	0,71	57,94**
T4	PM = e <sup>(0,854062 + 0,00398984*t)</sup>	85,3	0,01	180,95**
T5	PM = 1/(0,377769 - 0,0155361*√t)	88,3	0,32	249,78**
T6	PM = 1/(0,159777 - 0,00026858*t)	80,6	0,11	87,30**
T7	PM = 1/[0,726097 - 0,106129*ln(t)]	86,4	0,62	178,95**
T8	PM = e <sup>(0,860361 + 0,00507023*t)</sup>	88,8	0,35	247,67**
T9	PM = 4,30345 + 0,0313929*t	82,9	8,1E-6	106,89**
T10	PM = 1/[0,647146 - 0,0975088*ln(t)]	90,5	0,43	277,58**
T11	PM = 4,0447 + 0,0000822974*t <sup>2</sup>	90,5	0,20	287,12**
T12	PM = e <sup>(1,98712 + 0,00292852*t)</sup>	74,6	0,10	52,98**
T13	PM = 1,07206 + 0,025746*t	79,2	5,8E-7	114,39**
T14	PM = e <sup>(1,12505 + 0,00390873*t)</sup>	84,6	0,26	164,42**
T15	PM = e <sup>(1,76484 + 0,00278794*t)</sup>	87,0	0,06	154,79**
T16	PM = 1,40121 + 0,0281032*t	84,4	3,3E-6	163,18**
T17	PM = e <sup>(0,993502 + 0,00442323*t)</sup>	92,1	0,44	351,69**
T18	PM = 5,55347 + 0,0261414*t	84,2	6,4E-6	117,85**
Geral	PM = e <sup>(1,20992 + 0,00394518*t)</sup>	65,1	1,45	959,77**

Em que: PM = perda de massa (%); t = tempo em que a madeira permaneceu em campo (dias); \*\* = modelo significativo em nível de 1% de probabilidade de erro (p < 0,01); R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação (%); EMA = erro médio absoluto. Tratamentos = Tabela 1.

**Tabela 5.** Percentual de perda de velocidade de ultrassom entre os tratamentos e espécies florestais

Parâmetro	Tratamento		
	CCB	Óleo	Testemunha
μ	12,69 <sup>A</sup>	12,39 <sup>A</sup>	17,11 <sup>B</sup>
ς	0,24	0,24	0,29
cv	1,89	1,93	1,69

Parâmetro	Espécie		
	<i>E. saligna</i>	<i>C. citriodora</i>	<i>E. tereticornis</i>
μ	13,80 <sup>A</sup>	13,79 <sup>A</sup>	14,60 <sup>B</sup>
ς	0,26	0,25	0,26
cv	1,88	1,81	1,78

Em que: μ = média; ς = desvio padrão; cv = coeficiente de variação (%). Médias seguidas pela mesma letra na linha não possuem diferença estatisticamente significativa entre si, de acordo com o teste HSD de Tukey em nível de 1% de probabilidade de erro.

diminuindo os valores tanto das propriedades mecânicas como da massa específica. Portanto, esta diminuição na velocidade de propagação de ondas nas testemunhas pode ser explicada por esses fatores, como descrito por Carrasco & Azevedo Junior (2003) que, estudando os princípios físicos da propagação de ondas, associaram a velocidade de onda aos teores de celulose nas paredes celulares da madeira.

De acordo com Halabe & Reynold (1998), a velocidade de propagação de ondas de choque, som ou ultrassom, depende diretamente da elasticidade do material. A madeira deteriorada perde a compactação do material celulósico tornando-se menos elástica que a madeira sadia e, desta forma, a velocidade da onda será menor na madeira deteriorada, como verificado neste estudo.

A maior perda de velocidade de propagação de ultrassom é verificada para a madeira não tratada e aumenta conforme o tempo de exposição. Com base nos valores de perda de velocidade de ultrassom, alguns autores indicam que com perdas entre 10 a 30% já exige troca ou manutenção desse material (Shaji et al., 2000; Liñán et al., 2004).

Todos os modelos matemáticos para a estimativa da perda de velocidade de onda das madeiras em função do tempo de exposição aos ensaios de campo (Tabela 6) se mostraram significativos.

**Tabela 6.** Modelos matemáticos ajustados para perda da velocidade de onda de ultrassom das madeiras de eucalipto em função do tempo de exposição aos ensaios de campo

Tratamento	Modelo	r <sup>2</sup>	EMA	Razão F
T1	PV = e <sup>(2,09157 + 0,00198947*t)</sup>	85,2	0,22	167,93**
T2	PV = 1/(0,113197 - 0,000149849*t)	72,8	0,11	74,97**
T3	PV = 9,79646 + 0,0310689*t	90,7	0,01	187,20**
T4	PV = 10,1317 + 0,0000656364*t <sup>2</sup>	80,7	0,06	121,68**
T5	PV = 1/(0,111814 - 0,000151885*t)	86,3	0,22	196,37**
T6	PV = 11,7326 + 0,0286164*t	78,9	4,0E-5	82,72**
T7	PV = 8,42154 + 0,0000749417*t <sup>2</sup>	88,2	0,16	231,78**
T8	PV = 5,17619 + 0,0341726*t	79,9	0,53	123,36**
T9	PV = 1/(0,0715981 - 2,40664E-7*t <sup>2</sup> )	84,3	0,36	107,93**
T10	PV = e <sup>(2,07386 + 0,00205848*t)</sup>	85,9	0,04	178,02**
T11	PV = 7,28313 + 0,0259974*t	84,2	0,04	165,41**
T12	PV = 10,6196 + 0,0292831*t	79,7	0,09	70,85**
T13	PV = (2,84287 + 0,00366173*t) <sup>2</sup>	72,3	0,34	76,05**
T14	PV = 10,0343 + 0,000057312*t <sup>2</sup>	87,8	2,6E-5	224,08**
T15	PV = e <sup>(1,44843 + 0,0269434*ln(t))</sup>	81,3	0,06	96,20**
T16	PV = e <sup>(1,95026 + 0,00239785*t)</sup>	85,6	0,06	179,12**
T17	PV = (2,54331 + 0,00461932*t) <sup>2</sup>	82,0	0,01	137,13**
T18	PV = 1/(0,0700036 - 2,15881E-7*t <sup>2</sup> )	81,4	0,11	101,31**
Geral	PV = (2,91018 + 0,00377638*t) <sup>2</sup>	56,5	2,44	673,10**

Em que: PV = perda de velocidade (%); t = tempo em que a madeira permaneceu em campo (dias); \*\* = modelo significativo em nível de 1% de probabilidade de erro (p < 0,01); R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação (%); EMA = erro médio absoluto. Tratamentos = Tabela 1.

Verificou-se, porém, que os modelos apresentaram baixos erros médios o que, estatisticamente, é satisfatório. O melhor modelo ajustado foi para a testemunha de *Eucalyptus saligna* exposta em campo aberto (T3), em que apresentou r<sup>2</sup> de 90,7% e erro médio absoluto de 0,01.

Com as correlações lineares de Pearson entre a perda de massa e a perda de velocidade de ultrassom para as três espécies nos dois sítios estudados apresentadas na Figura 3, pode-se verificar que os coeficientes de correlação variaram de 0,58 até 0,87 e para todas as combinações do fatorial proposto foi observado o mesmo tipo de comportamento entre as variáveis.

O sinal positivo dos coeficientes de correlação mostra uma relação direta entre a perda de massa e a perda de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas na madeira, ou seja, conforme ocorre aumento na perda de massa da madeira a velocidade de propagação de ondas tende a diminuir.

Os valores encontrados para os coeficientes de correlação indicam uma correlação forte entre essas variáveis; estima-se, assim, que a perda de velocidade de ultrassom esteja diretamente associada à intensidade da deterioração da madeira (Kandemir-Yucel et al., 2007; Bütler et al., 2007), a qual é representada no presente estudo pela perda de massa.

Na Figura 4 são apresentados o comportamento do módulo de elasticidade dinâmico e o teor de umidade de equilíbrio para as três madeiras quanto aos ambientes de deterioração e o tempo de exposição aos ensaios de campo.

Verificou-se, para todos os tratamentos que, a madeira deteriorada apresentou menores valores para Ed e a menor resistência foi observada para as testemunhas atacadas. A madeira atacada das três espécies apresentou Ed significativamente menor que a madeira sadia das mesmas espécies, assim como todas as testemunhas apresentaram baixos valores quando comparadas com as madeiras que receberam produtos preservativos.

Os valores observados nesse estudo para Ed se encontram inferiores aos obtidos por Stangerlin et al. (2008) que

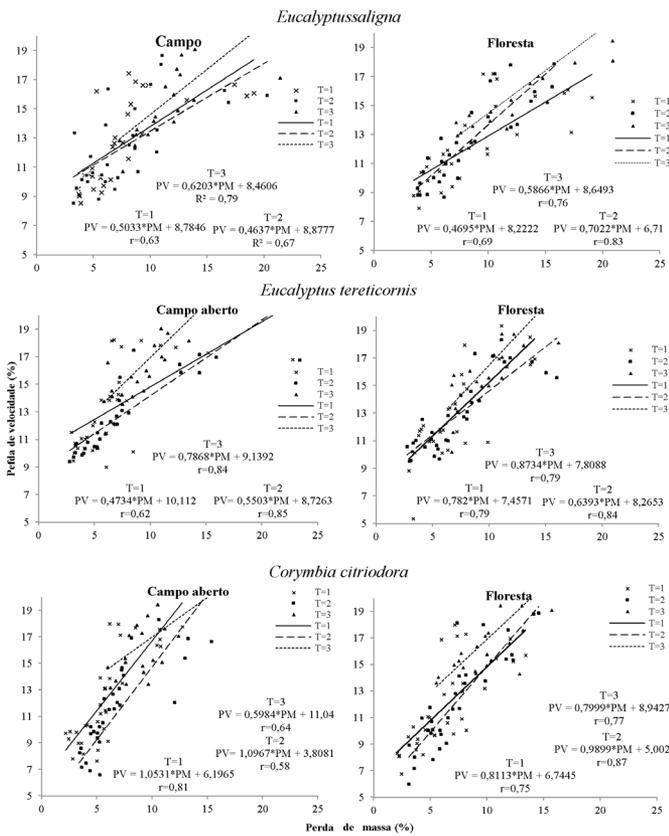


Figura 3. Correlação linear de Pearson entre perda de massa e perda de velocidade de ultrassom (1 = CCB; 2 = óleo e 3 = testemunha)

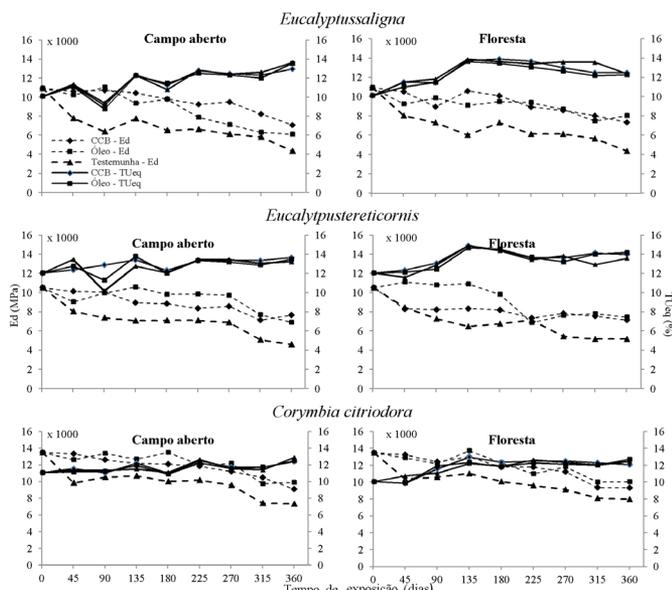


Figura 4. Módulo de elasticidade dinâmico e teor de umidade de equilíbrio para as três espécies em função do tempo de exposição, tratamento e ambiente de deterioração

observaram valores médios de 19.884 MPa para *Eucalyptus grandis* e por Miná et al (2004) que verificaram, ao analisar o módulo de elasticidade dinâmico em postes de *Corymbia citriodora*, valores médios de 21.020 MPa.

Esta disparidade entre estudos pode ser explicada pelas variáveis envolvidas no processo de obtenção do módulo, visto que a massa específica difere entre espécies e mesmo dentro

de árvores da mesma espécie; ainda assim, a obtenção da velocidade de propagação de ondas pode ser afetada pelo tipo de equipamento utilizado e pelas características da madeira (Calegari et al. 2008).

O teor de umidade de equilíbrio apresentou comportamento semelhante ao da perda de massa, em que a maior higroscopicidade está associada ao material com maior período de exposição, ou seja, maior perda de massa. A madeira de *Eucalyptus saligna* apresentou  $TU_{eq}$  maior em relação às outras espécies, corroborando com os valores de perda de massa. As alterações na higroscopicidade ocorreram, possivelmente, devido a deterioração pelos diversos agentes xilófagos o que, segundo Lionetto & Frigione (2012) aumenta a permeabilidade e, assim, a facilidade com que essa madeira absorve água do meio.

No dendrograma apresentado na Figura 5, observa-se o agrupamento dos tratamentos com base no comportamento das variáveis envolvidas na avaliação da preservação por imersão simples de CCB e o óleo queimado para as três madeiras.

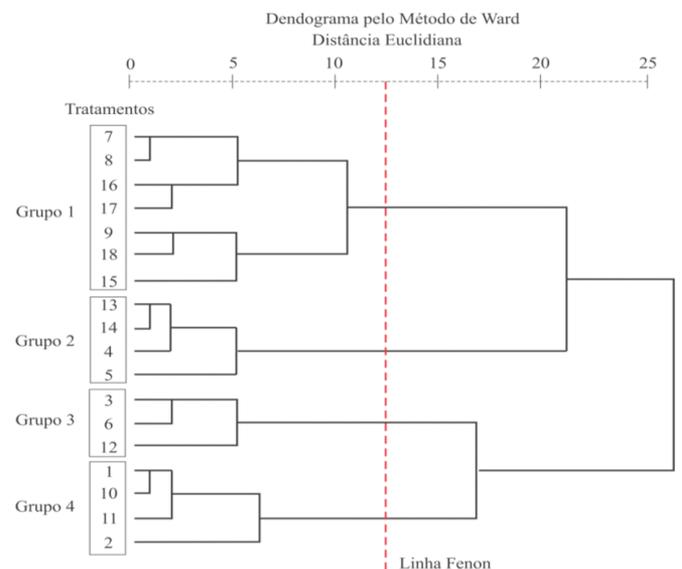


Figura 5. Dendrograma para os tratamentos avaliados

O Grupo 1 (T7, T8, T16, T17, T9, T18 e T15) engloba a madeira de *Corymbia citriodora*, tratada ou não tratada, o que evidencia a alta durabilidade dessa madeira. Observa-se que o tratamento por imersão simples não foi significativo em relação à proteção da madeira dessa espécie quando comparada a do controle; todavia, Araujo et al. (2012) e Magalhães et al. (2012) evidenciaram, em seus estudos, que a utilização de tratamentos com pressão, mesmo em uma madeira de alta durabilidade como *Corymbia citriodora*, aumenta significativamente a resistência à deterioração e ataque de cupins.

O Grupo 2 (T13, T14, T4, e T5) coloca no mesmo patamar o tratamento com ambos os biocidas, para a madeira de *Eucalyptus tereticornis* e o mesmo comportamento é observado para a madeira de *Eucalyptus saligna* (Grupo 4). Assim, é válida a aplicação de óleo queimado como biocida alternativo para tratamentos caseiros de madeira, visto que se observou a mesma efetividade em relação ao CCB para essas duas madeiras; já o Grupo 3 (T3, T6 e T12) é referente

às testemunhas das madeiras de *Eucalyptus tereticornis* e *Eucalyptus saligna*.

## Conclusões

A velocidade de propagação de ondas de ultrassom é a propriedade mais afetada pela deterioração da madeira, sendo também um indicativo de rigidez e compactação do material;

Os tratamentos preservativos por imersão simples com CCB e óleo queimado podem ser desconsiderados para a madeira de *Corymbia citriodora*, por não serem eficientes em aumentar a resistência à deterioração dessa madeira;

Para a madeira de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus tereticornis* a utilização destes métodos preservativos pode ser considerada. Para a madeira dessas duas espécies pode-se optar pela utilização do óleo queimado em substituição ao CCB, visto que apresentou a mesma eficiência, além de ter baixo custo e ser de fácil aquisição.

## Literatura Citada

- Ali, A. C.; Uetimane Júnior, E.; Råberg, U.; Terziev, N. Comparative natural durability of five wood species from Mozambique. *International Biodeterioration & Biodegradation*, v.65, n.6, p.768-776, 2011. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2011.03.010>>.
- American Society for Testing and Materials - ASTM D 143. Standard test methods for small clear specimens of timber. Philadelphia: ASTM, 2000. 31p.
- Araujo, H. J. B. D.; Magalhães, W. L. E.; Oliveira, L. C. D. Durabilidade de madeira de eucalipto citriodora (*Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson) tratada com CCA em ambiente amazônico. *Acta Amazonica*, v.42, n.1, p.49-58, 2012. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672012000100006>>.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 9480. Peças roliças preservadas de eucalipto para construção rurais - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 12p.
- Australian Standard - AS 5604. Timber-natural durability ratings. Homebush, New South Wales: Standards Australia, 2003. 29p.
- Bütler, R.; Patty, L.; Le Bayon, R. C.; Guenat, C.; Schlaepfer, R. Log decay of *Picea abies* in the Swiss Jura Mountains of central Europe. *Forest Ecology and Management*, v. 242, n. 2-3, p. 791-799, 2007. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2007.02.017>>.
- Calegari, L.; Stangerlin, D. M.; Santini, E. J.; Haseilen, C. R.; Gatto, D. A.; Do Carmo, P. I. O.; Silva Filho, L. C. P. Avaliação de alguns fatores influentes na velocidade ultrassônica na madeira. *Floresta*, v.38, n.4, p.607-615, 2008. <<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/floresta/article/view/13156>>. 19 Nov. 2012.
- Carmona, C. R.; Durán, F. A. Eficacia de preservantes en madera de *Pinus radiata* d. Don, frente al ataque de termitas subterráneas (*Reticulitermes Hesperus*). *Maderas. Ciencia y Tecnología*, v.7, n.1, p.27-36, 2005. <<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2005000100004>>.
- Carrasco, E. V. M.; Azevedo Júnior, A. P. Avaliação não-destrutiva de propriedades mecânicas de madeiras através de ultra-som - fundamentos físicos e resultados experimentais. *Cerne*, v.9, n.2, p.178-191, 2003. <<http://www.dcf.ufba.br/cerne/administracao/publicacoes/m193v9n2o5.pdf>>. 05 Nov. 2012.
- Edwin, L.; Ashraf, P. M. Assessment of biodeterioration of rubber wood exposed to field conditions. *International Biodeterioration & Biodegradation*, v.57, n.1, p.31-36, 2006. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2005.10.006>>.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Dados meteorológicos. Laboratório de agrometeorologia. <<http://www.cpact.embrapa.br/agromet>>. 02 Out. 2012.
- Halabe, U. B.; Reynold, F. Detection of flaws in structural members using spectral analysis of ultrasonic signals. *Nondestructive Testing and Evaluation*, v.15, n.3-4, p.215-236, 1998. <<http://dx.doi.org/10.1080/10589759908952873>>.
- Humar, M.; Peek, R. D.; Jermer, J. Regulations in the European Union with emphasis on Germany, Sweden, and Slovenia. In: Townsend, T.G.; Solo-Gabriele, H. (Eds.). *Environmental impacts of treated wood*. Boca Raton: CRC Press, 2006. p.37-59.
- Humar, M.; Šentjurs, M.; Amartej, S. A.; Pohleven, F. Influence of acidification of CCB (Cu/Cr/B) impregnated wood on fungal copper tolerance. *Chemosphere*, v.58, n.6, p.743-749, 2005. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.09.031>>.
- Kandemir-Yucel, A.; Tavukcuoglu, A.; Caner-Saltik, E. N. In situ assessment of structural timber elements of a historic building by infrared thermography and ultrasonic velocity. *Infrared Physics & Technology*, v.49, n.3, p.243-248, 2007. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.infrared.2006.06.012>>.
- Liñán, C. R.; Hita, P. R.; Cózar, J. C. G.; Gálvez, F. P. Diagnóstico mediante técnicas de ultrasonidos del forjado de madera del refectorio del Convento de Santa Clara en Carmona (Sevilla). *Informes de la Construcción*, v.55, n.490, p.17-28, 2004. <[http://www.journaldatabase.org/articles/diagnostico\\_mediante\\_tecnicas.html](http://www.journaldatabase.org/articles/diagnostico_mediante_tecnicas.html)>. 29 Out. 2012.
- Lionetto, F.; Frigione, M. Effect of novel consolidants on mechanical and absorption properties of deteriorated wood by insect attack. *Journal of Cultural Heritage*, v.13, n.2, p.195-203, 2012. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2011.09.007>>.
- Magalhães, W. L. E.; Mattos, B. D.; Missio, A. L. Field testing of CCA-treated Brazilian spotted gum. *International Biodeterioration & Biodegradation*, v.74, p.124-128, 2012. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2012.05.024>>.
- Melo, R. R. D.; Stangerlin, D. M.; Santini, E. J.; Haselein, C. R.; Gatto, D. A.; Susin, F. Durabilidade natural da madeira de três espécies florestais em ensaios de campo. *Ciência Florestal*, v.20, n.2, p.357-365, 2010. <<http://cascavel.ufsm.br/revistas/ojs-2.2.2/index.php/cienciaflorestal/article/view/1858>>. 28 Out. 2012.
- Mendes, A. S.; Alves, M. V. S. A degradação da madeira e sua preservação. Brasília: IBDF. Departamento de Pesquisa. Laboratório de Produtos Florestais, 1988. 57p.
- Miná, A. J. S.; Oliveira, F. G. R.; Calil Jr, C.; Dias, A. A.; Sales, A. Avaliação não-destrutiva de postes de madeira por meio de ultra-som. *Scientia Forestalis*, n.65, p.188-196, 2004. <<http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr65/cap18.pdf>>. 26 Out. 2012.

- Oliveira, J. T. S.; Souza, L. C.; Della Lúcia, R. M.; Júnior, W. P. S. Influência dos extrativos na resistência ao apodrecimento de seis espécies de madeira. *Revista Árvore*, v.29, n.5, p.819-826, 2005. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622005000500017>>.
- Palanti, S.; Feci, E.; Torniai, A. M. Comparison based on field tests of three low-environmental-impact wood treatments. *International Biodeterioration & Biodegradation*, v.65, n.3, p.547-552, 2011. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2010.12.012>>.
- Panshin, A. J.; De Zeeuw, C. Textbook of wood technology. New York: Mc-Graw-Hill, 1980. 722p.
- Reis, E. R. D.; Guarienti, A. F.; Pedrazzi, C.; Souza, M. C. H. D.; Rosa, C. A. B. D.; Cardoso, G. V.; Frizzo, S. M. B.; Foelkel, C. E. B. Estudo da composição química de madeiras de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus globulus* spp. *maideni* em diferentes regiões do tronco. In: Congresso e Exposição Internacional de Celulose e Papel, 23, 2003, São Paulo. Anais... São Paulo: ABTCP, 2003. CD Rom.
- Richardson, H. W. Handbook of copper compounds and applications. New York: M. Dekker, 1997. 432p.
- Shaji, T.; Somayaji, S.; Mathews, M. S. Ultrasonic pulse velocity technique for inspection and evaluation of timber. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v.12, n.2, p.180-185, 2000. <[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2000\)12:2\(180\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2000)12:2(180))>.
- Ssemaganda, I. E.; Mugabi, P.; Tumwebaze, S. B. Effectiveness of selected preservatives in protecting Ugandan grown *Eucalyptus grandis* wood against termite attack. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, v.13, n.2, p.135-142, 2011. <<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2011000200001>>.
- Stangerlin, D. M.; Calegari, L.; Santini, E. J.; Domingues, J. M. X.; Gatto, D. A.; Melo, R. R. Determinação do módulo de elasticidade em madeiras por meio de métodos destrutivo e não-destrutivo. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.3, n.2, p.145-150, 2008. <<http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v3i2a284>>.