

Qualidade de Adesão de Juntas de Madeira de Pinus Coladas em Condições Simuladas de Serviço Interna e Externa

Delanie Lima da Costa Tienne, Alexandre Miguel do Nascimento,
Rosilei Aparecida Garcia, Daniel Borges Silva

Instituto de Florestas, Departamento de Produtos Florestais, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ

RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar a qualidade e a resistência de juntas de madeira de *Pinus* sp. coladas através de testes de tração, cisalhamento antes e após condições simuladas de serviço externo e testes de delaminação. As juntas foram coladas com três adesivos: resorcinol, resorcinol-tanino (90:10) e resorcinol-tanino (80:20) a temperaturas de 25 e 60 °C, com 0 e 10% de metanol. Os tratamentos apresentaram restrições quanto à tração normal. A colagem a 25 °C apresentou bons resultados para todos os adesivos. A colagem a 60 °C diminuiu a resistência do adesivo resorcinol-tanino (90:10). O metanol melhorou a qualidade de adesão de todos os adesivos a 60 °C.

Palavras-chave: resorcinol-tanino, juntas de madeira coladas, qualidade de adesão.

Adhesion Quality of Pine Wood Glued Joints Under Internal and External Service Conditions

ABSTRACT

The objective of this study was to determine the adhesion quality of *Pinus* sp. wood glued joints by means of tensile strength, shear strength before and after exposure to weathering simulated conditions, and delamination tests. Wood glued joints were bonded with three adhesives: resorcinol, resorcinol-tannin (90:10) and resorcinol-tannin (80:20) at 25 and 60 °C with 0 and 10% methanol contents. Treatments presented restriction for tensile strength. All adhesives showed good results at 25 °C. The resorcinol-tannin (90:10) adhesive lost strength at 60 °C. Methanol improved the adhesion quality for all adhesives at 60 °C.

Keywords: resorcinol-tannin, glued wood joints, adhesion quality.

1. INTRODUÇÃO

Grande parte do interesse pela madeira colada advém do fato de que ela viabiliza a utilização de madeiras de reflorestamento de rápido crescimento e de madeiras de baixa a média massa específica que, na confecção do produto, confere rigidez suficiente para aplicação estrutural.

O adesivo à base de resorcinol é um dos mais utilizados para estruturas e, apesar de garantir uma boa

ligação com elevada resistência mecânica e à ação do tempo, da água e da temperatura, apresenta seu custo como um fator desfavorável, chegando a representar cerca de 30% do custo total da madeira laminada colada. Esse fato torna a madeira laminada colada um material pouco competitivo quando comparado a outros materiais estruturais como o aço e o concreto (Melo & Carrasco, 2004). Para reduzir o seu custo, o

adesivo resorcinol tem sido misturado com outros adesivos de menor custo a fim de tornar o seu uso mais viável (Grigsby & Warnes, 2004; Nascimento et al., 2002; Szücs et al., 1998; Vrazel, 2002).

O adesivo à base de tanino apresenta um menor custo quando comparado aos demais adesivos estruturais além de ter um apelo ambiental relevante, devido à extração ser geralmente realizada a partir do aproveitamento de resíduos como a casca. Segundo Grigsby & Warnes (2004) e Pizzi (1994), o adesivo tanino-resorcinol adicionado do endurecedor paraformaldeído pode apresentar uma alta resistência mecânica na colagem e às variações de temperatura e umidade.

Segundo Pizzi (1994), o adesivo resorcinol não apresenta problemas relacionados ao pH da superfície, pois pode curar tanto em condições ácidas quanto básicas. Entretanto, os adesivos à base de tanino têm sua reação ligada ao pH básico, quanto mais alta for a alcalinidade, maior será sua reação com o formaldeído e menor o tempo de gel. A adição do resorcinol ao tanino-formaldeído aumenta o pH e a reatividade do tanino, facilitando a cura em temperatura ambiente.

Costa et al. (2002) misturaram os adesivos resorcinol-formaldeído, fenol-formaldeído e tanino-formaldeído a 30 e 60 °C, na presença e ausência de metanol, e puderam observar que o tempo de formação de gel das formulações na presença de metanol, principalmente a 30 °C, foi maior que nas formulações com ausência do metanol. Isso ocorre devido à menor velocidade de reação entre o formaldeído e o tanino proporcionada pelo metanol. Gornik et al. (2000) substituíram 50 a 70% do adesivo resorcinol na formulação do fenol-resorcinol-formaldeído por tanino, utilizando 10% de metanol para adesão de madeiras de *Pseudotsuga menziesii* e *Pinus* sp. à temperatura ambiente. A qualidade de adesão foi testada através de testes de cisalhamento pelas normas AITC 107 e AITC 110. As misturas adesivas foram consideradas adequadas para colagem a frio, apresentaram uma boa resistência à umidade e resultados compatíveis com as normas.

Matthiesen (1998) estudou a qualidade da colagem de juntas de madeira de *Pinus taeda* e *Eucalyptus citriodora* com o adesivo resorcinol através de testes de cisalhamento e de tração normal às fibras. Ambas

as espécies apresentaram uma eficiência de 100% nos testes de cisalhamento, enquanto que, nos testes de tração normal, a eficiência foi de 81,82 e 85,51% para as madeiras de pinus e eucalipto, respectivamente. Nascimento et al. (2002) também encontraram resultados de porcentagem de falha satisfatórios para madeira de *Pinus* sp. segundo a norma ASTM D 3110, e a resistência da madeira colada excedeu a resistência da madeira sólida. Nascimento et al. (2003) analisaram o comportamento de vigas laminadas coladas de *Pinus* sp., e *Pinus* sp. reforçado com *Corymbia citriodora*. A porcentagem de delaminação da interface pinus-pinus foi menor que a de pinus-eucalipto, ou seja, foi mais resistente ao intemperismo. Petruski et al. (2004), estudando o comportamento de vigas de *Eucalyptus grandis* e de *Pinus* sp., verificaram que as vigas mistas pinus-eucalipto apresentaram resistência igual às vigas pinus-pinus, porém, as duas foram menores que a do eucalipto.

Inicialmente, manter uma alta resistência da linha de cola é um processo relativamente fácil, porém, mantê-la a longo prazo exposta a condições ambientais severas, é um processo muito mais difícil. A longo prazo, madeira, adesivos e produtos colados deterioram a uma taxa determinada pelos níveis de temperatura, umidade, tensão e em alguns exemplos, por concentrações de certas substâncias químicas e a presença de micro-organismos. O desempenho a longo prazo é comparado com a habilidade de um produto resistir à perda de uma propriedade mecânica medida sobre o tempo de exposição. Um produto durável é aquele que não mostra perdas de propriedade em serviço maior que de madeiras da mesma espécie e qualidade (Forest Products Laboratory, 1999).

Laufenberg (1982) testou o efeito da exposição na *performance* da madeira laminada de Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) colada (MLC) com o adesivo fenol-resorcinol em comparação com a madeira sólida serrada colada (SSL). A tração normal não apresentou diferença significativa entre os dois produtos, nem antes e nem depois da exposição. A SSL apresentou uma maior porcentagem de delaminação e, no teste de cisalhamento seco, a SSL foi mais resistente, porém, após a exposição, esse resultado foi alterado.

Apesar das diversas formulações de adesivos desenvolvidas, no Brasil são escassos os trabalhos com o objetivo de testar a resistência do material a condições de intemperismo. Nesse contexto, este estudo visa contribuir com informações sobre a resistência dos adesivos resorcinol e resorcinol-tanino utilizados para colagem de *Pinus* sp. antes e após exposição a condições simuladas de serviço externo e teve como objetivos: 1) verificar a qualidade da adesão e da integridade das juntas de madeira coladas com os adesivos resorcinol e tanino-resorcinol; 2) verificar o efeito da temperatura e da presença de metanol na qualidade da adesão desses adesivos; e 3) verificar a resistência da linha de cola antes e após exposição às condições de intemperismo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Preparação do material

Tábuas de *Pinus* sp. com dimensões de 450 x 30 x 25 cm (comprimento x largura x espessura) foram secas ao ar até atingirem o teor de umidade de equilíbrio e redimensionadas em peças menores de 62 x 6 x 25 cm, 36 x 6 x 25 cm e 36 x 8 x 25 cm (comprimento x largura x espessura) para os testes de cisalhamento, tração normal e delaminação, respectivamente. Posteriormente, as peças foram acondicionadas a 20 ± 2 °C e $65 \pm 3\%$ de umidade relativa.

O material foi então selecionado através de classificação visual baseada nas características da madeira tais como: presença, tamanho, frequência e localização dos nós, presença de medula, rachaduras, empenamentos e qualquer outro defeito aparente. Esse material foi descartado por exigência das normas para o teste de cisalhamento e tração normal a fim de evitar a influência dos defeitos na colagem. As peças destinadas ao teste de delaminação não foram selecionadas a fim de obter dados mais próximos de situações reais. Após essa seleção, as peças foram organizadas de forma que a massa específica média das amostras por tratamento não fosse discrepante. Em seguida, as peças foram aplainadas e desengrossadas com 19 mm de espessura para os testes de cisalhamento e delaminação e 24 mm para tração normal. Finalmente, foram limpas e

embaladas para evitar a oxidação das faces a serem coladas e novamente acondicionadas.

Para a colagem da madeira, foram utilizados os adesivos resorcinol e tanino de acácia negra em três diferentes proporções: 100% resorcinol, 90% resorcinol com 10% tanino e 80% resorcinol com 20% de tanino. O adesivo resorcinol foi cedido pela Borden Química Indústria e Comércio Ltda. (Curitiba, Paraná), enquanto que o adesivo à base de tanino de acácia negra, em forma de pó, foi cedido pela TANAC S.A. (Montenegro, Rio Grande do Sul). Uma solução foi preparada para o adesivo à base de tanino na proporção de 1:1 (adesivo: água). O catalisador para-formaldeído foi adicionado aos adesivos resorcinol e resorcinol-tanino (proporção 1:5) e misturado por um tempo mínimo de 5 minutos. Os adesivos foram aplicados com rolos de espuma na quantidade de 300 g m⁻².

A prensagem das juntas foi realizada através de uma adaptação em uma máquina de ensaio universal, disponível no Laboratório de Ensaio Físico-Mecânicos da Madeira do Departamento de Produtos Florestais (Instituto de Florestas, UFRRJ), utilizando três peças de maçaranduba com dimensões de 45 x 20 x 7 cm (comprimento x largura x espessura). Entre a primeira e a segunda peça de madeira de maçaranduba foi colocada uma célula de carga a fim de controlar a pressão exercida, enquanto que entre a segunda e a terceira peça de maçaranduba foram colocadas as juntas a serem coladas. As juntas foram prensadas à pressão de 1 MPa durante 5 minutos. Foram utilizadas duas temperaturas de colagem: 25 e 60 °C na presença (10%) e ausência de metanol. Após a prensagem, as juntas coladas apresentaram dimensões de 38 x 50,8 x 304 mm (altura x largura x comprimento).

Desse modo, o delineamento experimental foi um fatorial com três fatores: composição adesiva (resorcinol, resorcinol-tanino (90:10) e resorcinol-tanino (80:20)); temperatura de colagem (25 e 60 °C); e proporção de metanol (0 e 10%). Esse delineamento fatorial resultou em 12 tratamentos com 20 repetições para cada tratamento, sendo 10 destinadas ao teste de resistência ao cisalhamento das juntas coladas na compressão e 10 ao teste de cisalhamento após exposição a condições de simulação de serviços externos. Para o teste de resistência à tração normal às fibras, foram utilizadas 12 repetições para cada

tratamento, o que resultou em 120 observações por tratamento. A resistência das juntas coladas em ambos os testes foi comparada com a resistência da madeira sólida, na qual se utilizaram 20 repetições. Os três melhores tratamentos encontrados no teste de cisalhamento antes e após exposição a condições de simulação de serviços externos foram submetidos ao teste de delaminação.

2.2. Teste de resistência à tração normal

Para o teste de tração normal, os corpos de prova para as juntas coladas e para a madeira sólida foram confeccionados com dimensões de 6,4 x 5,0 x 5,0 cm e dois furos com 2,54 cm de diâmetro segundo a norma da ABNT-NBR 7190 (Associação..., 1997). Os testes foram realizados através de uma máquina de ensaio universal com capacidade máxima de 100 kN, com uma célula de carga de 2000 kgf e uma aceleração de 5 mm.min⁻¹. A resistência das juntas coladas foi comparada com o valor característico da madeira sólida, o qual foi calculado através da seguinte Equação 1:

$$F_{wk} = \left(2 \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_{\frac{n}{2}-1}}{\frac{n}{2}-1} - f_{\frac{n}{2}} \right) \times 1,1 \quad (1)$$

onde: F_{wk} : valor característico da resistência da madeira sólida, e F_n : valor de resistência em ordem crescente.

2.3. Teste de resistência ao cisalhamento na compressão paralela às fibras

Os corpos de prova utilizados no teste de cisalhamento na compressão paralela às fibras na linha de cola e na madeira sólida foram dimensionados e testados de acordo com a norma ASTM D 905 (American..., 1994f) e ASTM D 143 (American..., 1994d), respectivamente, tal como apresentado na Figura 1. Os corpos de prova para madeira sólida apresentaram dimensões de 63 x 50,8 x 38 mm (altura x largura x espessura) e o dente 19 x 13 mm.

Após o teste de cisalhamento, foram realizadas as avaliações da percentagem de falhas na madeira das juntas, coladas segundo a norma ASTM D 3110 (American..., 1994e), a qual requer para uma boa colagem um valor médio superior a 60% de falha na madeira e um mínimo de 90% de corpos de prova com um mínimo de 30% de falha na madeira, na qual nenhuma junta deve apresentar 0% de falha. Após a ruptura, os corpos de prova foram separados em dois grupos, sendo o primeiro destinado à determinação do teor de umidade e da massa específica a 12% e a 0% pelo método hidrostático, usando o mercúrio no lugar da água; e o segundo destinado à medição da percentagem de falha.

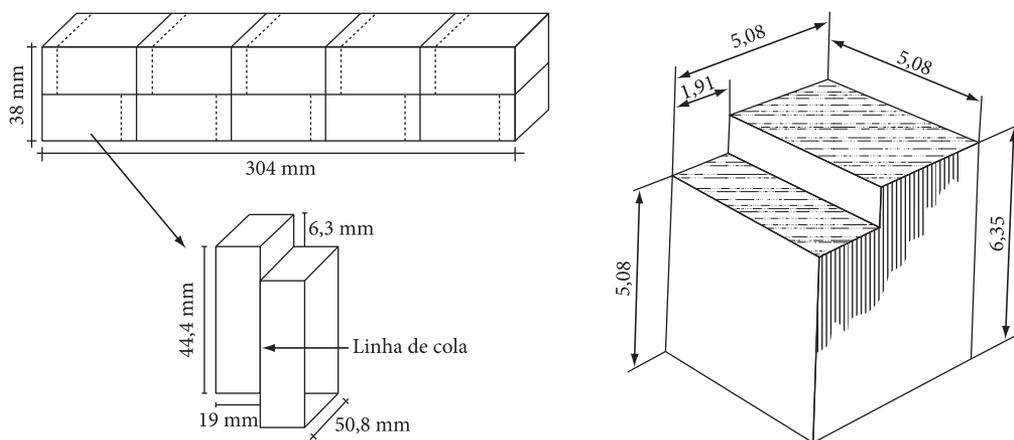


Figura 1. Dimensões dos corpos de prova para o teste de cisalhamento de juntas coladas e de madeira sólida, respectivamente, segundo as normas ASTM D 905 e ASTM D 143 (Fonte: PFEIL, 1994).

Figure 1. Dimension samples for shear strength measurement of wood glued joints and solid wood, respectively, according to ASTM D 905 and ASTM D 143 standards. Fonte: Pfeil (1994).

2.3.1. Exposição ao ciclo acelerado das condições de serviços externos – simulação de intemperismo

Para simular as condições de serviço externo, foi escolhido o procedimento B da norma ASTM D 1183 (American..., 1994a) com a inclusão do procedimento de imersão em água tal como apresentado na Tabela 1. Foram realizados dois ciclos de exposição.

2.3.2. Resistência ao cisalhamento na linha de cola exposta às condições simuladas de serviço externo

O teste de resistência ao cisalhamento da linha de cola após exposição às condições simuladas de serviço externo foi realizado tal como descrito no teste de cisalhamento. Em seguida, foi calculada a percentagem de variação de resistência devida à exposição às condições citadas na Tabela 1 através da seguinte Equação 2:

$$R = [(Y - X)/X] \times 100 \quad (2)$$

onde: R: percentagem de variação de resistência; X: resistência antes da exposição, MPa; Y: resistência das amostras após exposição, MPa.

2.4. Teste de delaminação

Os três melhores tratamentos no teste de cisalhamento antes e após exposição às condições simuladas de serviço externo foram submetidos ao teste de delaminação, o qual consiste na separação das superfícies das juntas coladas de acordo com a norma ASTM D 1101 (American..., 1994c). Três blocos com 8 lâminas de 330 x 76 x 19 mm (comprimento x largura x espessura) foram prensados, colados e

Tabela 1. Condições ambientais simuladas (possíveis condições de serviço) para o teste de cisalhamento das juntas coladas.

Table 1. Procedure used to simulate the weathering conditions for shear strength test of wood glued joints.

Exposição	Período (horas)	Temperatura (°C)	Umidade relativa (%)
Exterior	48	60 ± 3	Menor que 30
	48	38,5 ± 2	85 a 90
	48	23 ± 1	Imerso em água
	8	-18 ± 2	Aproximada de 100
	64	38,5 ± 2	85 a 90

então corpos de prova com dimensões de 76 x 76 x 19 mm (comprimento x largura x espessura) foram preparados.

O teste de delaminação foi realizado pelo método A da norma ASTM D 1101 (American..., 1994c) com algumas adaptações. Os corpos de prova foram imersos em água, com temperatura entre 18 e 27 °C, em uma autoclave até que sua superfície fosse totalmente coberta e submetidos a um vácuo de 508 mm Hg por 25 minutos. Após a retirada do vácuo, foi aplicada uma pressão de 2,7 Kgf.cm⁻² (270kPa) durante três horas. Em seguida, os corpos de prova foram colocados em estufa com temperatura de 67 °C durante 22 horas, sendo este ciclo repetido três vezes. Finalmente, foi verificado o grau de delaminação de cada bloco colado, através da medição do comprimento de separação das interfaces na linha de cola nas duas faces no final da grã de cada corpo de prova, em cada interface e depois foi calculada a porcentagem de delaminação em relação à largura total.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Resistência à tração normal

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos para o teste de resistência à tração normal às fibras e a massa específica aparente a 12% de umidade relativa. A média da massa específica dos tratamentos ficou entre 0,55-0,63 g.cm⁻³, sendo este intervalo considerado ideal para colagem. A análise de variância não mostrou diferenças entre a massa específica da madeira sólida e das juntas coladas (Tabela 2).

A resistência da madeira sólida foi superior à dos tratamentos, porém, segundo a norma da ABNT-NBR 7190 (Associação..., 1997), a segurança das peças estruturais não deve depender diretamente da resistência da tração normal às fibras. Caso seja verificado problema relacionado a essas tensões, devem ser empregados dispositivos que impeçam a ruptura.

A análise de variância para o teste de resistência à tração normal mostrou ao nível de 5% de probabilidade que a presença do metanol foi significativa (Tabela 2). A comparação entre médias

Tabela 2. Resultados obtidos para a análise de variância (valor F) para os testes de tração normal às fibras e cisalhamento na compressão paralela às fibras antes e após exposição a condições simuladas de serviço externo.

Table 2. Results obtained for analysis of variance (F values) for tensile and shear strength before and after exposure to weathering simulated conditions.

Fonte de variação	f_{tn}	$\rho_{12\% f_{tn}}$	f_v	$\rho_{12\% f_v}$	f_v^*
Tratamento x madeira sólida	-	0,74 ^{NS}	-	16,16 ^{**}	-
Adesivo	0,73 ^{NS}	-	0,42 ^{NS}	-	1,75 ^{NS}
Temperatura	0,83 ^{NS}	-	0,46 ^{NS}	-	4,95 [*]
Metanol	20,01 ^{**}	-	1,30 ^{NS}	-	0,13 ^{NS}
Adesivo*temperatura	1,80 ^{NS}	-	1,00 ^{NS}	-	7,20 ^{**}
Adesivo*metanol	0,13 ^{NS}	-	0,88 ^{NS}	-	3,36 [*]
Temperatura*metanol	0,24 ^{NS}	-	30,60 ^{**}	-	37,69 ^{**}
Adesivo*temperatura*metanol	2,12 ^{NS}	-	7,27 ^{**}	-	0,97 ^{NS}

Onde: f_{tn} : resistência à tração normal às fibras. $\rho_{12\% f_{tn}}$: massa específica aparente a 12% de umidade para os corpos de prova do teste de tração normal às fibras. f_v, f_v^* : limite de resistência ao cisalhamento na compressão paralela às fibras antes e após exposição às condições de serviço externo, respectivamente. $\rho_{12\% f_v}$: massa específica aparente a 12% de umidade para os corpos de prova do teste de cisalhamento na compressão paralela às fibras. * significativo a 95% de probabilidade. ** significativo a 99% de probabilidade. ^{NS}não significativo.

Tabela 3. Resultados obtidos para o teste de resistência à tração normal.

Table 3. Results obtained for tensile strength test.

Adesivo	Temperatura (°C)	Metanol	f_{tn} (MPa)	$\rho_{12\%}$ (g cm ⁻³)
Resorcinol	25	0%	1,68	0,57
		10%	2,11	0,57
	60	0%	1,30	0,58
		10%	1,86	0,62
Resorcinol-tanino (90:10)	25	0%	1,38	0,56
		10%	2,23	0,55
	60	0%	1,97	0,61
		10%	2,04	0,59
Resorcinol-tanino (90:10)	25	0%	1,72	0,63
		10%	2,16	0,60
	60	0%	1,36	0,56
		10%	2,11	0,57
Média			1,82	0,58
Madeira sólida			2,59	0,56

Onde: f_{tn} : resistência à tração normal às fibras. $\rho_{12\%}$: massa específica aparente a 12% de umidade.

através do teste de Tukey mostrou que os tratamentos com presença e ausência de metanol apresentaram valores médios de 2,08 e 1,57 MPa, respectivamente.

A Tabela 4 apresenta a análise qualitativa das juntas coladas. Apesar da maior parte da ruptura ocorrer na madeira, na maior parte dos tratamentos as resistências foram baixas ou regulares em relação ao valor característico que foi de 1,21 MPa, sendo o tratamento resorcinol-tanino (80:20) colado a 60 °C com 10% de metanol o único a apresentar

uma porcentagem maior de ocorrências de alta resistência.

Os resultados encontrados neste estudo diferem daqueles obtidos por Macêdo & Calil Jr. (1999) para madeira de pinus com massa específica média de 0,50 g cm⁻³. Os autores encontraram uma média para as juntas coladas com resorcinol superior à da madeira sólida; a maioria dos corpos de prova quebrou parte na madeira e parte na cola; e a resistência encontrada foi superior em relação ao valor característico da madeira.

Tabela 4. Análise qualitativa das juntas coladas de madeira na tração normal às fibras.**Table 4.** Qualitative analysis of wood glued joints for tensile strength test.

Adesivos	Temperatura (°C)	Modo de ruptura	Quantidade de metanol							
			0%				10%			
			Tipo de resistência							
B	R	A	%	B	R	A	%			
Resorcinol	25	Cola	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0
		Madeira	6	1	0	100,0	5	2	1	100,0
		Cola-madeira	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0
	60	Cola	2	1	0	30,0	0	0	0	0,0
		Madeira	4	0	0	40,0	5	1	0	100,0
		Cola-madeira	2	1	0	30,0	0	0	0	0,0
Resorcinol-tanino (90:10)	25	Cola	0	0	0	0,0	1	2	1	44,4
		Madeira	6	0	0	100,0	2	1	1	44,4
		Cola-madeira	0	0	0	0,0	1	0	0	11,1
	60	Cola	0	0	0	0,0	0	0	1	12,5
		Madeira	4	4	0	88,9	4	0	1	62,5
		Cola-madeira	1	0	0	11,1	1	1	0	25,0
Resorcinol-tanino (80:20)	25	Cola	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0
		Madeira	5	1	1	100,0	4	2	1	100,0
		Cola-madeira	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0
	60	Cola	4	0	0	40,0	0	0	0	0,0
		Madeira	4	0	0	40,0	4	0	4	100,0
		Cola-madeira	2	0	0	20,0	0	0	0	0,0

Onde: B: resistência baixa, próxima ao valor característico da madeira sólida. R: resistência regular, abaixo da média da madeira sólida, porém próxima (não inferior a 0,85 fm). A: resistência alta, maior que a média da madeira sólida.

3.2. Resistência ao cisalhamento na compressão paralela às fibras antes e após exposição a condições simuladas de serviços externos

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos para a resistência, teor de umidade e massa específica a 12 e 0% de umidade do teste de cisalhamento antes e após exposição ao ciclo, respectivamente. O teor de umidade da madeira encontrava-se entre 10% e 13%, sendo este intervalo considerado adequado para adesão (Forest Products Laboratory, 1999; Properzi et al., 2003). As massas específicas a 12 e 0% de umidade encontram-se entre 0,43 e 0,49 g.cm⁻³ e entre 0,40 e 0,47 g.cm⁻³, respectivamente.

Todos os resultados obtidos para a resistência ao cisalhamento da madeira colada antes do ciclo de exposição foram inferiores ao da madeira sólida, o qual pode ser explicado pela massa específica mais elevada da madeira sólida, que apresentou diferença significativa a 99% de probabilidade (Tabela 2). Para eliminar essa influência, foi calculada uma

resistência relativa em função da massa específica a 12%, e se pode observar que todos os tratamentos superaram a resistência da madeira sólida (Tabela 5).

Foi possível observar que todos os adesivos perderam resistência após o ciclo de exposição, com valores médios de 10,5 e 8,54 MPa antes e após à exposição, respectivamente. Nascimento et al. (2002) encontraram resultados semelhantes quando compararam a madeira colada com resorcinol com a madeira sólida de pinus com massa específica média de 0,51 g.cm⁻³. Os autores encontraram uma resistência média ao cisalhamento de 11,7 MPa para as juntas coladas e 8,3 MPa para a madeira sólida.

A norma ASTM D 2559 (American..., 1994b) exige para madeira de *Pinus* sp. com uma massa específica de 0,51g.cm⁻³ a 12% de umidade uma resistência média dos tratamentos superior a 9,04 MPa para madeira destinada a estruturas. Este valor situa-se bem abaixo dos valores encontrados no teste de cisalhamento antes da exposição, indicando que os tratamentos podem ser usados para serviços externos.

Tabela 5. Resultados obtidos para o teste de cisalhamento de juntas coladas de madeira antes e após exposição a condições de serviço externo.

Table 5. Results obtained for shear strength of wood glued joints before and after exposure to weathering simulated conditions.

Antes da exposição a condições de serviço externo							
Adesivo	Temperatura (°C)	Metanol	f _v (MPa)	TU (%)	ρ _{12%} (g.cm ⁻³)	ρ _{0%} (g.cm ⁻³)	MPa/g.cm ⁻³
Resorcinol	25	0%	10,7	13,0	0,47	0,44	22,7*
		10%	10,4	12,9	0,47	0,44	22,1*
	60	0%	9,9	12,2	0,45	0,43	22,1*
		10%	11,0	13,0	0,46	0,43	23,9*
Resorcinol-Tanino (90:10)	25	0%	11,8	13,2	0,47	0,44	25,0*
		10%	10,0	13,3	0,43	0,40	23,1*
	60	0%	9,0	12,9	0,43	0,41	20,9*
		10%	11,7	11,3	0,46	0,43	25,4*
Resorcinol-Tanino (80:20)	25	0%	10,6	13,0	0,46	0,43	23,0*
		10%	10,0	13,5	0,46	0,42	21,6*
	60	0%	10,3	13,1	0,44	0,42	23,3*
		10%	10,6	12,1	0,45	0,42	23,6*
Média			10,5	12,7	0,45	0,43	23,4
Madeira sólida			11,9	12,0	0,59	-	20,1
Após a exposição a condições de serviço externo							
Adesivo	Temperatura (°C)	Metanol	f _v * (MPa)	TU (%)	ρ _{12%} (g.cm ⁻³)	ρ _{0%} (g.cm ⁻³)	
Resorcinol	25	0%	9,0	10,7	0,46	0,44	
		10%	7,9	11,2	0,49	0,47	
	60	0%	8,5	11,1	0,46	0,43	
		10%	9,5	11,4	0,46	0,43	
Resorcinol-Tanino (90:10)	25	0%	9,3	10,9	0,47	0,45	
		10%	8,5	11,2	0,44	0,42	
	60	0%	6,5	11,3	0,43	0,41	
		10%	8,8	11,0	0,45	0,43	
Resorcinol-Tanino (80:20)	25	0%	9,6	10,9	0,46	0,43	
		10%	8,2	10,9	0,44	0,41	
	60	0%	8,1	11,2	0,44	0,42	
		10%	8,5	10,9	0,44	0,42	
Média			8,5	11,1	0,45	0,43	

onde: f_v: limite de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras. TU: teor de umidade. ρ_{12%}: massa específica aparente a 12% de umidade. ρ_{0%}: massa específica aparente da madeira anidra. MPa/g.cm⁻³: resistência em relação à massa específica. * tratamentos que atingiram a resistência da madeira sólida.

A análise de variância indicou diferenças significativas para as interações temperatura*metanol e adesivo*temperatura*metanol ao nível de 0,05 de probabilidade para os resultados de cisalhamento antes da exposição (Tabela 2). A Figura 2 apresenta a comparação entre as médias para a interação tripla adesivo*temperatura*metanol.

A Figura 2 também mostra uma tendência da influência do metanol na temperatura. Na temperatura de 25 °C os melhores resultados ocorreram sem metanol, e na temperatura 60 °C os melhores resultados ocorreram na presença

de metanol. Porém, essa relação foi realmente significativa somente para o adesivo resorcinol-tanino (90:10).

Para a resistência ao cisalhamento após o ciclo de intemperismo, a análise de variância revelou diferenças significativas entre as temperaturas e nas interações adesivo*temperatura, adesivo*metanol e temperatura*metanol (Tabela 2). Essas interações podem ser observadas nas Figuras 3, 4 e 5. Para a interação adesivo*temperatura, os adesivos resorcinol e resorcinol-tanino (80:20) não tiveram suas médias alteradas significativamente pela

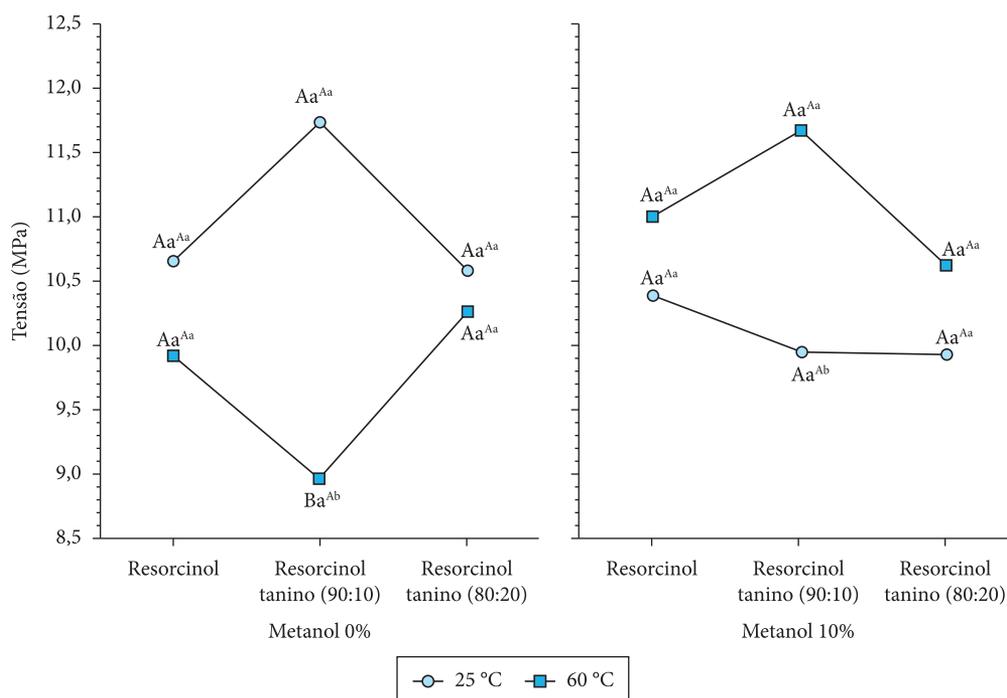


Figura 2. Interação tripla adesivo*temperatura*metanol para o teste de cisalhamento. Médias com a mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey ao nível de 5% de confiança. Letras maiúsculas: comparações entre um mesmo adesivo, mesma taxa de metanol e temperaturas diferentes. Letras minúsculas: comparações em uma mesma taxa de metanol, mesma temperatura e adesivos diferentes. Em sobrescrito: letras maiúsculas: comparação entre mesmo adesivo, diferentes temperaturas e taxa de metanol; letras minúsculas: comparação entre um mesmo adesivo, mesma temperatura e taxa de metanol diferente.

Figure 2. Interaction adhesive*temperature*methanol for shear strength test. Means with the same letter are not significantly different at 0.05% probability level of Tukey test. Capital letters: comparison between means of the same adhesive and methanol content and different temperatures. Lower case letters: comparison between the same methanol content and temperature and different adhesives. Superscript: capital letters: comparison between the same adhesive and different temperature and methanol content; lower case letters: comparison between same adhesive and temperature and different methanol content.

temperatura, enquanto que o adesivo resorcinol-tanino (10:90) mostrou uma melhor colagem a 25 °C (Figura 3). Para a interação adesivo*metanol, o adesivo resorcinol-tanino (90:10) apresentou um melhor resultado na presença de metanol, enquanto que os outros dois adesivos não tiveram suas médias alteradas pela presença de metanol (Figura 4). Para a interação temperatura*metanol, a presença de metanol diminuiu a resistência dos adesivos para a temperatura de 25 °C, enquanto que o oposto foi observado para a temperatura de 60 °C (Figura 5).

As Figuras 6 e 7 apresentam os resultados obtidos para a porcentagem de falha na madeira para os testes de cisalhamento antes e após exposição às condições simuladas de serviço externo. Antes do ciclo de exposição, quase todos os tratamentos

apresentaram altas porcentagens de falha na madeira (Figura 6). O adesivo resorcinol-tanino (80:20) com metanol colado à temperatura de 25 °C foi o único tratamento que apresentou uma média abaixo de 60%, não atendendo portanto à exigência da norma ASTM D 3110 (American..., 1994e). Resultados similares foram obtidos para a porcentagem de falha na madeira após a exposição ao intemperismo (Figura 7).

A Figura 8 apresenta a avaliação da adesão através da porcentagem de variação de resistência da linha de colagem após o ciclo de intemperismo (R). Todos os tratamentos perderam resistência. O adesivo resorcinol apresentou maior perda na temperatura a 25 °C com metanol, enquanto que

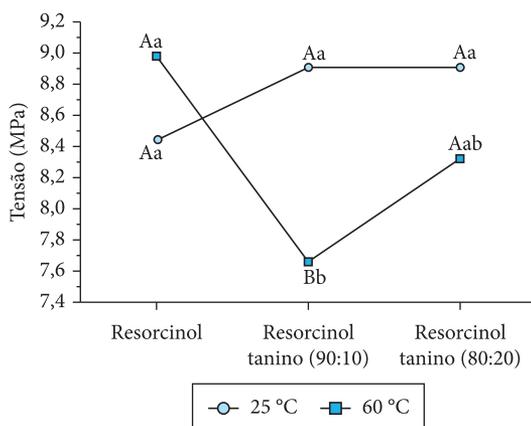


Figura 3. Interação adesivo*temperatura para o teste de cisalhamento após o ciclo de intemperismo. Médias com a mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey ao nível de 5% de confiança. Letras maiúsculas: comparações em um mesmo adesivo e temperaturas diferentes. Letras minúsculas: comparações em uma mesma temperatura e adesivos diferentes.

Figure 3. Interaction adhesive*temperature for shear strength test after exposure to weathering simulated conditions. Means with the same letter are not significantly different at 0.05% probability level of Tukey test. Capital letters: comparison between means of the same adhesive and different temperatures. Lower case letters: comparison between the same temperature and different adhesives.

nas demais situações, as médias foram praticamente iguais. O adesivo resorcinol-tanino (90:10) a 25 °C teve menor perda com metanol. Para o adesivo resorcinol-tanino (80:20), a menor perda ocorreu na temperatura ambiente sem metanol.

Os resultados encontrados na análise de variância para o teste de tração normal e cisalhamento antes e após a exposição ao intemperismo se complementam e confirmam os efeitos da temperatura e do metanol nos adesivos.

O resorcinol apresentou bons resultados com e sem metanol nas duas temperaturas, tanto para a resistência quanto para a qualidade da linha adesiva. Os resultados obtidos para a temperatura são similares àqueles encontrados por Vrazel (2002), que, estudando a diferença de resistência entre algumas formulações de adesivo com e sem aquecimento na madeira de pinus, constatou que não houve diferença

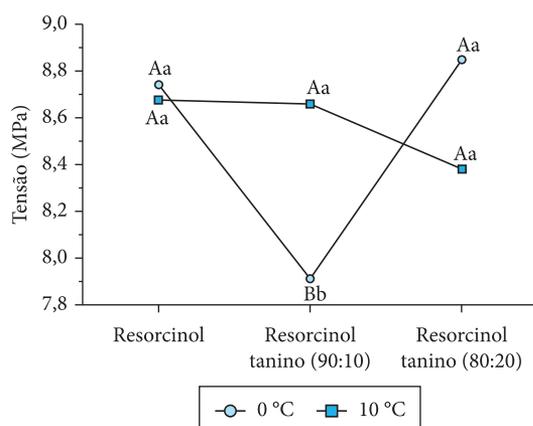


Figura 4. Interação adesivo*metanol para o teste de cisalhamento após o ciclo de intemperismo. Médias com a mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste de Duncan ao nível de 5% de confiança. Letras maiúsculas: comparações em uma mesma taxa de metanol e adesivos diferentes. Letras minúsculas: comparações em um mesmo adesivo e taxa de metanol diferente.

Figure 4. Interaction adhesive*methanol for shear strength test after exposure to weathering simulated conditions. Means with the same letter are not significantly different at 0.05% probability level of Duncan test. Capital letters: comparison between means of the same methanol content and different adhesives. Lower case letters: comparison between the same adhesive and different methanol contents.

significativa entre a cura do resorcinol com e sem aquecimento.

O adesivo resorcinol-tanino (90:10) apresentou melhores resultados a 25 °C com e sem metanol e a 60 °C com metanol. Em todas as situações, a composição apresentou alta porcentagem de falha e teve a resistência maior que a da madeira sólida. A viscosidade não chegou a prejudicar muito a qualidade da linha de cola, mas prejudicou a resistência à umidade e à temperatura.

O adesivo resorcinol-tanino (80:20) apresentou altas resistências em todos os tratamentos e foi a composição que menos perdeu resistência colada a 25 °C sem metanol. Porém, na composição a 25 °C com metanol, a sua porcentagem de falha foi baixa, isso pode ser explicado pelo fato do metanol ser um solvente orgânico e diminuir a quantidade de açúcares e outras substâncias não tânicas,

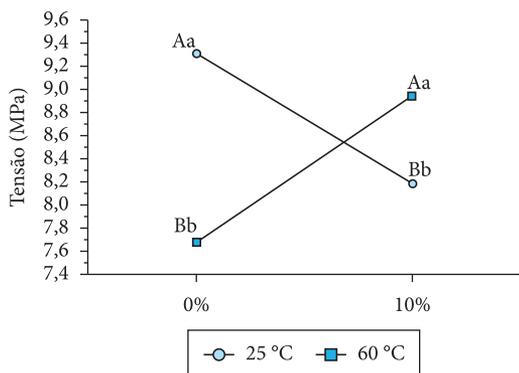


Figura 5. Interação temperatura*metanol para o teste de cisalhamento após o ciclo de intemperismo. Médias com a mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey ao nível de 5% de confiança. Letras maiúsculas: comparações em uma mesma taxa de metanol e temperaturas diferentes. Letras minúsculas: comparações em uma mesma temperatura e taxa de metanol diferente.

Figure 5. Interaction temperature*methanol for shear strength test after exposure to weathering simulated conditions. Means with the same letter are not significantly different at 0.05% probability level of Tukey test. Capital letters: comparison between means of the same methanol content and different temperatures. Lower case letters: comparison between the same temperature and different methanol contents.

diminuindo assim a viscosidade do adesivo. Isso não ocorre na colagem a 60 °C, pois o metanol se liga ao formaldeído, formando hemiacetais, os quais diminuem a velocidade de reação.

A colagem a 25 °C sem metanol em todas as composições, apresentou alta resistência, alta qualidade da linha de cola e alta resistência a condições de serviço externo. Além disso, essas composições apresentam um menor custo devido ao menor consumo de energia. Sendo assim, o adesivo resorcinol-tanino (80:20) é o mais recomendável devido ao menor custo e bom desempenho.

Os três melhores tratamentos do teste de cisalhamento após o ciclo de exposição foram submetidos ao teste de delaminação, sendo eles: o adesivo resorcinol-tanino (80:20) colado a 25 °C sem metanol (tratamento 1); o adesivo resorcinol-tanino (90:10) colado a 25 °C sem metanol (tratamento 2); e o adesivo resorcinol colado a 60 °C com metanol (tratamento 3) (Figura 9). Todos os tratamentos atenderam à exigência da norma ASTM D 2559 (American..., 1994b).

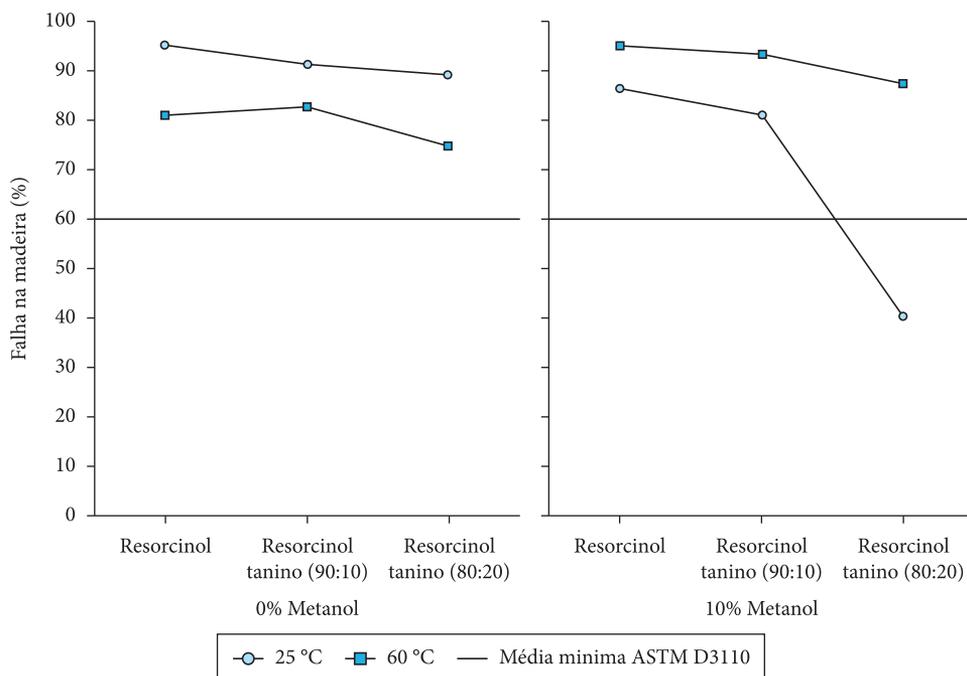


Figura 6. Porcentagem de falha na madeira para o teste de cisalhamento antes do ciclo de intemperismo. * Não alcançou a exigência da norma ASTM D 3110.

Figure 6. Wood failure percentage for shear strength before exposure to weathering simulated conditions. *Did not reach the requirements of the ASTM D 3110 standard.

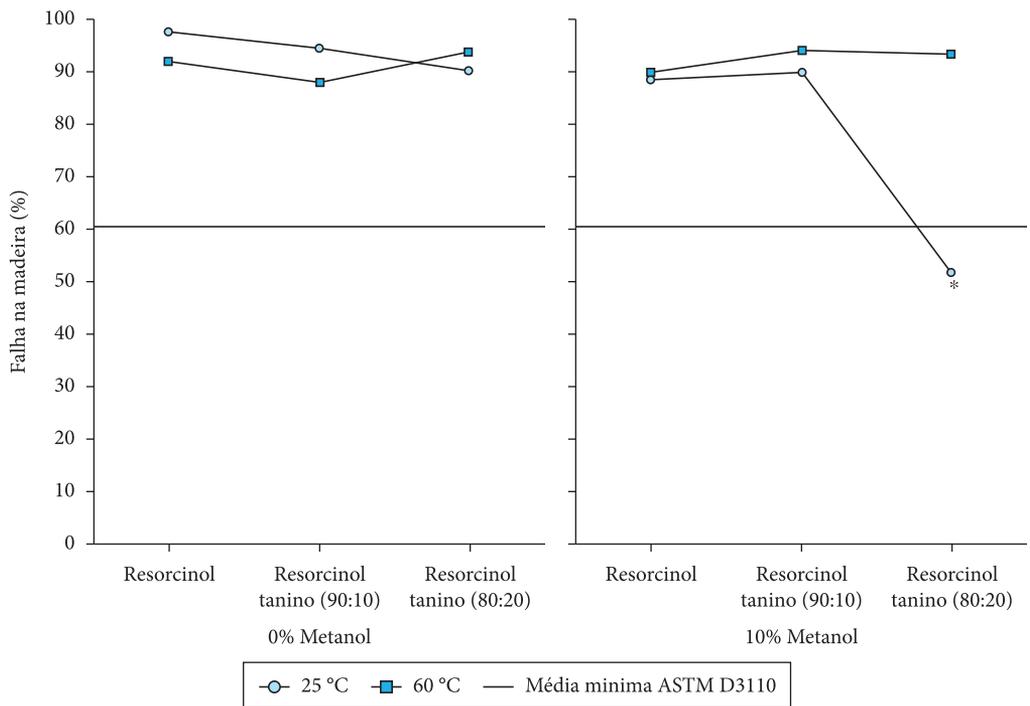


Figura 7. Porcentagem de falha na madeira para o teste de cisalhamento após o ciclo de intemperismo. *Não alcançou a exigência da norma ASTM D 3110.

Figure 7. Wood failure percentage for shear strength after exposure to weathering simulated conditions. *Did not reach the requirements of the ASTM D 3110 standard.

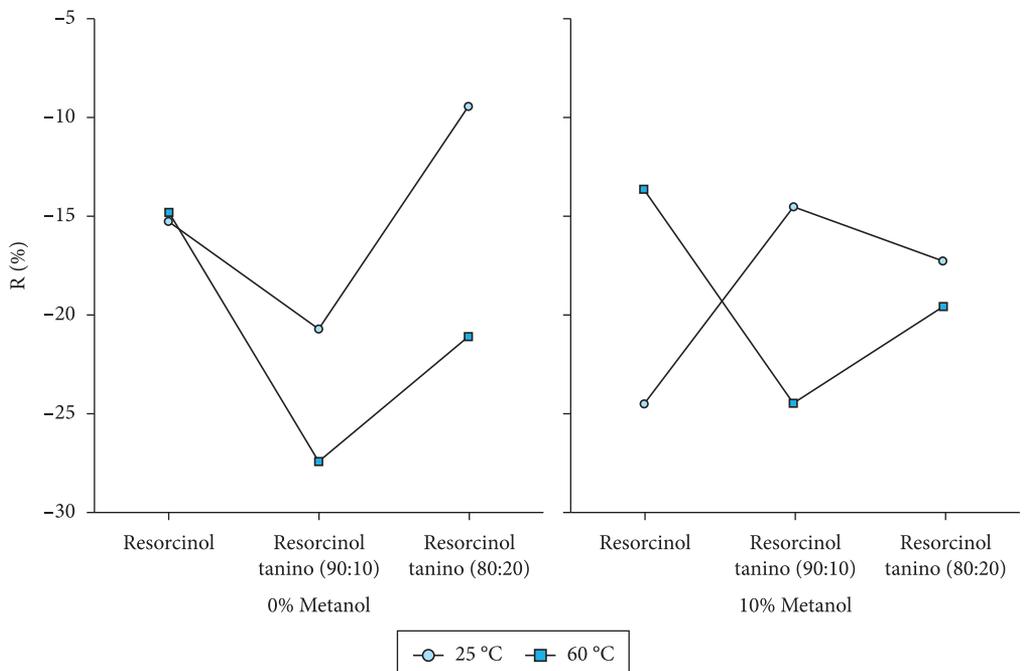


Figura 8. Porcentagem de variação de resistência da linha de cola após o ciclo de intemperismo (R).

Figure 8. Variation percentage of bond line strength after exposure to weathering simulated conditions (R).

Segundo a APA (The Engineered..., 2002), um adesivo pode ser classificado quanto a sua qualidade em quatro classes:

- externo: podem ser expostos ao ar livre ou em lugares onde haja uma grande variação de umidade e temperatura, por longo tempo, sem que haja modificação na sua resistência (ex. passarelas e pontes);
- exposição 1: pode ser usado em lugares onde haja variação das condições ambientais, porém, com algumas restrições (ex. vigas de telhado);
- exposição 2; e
- interno. Estes dois últimos podem ser usados somente em ambientes bem protegidos, porém o primeiro pode ser usado em ambiente em que possivelmente possam ocorrer variações ocasionais de umidade e temperatura. De acordo com esta classificação, os tratamentos que tiveram os melhores resultados em ambas as madeiras podem ser classificados para uso externo.

4. CONCLUSÕES

- A colagem a 25 °C apresentou bons resultados para todos os adesivos. A colagem a 60 °C diminuiu a resistência do adesivo resorcinol-tanino (90:10).
- A presença de metanol melhorou a qualidade da linha de cola dos três adesivos a 60 °C, e diminuiu a qualidade da linha de cola do adesivo resorcinol-tanino (80:20) a 25 °C e da resistência

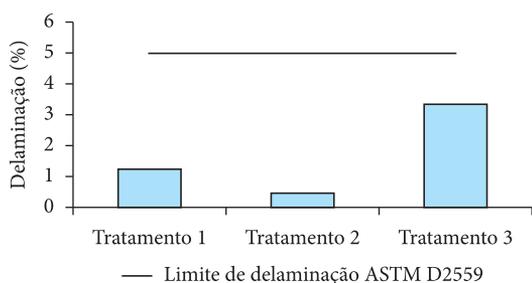


Figura 9. Porcentagem de delaminação e comparação com a norma ASTM D 2559. Tratamento 1: adesivo resorcinol-tanino (80:20) a 25 °C, sem metanol. Tratamento 2: adesivo resorcinol-tanino (90:10) a 25 °C, sem metanol. Tratamento 3: adesivo resorcinol a 60 °C, com metanol.

Figure 9. Delamination percentage and comparison with ASTM D 2559 standard. Treatment 1: resorcinol-tannin adhesive (80:20) at 25 °C, without methanol. Treatment 2: resorcinol-tannin (90:10) at 25 °C, without methanol. Treatment 3: resorcinol adhesive at 60 °C, with methanol.

nas condições de serviço externo do adesivo resorcinol a 25 °C.

- Os tratamentos apresentaram restrições quanto à tração normal.
- Os adesivos testados apresentaram pequenas taxas de delaminação.
- O adesivo resorcinol-tanino (80:20), sem metanol, colado à temperatura ambiente, seria o mais recomendável para a madeira de pinus devido ao menor custo e bom desempenho.
- Todos os adesivos colados a 25 °C e os adesivos resorcinol-tanino (90:10) e (80:20) colados a 60 °C com metanol podem ser usados em serviço externo para a madeira de pinus.

STATUS DA SUBMISSÃO

Recebido: 30/03/2010

Aceito: 02/02/2011

Resumo publicado online: 03/03/2011

Artigo completo publicado: 31/03/2011

AUTOR(ES) PARA CORRESPONDÊNCIA

Delanie Lima da Costa Tienne

Instituto de Florestas,

Departamento de Produtos Florestais,

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro,

BR 465, Km 07, CEP 23890-000,

Seropédica, RJ, Brasil

e-mail: delanieufrj@hotmail.com

REFERÊNCIAS

American Society for Testing and Materials – ASTM. *ASTM D 1183*. Resistance of adhesives to cyclic laboratory aging conditions. ASTM Standards, 1994a. p. 405-407. Annual book.

American Society for Testing and Materials – ASTM. *ASTM D 2559*. Standard specification for adhesives for structural laminated wood products for use under exterior (wet use) exposure conditions. ASTM Standards, 1994b. p. 154-158. Annual book.

American Society for Testing and Materials – ASTM. *ASTM D 1101*. Standard test method for integrity for glue joints in structural laminated wood products for exterior use. ASTM Standards, 1994c. p. 54-56. Annual book.

American Society for Testing and Materials – ASTM. *ASTM D 143*. Standard methods of testing small clear

- specimens of timber. ASTM Standards, 1994d. p. 24-65. Annual book.
- American Society for Testing and Materials – ASTM. *ASTM D 3110*. Standard specification for adhesives used in nonstructural glued lumber products. ASTM Standards, 1994e. p. 184-192. Annual book.
- American Society for Testing and Materials – ASTM. *ASTM D 905*. Standard test method for strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading. ASTM Standards, 1994f. p. 20-26. Annual book.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. *NBR 7190*. Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107 p.
- Costa DL, Nascimento AM, Tostes AS, Lelis RCC. Determinação do tempo de formação de gel de adesivos fenólicos compostos. In *Anais da XII Jornada de Iniciação Científica*; 2002; Seropédica. Seropédica: UFRRJ; 2002. p. 73-74.
- Forest Products Laboratory. *Wood handbook: wood as an engineering material*. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory; 1999. 463 p. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113.
- Gornik D, Hemingway RW, Tišler V. Tannin-based cold-setting adhesives for face lamination of wood. *Holz Roh- Werkst* 2000; 58:23-30.
- Grigsby W, Warnes J. Potential of tannin extracts as resorcinol replacements in cold cure thermoset adhesives. *Holz Roh- Werkst* 2004; 62:433-438.
- Laufenberg T. Exposure effects upon performance of laminated veneer lumber and glulam materials. Strength LVL from thin laminated veneers. *For. Prod. J.* 1982; 32(5): 42-48.
- Macêdo NA, Calil Jr. C. Estudo de emendas dentadas em madeira laminada colada (MLC): avaliação de método de ensaio – NBR 7190/1997. *Cad Eng Estrut* 1999; 7: 23.
- Matthiesen JA. Estudo das emendas biseladas em madeira laminada colada. In *Anais do VI Encontro Brasileiro em Madeira e em Estrutura de Madeira*; 1998; Florianópolis. Florianópolis: UFSC; 1998. p. 345-356.
- Melo AV, Mantilla Carrasco EVM. Análise de adesivos em madeira laminada colada. In *Anais do IX Encontro Brasileiro em Madeira e em Estrutura de Madeira*; 2004; Cuiabá. Cuiabá: UFMT; 2004.
- Nascimento AM, Della Lucia RM, Costa DL. Simulação do comportamento de vigas laminadas coladas expostas a condições de serviço externo. In *Anais da XIII Jornada de Iniciação Científica na UFRRJ*; 2003; Rio de Janeiro. Seropédica: UFRRJ; 2003. p. 229-232.
- Nascimento AM, Lelis RCC, Costa DL, Oliveira CS. Comportamento de ligações adesivas em madeira de reflorestamento. *Floresta Ambient* 2002; 9(1): 54-62.
- Petrauski SMFC, Volpato AS, Setti R, Dias VX, Petrauski A. Estudo do comportamento de vigas em madeira laminada colada confeccionadas com *Eucalyptus grandis* e *Pinus sp.* In *Anais do IX Encontro Brasileiro em Madeira e em Estrutura de Madeira*; 2004; Cuiabá. Cuiabá: UFMT; 2004.
- Pizzi, A. Natural phenolic adhesives I: Tannin. In Pizzi A, Mittal KL. *Handbook of adhesive technology*. New York: Marcel Dekker; 1994. p. 347-358.
- Properzi M.; Pizzi, A.; Uzielli, L. Comparative wet wood gluing performance of different types of Glulam wood adhesives. *Holz Roh- Werkst* 2003; 61: 77-78.
- Szücs CA, Graeff A, Silva RH, Siles MHP. Influência da diluição do adesivo na composição do adesivo na composição da madeira laminada colada. In *Anais do Encontro Brasileiro em Madeira e em Estrutura de Madeira*; 1998; Florianópolis. Florianópolis: UFSC; 1998. p. 315-324.
- The Engineered Wood Association - APA. *Bond classification*. Technical topics. Technical Services Division, 2002. p. 1.
- Vrazel ME. *The effects of species, adhesive type, and cure temperature on the strength and durability of a structural finger joint* [dissertação]. Mississippi, EUA: Department of Forest Products-MSU; 2002.