

Efeito da termorretificação sobre as propriedades colorimétricas das madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*Effect of thermal rectification on colorimetric properties of *Eucalyptus grandis* and *Pinus caribaea* var. *hondurensis* woodsLuiz Fernando de Moura¹ e José Otávio Brito²**Resumo**

A termorretificação ou retificação térmica é um processo alternativo de agregação de valor à madeira. A madeira termorretificada adquire colorações semelhantes àsquelas de madeiras tropicais de maior valor econômico, além de apresentar melhoria na estabilidade dimensional e resistência aos fungos xilófagos. Neste trabalho, madeiras consideradas, comparativamente, de menor valor econômico agregado (*Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*) foram submetidas a diversos tratamentos de termorretificação, com o objetivo de avaliar o efeito do calor sobre as propriedades colorimétricas do material tratado. O aumento da temperatura causou escurecimento das amostras (diminuição da claridade, L), o qual se tornou mais drástico a partir de tratamentos a 180°C. O matiz vermelho (coordenada vermelho-verde, a*) foi gradualmente diminuído com o aumento da temperatura, somente para *Eucalyptus*. O matiz amarelo (coordenada azul-amarelo, b*) foi reduzido devido ao aquecimento, principalmente a temperaturas acima de 160°C.

Palavras-chave: tratamento térmico, coloração da madeira, eucalipto, *Pinus*

Abstract

The thermal rectification is an alternative process to add value to wood. The thermally rectified wood acquires colors similar to those observed in tropical woods, better resistance to fungi and weathering, higher dimensional stability and lower hygroscopicity. In this work, comparatively low-valued woods (*Eucalyptus grandis* and *Pinus caribaea* var. *hondurensis*) underwent a variety of thermal rectification treatments, aiming at evaluating the effect of heating on colorimetric properties of thermally-treated material. The increase in temperature caused a darkening of samples (reduction of lightness, L), which became more pronounced starting at 180°C. The reddish color (red/green coordinate, a*) was gradually decreased with increasing temperature, for *Eucalyptus* only. The yellowish component (blue/yellow coordinate, b*) was reduced due to heating, mainly at temperatures higher than 160°C.

Keywords: thermal treatment, wood color, *Eucalyptus*, pine

INTRODUÇÃO

As espécies tropicais de alto valor econômico, cujas reservas naturais estão em declínio, apresentam excelentes características de aparência, que já são reconhecidamente apreciadas e têm lugar consolidado no mercado mundial. A cor e os padrões de desenho (grã) da madeira são os principais atributos de aparência a serem notados. Neste contexto, a cor é um critério importante de qualidade: sua descrição facilita a classificação e valorização dos produtos finais da madeira.

A termorretificação (ou retificação térmica) é uma alternativa para modificar a aparência de

madeiras de menor valor econômico. A madeira termorretificada adquire colorações semelhantes àsquelas de madeiras tropicais de maior valor econômico, além de apresentar melhoria na estabilidade dimensional e resistência aos fungos xilófagos (DUCHEZ; GUYONNET, 1998; CRIQ, 2003). Gouveia (2008) relata que o tratamento térmico entre 150°C e 200°C conferiu maior estabilidade de cor a algumas espécies frente à exposição à radiação ultravioleta.

Portanto, a madeira assim tratada é indicada para usos em ambientes exteriores e interiores úmidos (ex. lambris e forros, peças de banheiro e cozinha, portas e janelas em geral, instru-

¹Eng. Florestal, Ph.D., Departamento de Ciências Florestais, ESALQ/USP – Av. Pádua Dias, no 11 – Agronomia Caixa Postal: 09 - Piracicaba/SP - CEP: 13.418-900 - E-mail: demoura.LF@gmail.com

²Eng. Florestal, Ph.D., Departamento de Ciências Florestais, ESALQ/USP – Av. Pádua Dias, no 11 – Agronomia Caixa Postal: 09 - Piracicaba/SP - CEP: 13.418-900 - E-mail: jobrito@usp.br

mentos musicais etc.) que não envolvam, no entanto, grandes solicitações mecânicas, tendo em vista que algumas propriedades mecânicas do material tratado são negativamente alteradas pela ação da temperatura (BRITO 1997; KAMDEM *et al.* 2002; BEKHTA; NIEMZ 2003).

Na América do Norte e na Europa, os lambris de exterior em madeira estão gradativamente cedendo mercado para outros materiais que exigem menos manutenção, como o alumínio e o vinil (CRIQ 2003). No Brasil, o acabamento externo de casas é raramente composto com madeiras. Constata-se, portanto, uma carência de materiais madeireiros que sejam competitivos no mercado de revestimentos.

O tratamento térmico de espécies madeireiras de menor valor econômico, para melhoria de aparência, é um excelente exemplo de agregação de valor. Neste sentido, acredita-se que um programa de otimização do uso tecnológico de madeiras de florestas plantadas contribuiria significativamente para a diminuição das pressões sobre as espécies nativas provedoras de madeiras “nobres”.

Diversos trabalhos relatam unanimemente a redução da claridade da madeira em função do aquecimento em tratamentos térmicos (PINCELLI 1999; BEKHTA; NIEMZ 2003; JOHANSSON; MORÉN 2006). Bourgois *et al.* (1991) associa a redução da claridade da madeira à diminuição do teor de holocelulose, por ação da temperatura.

Os relatos do efeito da temperatura sobre o matiz vermelho da madeira indicam comportamentos diversificados em função da espécie estudada. No trabalho de Pincelli (1999), o nível de vermelho em *Eucalyptus saligna* diminuiu drasticamente com o aumento das temperaturas de tratamento. No entanto, Johansson e Morén (2006) constataram aumento da coloração vermelha em amostras de bétula tratadas termicamente, comparadas às testemunhas não-tratadas.

Em sua composição original, a madeira possui quinonóides e estruturas de estilbeno na lignina, além de complexos organometálicos em extrativos, os quais conferem parte da coloração amarela (FALKEHAG *et al.* 1966), que podem ser afetados pela ação da temperatura. Bekhta e Niemz (2003) constataram diminuição acentuada do matiz amarelo em *Picea abies* após a exposição a temperaturas superiores a 150°C. Similarmente, Pincelli (1999) relata uma queda drástica do matiz amarelo em amostras de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* expostas a temperaturas superiores a 160°C.

Neste trabalho, madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis* foram submetidas a diversos tratamentos de termorretificação, com o objetivo de avaliar o efeito do calor sobre as propriedades colorimétricas do material tratado.

MATERIAL E MÉTODOS

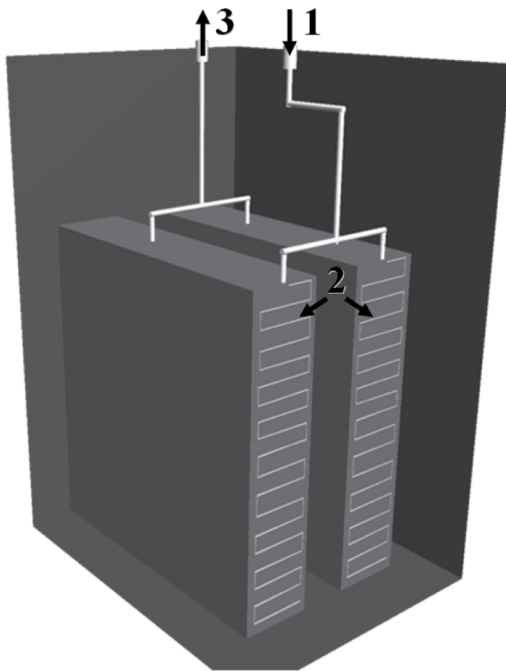
Material

Foram estudadas as madeiras de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden (18 anos, proveniente de Anhembi, SP) e *Pinus caribaea* Morelet var. *hondurensis* (Sénécl.) W.H.G. Barrett & Golfari (32 anos, proveniente de Uberlândia, MG). Estas espécies são muito usadas no Brasil em plantios florestais e são consideradas como tendo importante potencial para suprir a demanda da indústria madeireira nacional. Neste contexto, propõe-se o emprego da termorretificação como instrumento que possa contribuir para a agregação de valor a estas madeiras.

Pranchas de 280 x 8 x 5 cm foram cortadas em quatro sub-amostras de 60 x 8 x 5 cm, eliminando-se zonas defeituosas (rachaduras, nós, empenamentos etc.). Para cada prancha, uma das sub-amostras foi usada em seu estado natural, como testemunha, e as outras três destinadas aos tratamentos térmicos. As peças selecionadas para as retificações térmicas (7 amostras por tratamento) foram secas em estufa com circulação forçada de ar à temperatura de 100°C, até atingirem peso constante (PINCELLI *et al.* 2002).

Termorretificações

As retificações térmicas foram conduzidas nos Laboratórios Integrados de Química, Celulose e Energia (LQCE) do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP. As madeiras foram termorretificadas em estufa FANEM – Modelo 320 – Digital, dotada de sistema de aquecimento por resistência elétrica e circulação forçada de ar, com volume nominal de 450 litros. As madeiras foram colocadas inicialmente no interior de caixas metálicas fechadas (Figura 1), dotadas de porta de acesso e orifícios destinados à colocação da fiação de sistema de controle de temperatura, acesso para evacuação de gases do processo e a introdução de gases para inertização da atmosfera interna, quando prevista (Figura 1A e 1B). As caixas contendo as madeiras foram introduzidas na estufa com a temperatura pré-regulada a 100°C e, em seguida, foi iniciada a termorretificação, conforme os programas apresentados na Figura 2.



A



B

Figura 1. Projeto das caixas para instalação no interior da estufa, visando injeção de nitrogênio gasoso: A) Tubulação à direita para entrada do gás (1), trocador de calor (2), tubulação à esquerda para a saída do gás (3); B) Visão geral do sistema instalado na estufa, indicando a abertura unilateral (1).

Figure 1. Thermal rectification chambers designed for nitrogen injection, installed into the oven: A) Right-hand pipeline for gas entry (1), heat exchanger (2) left-hand pipeline for gas purge (3); B) Overview of the system installed inside the oven, indicating unilateral opening (1).

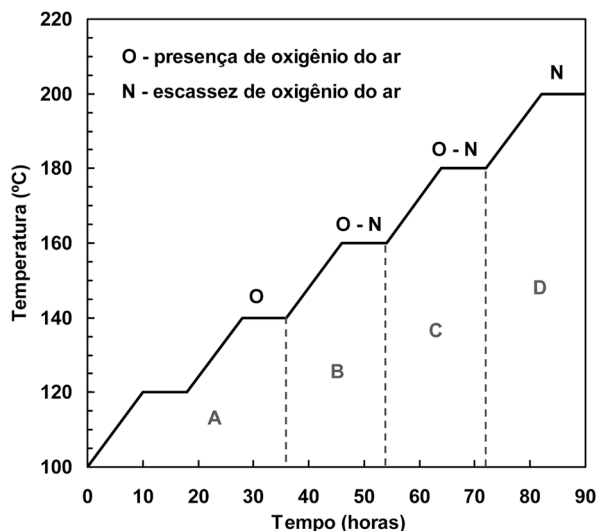


Figura 2. Programas de termorretificação (A = 140°C; A + B = 160°C; A + B + C = 180°C; A + B + C + D = 200°C). Os tratamentos acima de 160°C foram conduzidos em presença ou escassez de oxigênio do ar. O tratamento a 200°C foi realizado apenas em escassez de oxigênio (i.e. mediante injeção do nitrogênio), para evitar o risco de combustão.

Figure 2. Thermal rectification programs (A = 140°C; A + B = 160°C; A + B + C = 180°C; A + B + C + D = 200°C). Note that treatments over 160°C were performed in presence or scarcity of oxygen from the air. The 200°C treatment was only performed in scarcity of oxygen (i.e. by nitrogen injection), to avoid the risk of fire.

Para testar o efeito da escassez de oxigênio na câmara de termorretificação, optou-se também pela realização de termorretificações com injeção de nitrogênio gasoso no interior da carga para os tratamentos com temperaturas acima de 160°C.

Análises colorimétricas

Um espectrofotômetro Konica Minolta CM-2500D, acoplado a um microcomputador, foi utilizado para a determinação da cor das amostras. Foram empregados o iluminante D65 e o ângulo de observação de 10°. Usando o espectrofotômetro, foi feita uma varredura nas superfícies das amostras, para a obtenção dos parâmetros de cor. Foram tomadas 3 medidas de cor para cada amostra. Os parâmetros colorimétricos medidos pelo espectrofotômetro foram os seguintes: claridade (L), coordenada vermelho-verde ou matiz vermelho (a^*) e coordenada azul-amarelo ou matiz amarelo (b^*). Estes parâmetros foram obtidos baseando-se no Sistema de cor CIELAB 1976, conforme metodologia descrita por Pincelli (1999).

Análises estatísticas

O processamento dos dados foi realizado através do sistema SAS (Statistical Analysis System) versão 9.0, tendo sido conduzidas análises

de variância (ANOVA), comparações múltiplas entre médias (Teste de Tukey), além de estatísticas gerais e análises de correlação (Pearson), visando avaliar as relações entre as diferentes variáveis estudadas. Para as análises estatísticas e expressão gráfica dos dados, atribuiu-se a temperatura ambiente de 20°C às amostras não-tratadas (testemunhas).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observações gerais

Tanto para *Pinus caribaea* var. *hondurensis* quanto para *Eucalyptus grandis*, a mudança de cor foi visível em função dos tratamentos térmicos. No entanto, esta mudança não foi linear em função das temperaturas máximas aplicadas. As diferenças visuais em *Pinus* foram pouco perceptíveis para os tratamentos a 140°C e 160°C. Em *Eucalyptus*, as alterações já foram evidentes a partir do tratamento a 140°C. Para as duas espécies, as alterações de cor tornaram-se mais drásticas a partir de tratamentos a 180°C. Observou-se que os tratamentos extremos (i.e. 180°C, em presença de oxigênio; 200°C, em escassez de oxigênio) provocaram um escurecimento bastante pronunciado em comparação com os demais tratamentos (Figura 3).

No caso específico do *Pinus*, as madeiras termicamente tratadas apresentaram extravasamento de resina após o tratamento térmico, o que causou o aparecimento de manchas escuras na superfície. Tais manchas foram facilmente removidas por meio de aplainamento. O tratamento a 200°C foi aquele que promoveu maior extrusão de resina, causando inclusive a contaminação de pranchas vizinhas na câmara de termorretificação. Durante o armazenamento antes

da execução dos tratamentos, algumas amostras de *Pinus* foram atacadas pelo fungo causador da mancha azul (*Lasiodiplodia theobromae* (Pat.) Griff. & Maubl.). Observou-se que tratamentos acima de 160°C conseguiram camuflar completamente a mancha azul.

Claridade (L)

A Figura 4 e a Tabela 1 apresentam os parâmetros de claridade (L), para *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, termorretificados a três temperaturas máximas em presença ou escassez de oxigênio. A Tabela 1 apresenta comparações estatísticas múltiplas entre médias, para todos os fatores estudados.

Como padrão geral, o aumento da temperatura causou escurecimento das amostras, o que confirma resultados previamente obtidos por Pincelli (1999) e Bekhta e Niemz (2003). Com o aumento da temperatura, a madeira tenderá à conversão em carvão vegetal, convergindo gradualmente à cor preta, independentemente da espécie. Após a termorretificação, a madeira de *Pinus* conservou maior claridade que a de *Eucalyptus* (Tabela 1, C2). No entanto, a diferença de claridade entre as duas espécies diminuiu à medida que se aumentou a temperatura máxima do tratamento (Figura 4).

A presença de oxigênio não exerceu influência significativa na perda de claridade das amostras durante os tratamentos térmicos (Tabela 1, C3). Para tratamentos até 180°C, a presença de oxigênio deve ter exercido efeito apenas superficial sobre as pranchas termorretificadas. Contudo, a retirada de oxigênio da câmara de termorretificação é recomendável para tratamentos acima de 200°C, como medida preventiva de incêndios.

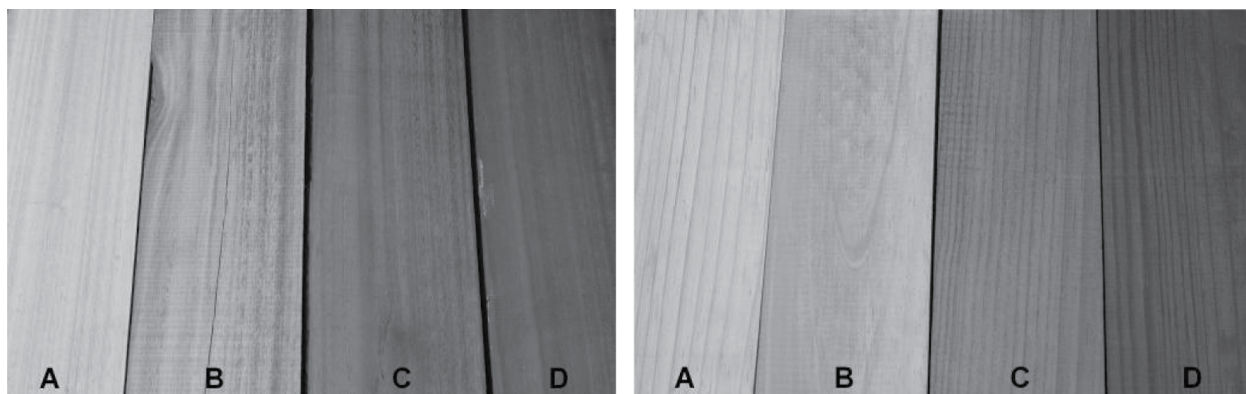


Figura 3. Aparência geral das amostras de *Eucalyptus grandis* (à esquerda) e *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (à direita) termorretificadas a diversas temperaturas, em condições de escassez de oxigênio (A = testemunha; B = 160°C; C = 180°C; D = 200°C).

Figure 3. General appearance of *Eucalyptus grandis* (left-hand side) e *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (right-hand side) thermally rectified at several temperatures under scarcity of oxygen from the air (A = control; B = 160°C; C = 180°C; D = 200°C).

Tabela 1. Comparações estatísticas múltiplas entre médias obtidas para o parâmetro de claridade (L).**Table 1.** Multiple statistical comparisons between means for lightness index (L).

Espécie	Atmosfera	Temperatura máxima (°C)	Claridade (L)	Erro padrão	C1	C2	C3
<i>Eucalyptus grandis</i>	Presença de oxigênio	Testemunha	59,14	1,20	A	B	
		140	52,91	1,48	B	B	
		160	52,88	1,54	B	B	a
		180	40,31	0,50	C	B	a
	Escassez de oxigênio	Testemunha	63,43	0,45	A	B	
		160	52,31	2,62	B	B	a
<i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	Presença de oxigênio	Testemunha	75,41	1,58	A	A	
		140	72,43	1,25	AB	A	
		160	67,49	0,88	B	A	a
		180	46,80	1,07	C	A	a
	Escassez de oxigênio	Testemunha	75,96	0,88	A	A	
		160	69,77	0,66	B	A	a
		180	48,92	1,32	C	A	a
		200	42,08	1,33	D	A	

C1: LETRAS MAIÚSCULAS SUBLINHADAS são para comparações (Teste de Tukey) entre temperaturas máximas, para uma mesma espécie e mesmo tipo de tratamento (presença ou escassez de oxigênio).

C2: LETRAS MAIÚSCULAS são para comparações (Teste de Tukey) entre espécies, para um mesmo tipo de tratamento (presença ou escassez de oxigênio) e mesma temperatura máxima.

C3: letras minúsculas são para comparações (Teste de Tukey) entre tipos de tratamento (presença ou escassez de oxigênio), para uma mesma espécie e mesma temperatura máxima. Estas comparações foram realizadas somente para temperaturas máximas de 160°C e 180°C.

Os parâmetros de claridade apresentaram relações com algumas características químicas, obtidas em estudos prévios sobre a madeira termoretificada realizados nos Laboratórios Integrados de Química, Celulose e Energia (LQCE) do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP (resultados em fase de publicação). Nestes estudos, foram determinados o teor de lignina Klason e o teor de extrativos totais solúveis em etanol, etanol:tolueno e água quente. O teor de holocelulose foi calculado subtraindo-se a soma dos teores lignina e extrativos da massa seca total analisada. A claridade esteve negativamente correlacionada com o teor de lignina Klason na madeira ($r = -0,7632$). Além disso, as amostras tenderam a ficar mais escuras e menos amarelas à medida que o teor de holocelulose foi reduzido por ação da temperatura ($r = 0,7308$). A redução da claridade da madeira em função da diminuição do teor de holocelulose, por ação da temperatura, já havia sido indicada por Bourgois *et al.* (1991).

Matiz vermelho (a*)

A Figura 5 e a Tabela 2 apresentam os resultados do matiz vermelho (a*), para *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, termoretificados a três temperaturas máximas em presença ou escassez de oxigênio. A Tabela 2 apresenta comparações estatísticas múltiplas entre médias, para todos os fatores estudados.

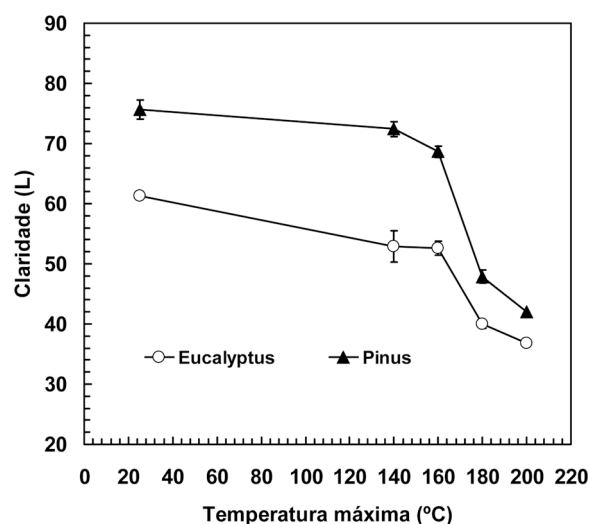


Figura 4. Parâmetro de claridade (L) da madeira, decorrente da termoretificação, em função da espécie e temperatura máxima.

Figure 4. Lightness index (L) of thermally rectified wood, related to species and maximum temperature.

A média geral do matiz vermelho foi mais elevada na madeira de *Eucalyptus* (13,06) do que em *Pinus* (10,60). De fato, como se pode constatar na Figura 3, a madeira da folhosa apresenta tonalidade mais avermelhada que a da conífera. Para temperaturas máximas acima de 180°C, no entanto, o nível de vermelho da folhosa tornou-se significativamente inferior ao da conífera (Tabela 2, C2; Figura 5).

Tabela 2. Comparações estatísticas múltiplas entre médias obtidas para o matiz vermelho (a*).
Table 2. Multiple statistical comparisons between means for the red-green coordinate (a*).

Espécie	Atmosfera	Temperatura máxima (°C)	Matiz vermelho (a*)	Erro padrão	C1	C2	C3	
<i>Eucalyptus grandis</i>	Presença de oxigênio	Testemunha	18,51	0,18	A	A		
		140	14,47	0,43	B	A		
	Escassez de oxigênio	160	12,69	0,48	C	A	a	
		180	9,76	0,29	D	B	a	
	<i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	Presença de oxigênio	Testemunha	17,41	0,31	A	A	
			160	13,65	0,52	B	A	a
Escassez de oxigênio		180	9,37	0,28	C	B	a	
		200	8,64	0,33	C	B		
<i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	Presença de oxigênio	Testemunha	10,90	0,86	A	B		
		140	9,85	0,57	A	B		
	Escassez de oxigênio	160	10,78	0,50	A	A	a	
		180	11,64	0,22	A	A	a	
	Escassez de oxigênio	Testemunha	9,63	1,07	A	B		
		160	10,32	0,41	A	B	a	
		180	11,53	0,43	A	A	a	
		200	10,12	0,29	A	A		

C1: LETRAS MAIÚSCULAS SUBLINHADAS são para comparações (Teste de Tukey) entre temperaturas máximas, para uma mesma espécie e mesmo tipo de tratamento (presença ou escassez de oxigênio).

C2: LETRAS MAIÚSCULAS são para comparações (Teste de Tukey) entre espécies, para um mesmo tipo de tratamento (presença ou escassez de oxigênio) e mesma temperatura máxima.

C3: letras minúsculas são para comparações (Teste de Tukey) entre tipos de tratamento (presença ou escassez de oxigênio), para uma mesma espécie e mesma temperatura máxima. Estas comparações foram realizadas somente para temperaturas máximas de 160°C e 180°C.

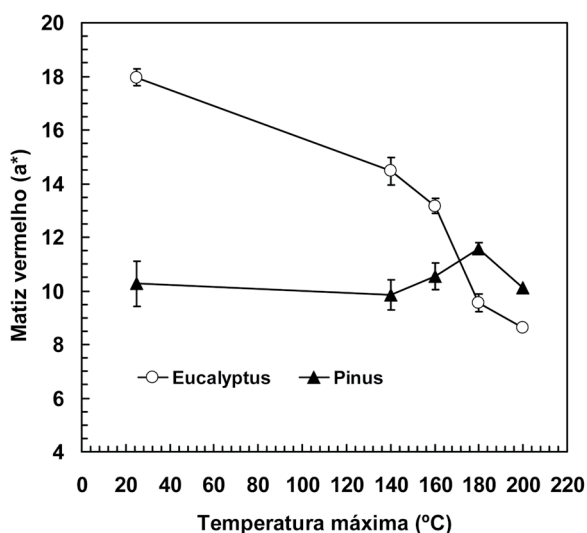


Figura 5. Matiz vermelho (a*) da madeira, decorrente da termorretificação, em função da espécie e temperatura máxima.

Figure 5. Red-green coordinate (a*) of thermally rectified wood, related to species and maximum temperature.

A madeira de *Pinus* não apresentou alterações significativas no nível de vermelho em função das temperaturas máximas do tratamento térmico (Figura 5; Tabela 2, C1). Para *Eucalyptus*, no entanto, o nível de vermelho diminuiu drasticamente com o aumento das temperaturas, tanto na presença como na escassez de oxigênio (Tabela 2, C1), o que corrobora resultados obtidos por Pincelli (1999), em amostras de *Eucalyptus saligna*. Esta redução deve estar associada à volatilização, à medida que a madeira é aquecida, de

compostos que conferem cor avermelhada ao *Eucalyptus* (provavelmente extrativos fenólicos). Por outro lado, a madeira da conífera é relativamente pobre em matiz vermelho (Tabela 2, Testemunhas de *Pinus*). Logo, os efeitos da volatilização de eventuais substâncias que atribuem a cor vermelha são menos pronunciados em *Pinus*.

Em geral, a presença de oxigênio na câmara de termorretificação não afetou o nível de vermelho das amostras (Tabela 2, C3).

Matiz amarelo (b*)

A Figura 6 e a Tabela 3 apresentam os resultados do matiz amarelo (b*), para *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, termorretificados a três temperaturas máximas em presença ou escassez de oxigênio. A Tabela 3 apresenta comparações estatísticas múltiplas entre médias, para todos os fatores estudados.

A madeira de *Pinus* apresentou matiz amarelo significativamente mais elevado (26,87) do que a madeira de *Eucalyptus* (17,62). Portanto, a folhosa teve coloração amarelada menos intensa que a conífera, para todos os tratamentos estudados (Tabela 3, C2).

O aumento da temperatura máxima de tratamento resultou em diminuição do matiz amarelo (Figura 6; Tabela 3, C1). As reduções significativas na coloração amarela, em comparação com as testemunhas não-tratadas, ocorreram a partir da temperatura de 180°C (Tabela 3, C1). Isto sugere que alterações químicas mais pronunciadas,

Tabela 3. Comparações estatísticas múltiplas entre médias obtidas para o matiz amarelo (b*).**Table 3.** Multiple statistical comparisons between means for the blue-yellow coordinate (b*).

Espécie	Atmosfera	Temperatura máxima (°C)	Matiz amarelo (b*)	Erro padrão	C1	C2	C3
<i>Eucalyptus grandis</i>	Presença de oxigênio	Testemunha	21,74	0,77	A	B	
		140	19,28	0,33	A	B	
		160	18,20	1,64	AB	B	a
	Escassez de oxigênio	180	14,34	0,70	B	B	a
		Testemunha	21,64	0,52	A	B	
		160	18,11	0,89	AB	B	a
<i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	Presença de oxigênio	180	14,42	1,32	BC	B	a
		200	13,22	0,18	C	B	
		Testemunha	29,53	0,51	A	A	
	Escassez de oxigênio	140	31,06	1,00	A	A	
		160	30,30	0,58	A	A	a
		180	21,82	0,53	B	A	a
Testemunha	200	30,00	0,29	A	A		
	160	31,08	0,91	A	A	a	
	180	23,26	1,27	B	A	a	
200	17,90	0,83	C	A			

C1: LETRAS MAIÚSCULAS SUBLINHADAS são para comparações (Teste de Tukey) entre temperaturas máximas, para uma mesma espécie e mesmo tipo de tratamento (presença ou escassez de oxigênio).

C2: LETRAS MAIÚSCULAS são para comparações (Teste de Tukey) entre espécies, para um mesmo tipo de tratamento (presença ou escassez de oxigênio) e mesma temperatura máxima.

C3: letras minúsculas são para comparações (Teste de Tukey) entre tipos de tratamento (presença ou escassez de oxigênio), para uma mesma espécie e mesma temperatura máxima. Estas comparações foram realizadas somente para temperaturas máximas de 160°C e 180°C.

envolvendo a volatilização de substâncias (provavelmente extrativos) que conferem a cor amarela à madeira, devem ter ocorrido após a exposição a 160°C. Analisando amostras de *Picea abies* termicamente tratadas, Bekhta e Niemz (2003) relatam um decréscimo drástico da coloração amarela após a exposição a temperaturas superiores a 150°C. Similarmente, Pincelli (1999) constatou uma queda drástica da cor amarela em amostras de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* expostas a temperaturas superiores a 160°C.

A coloração amarelada está associada à presença de cromóforos na lignina e extrativos, além de complexos organometálicos em extrativos. Menciona-se que a madeira não-tratada possui quinonóides e estruturas de estilbeno em sua lignina, os quais conferem parte do matiz amarelo (FALKEHAG *et al.* 1966). Acredita-se que o tratamento térmico tenha interferido de alguma forma na estrutura e/ou quantidade destes compostos na madeira.

A presença de oxigênio na câmara de termorreificação não afetou o nível de amarelo das amostras (Tabela 3, C3), o que reforça a suposição de que a oxidação causada pelo gás teve efeito pouco evidente, restrito à superfície das amostras.

CONCLUSÕES

A termorreificação pode ser aplicada industrialmente para alterar a cor da madeira, de maneira a imitar outras espécies de maior valor agregado.

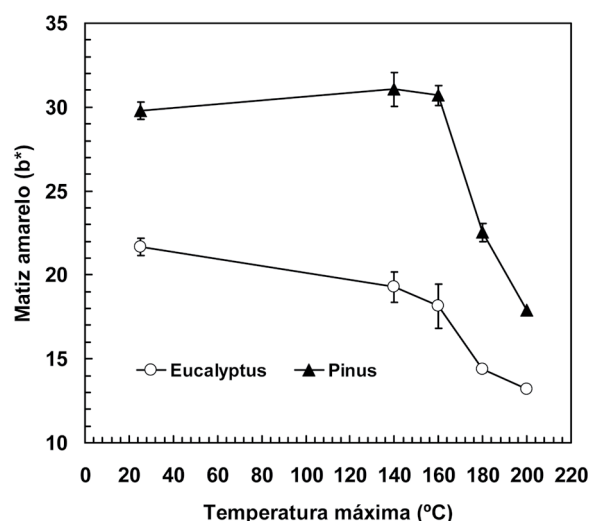


Figura 6. Matiz amarelo (b*) da madeira, decorrente da termorreificação, em função da espécie e temperatura máxima.

Figure 6. Blue-yellow coordinate (b*) of thermally recified wood, related to species and maximum temperature.

Além de promover o escurecimento, o processo também permitiu a alteração das tonalidades de vermelho e amarelo da madeira.

O incremento da temperatura causou escurecimento das amostras, o qual se tornou mais drástico a partir de tratamentos a 180°C. Embora a conífera apresente coloração mais clara que a folhosa, houve tendência de convergência dos níveis de claridade à medida que a temperatura foi aumentada.

O matiz vermelho foi gradualmente diminuído com o aumento da temperatura, somente para

Eucalyptus. A faixa de temperaturas aplicadas não foi suficiente para provocar alterações significativas na coloração vermelha da madeira de *Pinus*.

O matiz amarelo foi reduzido devido ao aquecimento, principalmente a temperaturas acima de 160°C. A diferença da coloração amarela entre as espécies tendeu a diminuir com o incremento das temperaturas máximas de termorretificação.

Para próximos estudos, recomenda-se avaliar o efeito combinado do tempo e da temperatura máxima da termorretificação, sobre as propriedades colorimétricas e mecânicas do material tratado.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com o apoio técnico de A W Faber Castell S.A. e SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial “Mário Henrique Simonsen”), além das contribuições de Adriana Maria Nolasco, José Francisco Bis e Udemilson Luís Ceribelli. O trabalho foi realizado com fundos da FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEKHTA, P.; NIEMZ, P. Effect of High Temperature on the Change in Color, Dimensional Stability and Mechanical Properties of Spruce Wood. *Holzforschung*, Berlin, v.57, n.5, p.539-546, 2003.

BOURGOIS, P.J.; JANIN, G; GUYONNET, R. La mesure de couleur: Une méthode d'étude et d'optimisation des transformations chimiques du bois thermolysé. *Holzforschung*, Berlin, v.45, n.5, p.377-382, 1991.

BRITO, J.O. Estudo sobre retificação térmica das madeiras de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e *Eucalyptus saligna*. **Relatório Final**. FAPESP-93/4639-0, Piracicaba, 1997. 198 p.

CRIQ - Centre de recherche industrielle du Québec . Profil des produits forestiers – Deuxième transformation – Bois traité à haute température. **Relatório apresentado ao Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs (MRNFP)**, 95 p., nov. 2003. Disponível em: <http://www.mrnfp.gouv.qc.ca/publications/forets/entreprises/BoistraiteHautetemp.pdf>.

DUCHEZ, L.; GUYONNET, R. Principles and applications of wood rectification. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 5., Lausanne, 1998. **Proceedings...** Montreaux: Presses polytechniques et universitaires romandes, 1998.

FALKEHAG, S.I.; MARTON, J.; ADLER, E. Chromophores in Kraft lignin. In: **Lignin Structure and Reactions**. Washington D.C.: Ed. Marton, J. Am. Chem. Soc., 1966. p.75-89.

GOUVEIA, F.N. **Aplicação de tratamentos térmicos para estabilização colorimétrica de madeiras tropicais**. 2008. 131p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais), Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

JOHANSSON, D.; MORÉN, T. The potential of colour measurement for strength prediction of thermally treated wood. *Holz als Roh- und Werkstoff*, Berlin, v.64, p.104-110, 2006.

KAMDEM, D.P.; PIZZI, A.; JERMANNAUD, A. Durability of heat-treated wood. *Holz als Roh- und Werkstoff*, Berlin, v.60, n.1, p.1-6, 2002.

PINCELLI, A.L.P.S.M. Efeito da termorretificação no envernizamento, colagem e cor da madeira de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. 1999. 115p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Madeira) –Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

PINCELLI, A.L.P.S.M.; BRITO, J.O.; CORRENTE, J.E. Avaliação da termorretificação sobre a colagem na madeira de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, n.61, p.122-132, 2002.

Recebido em 06/08/2010

Aceito para publicação em 02/02/2011