

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA
COLAGEM DA MADEIRA DE *Eucalyptus
grandis* W. Hill ex Maiden COM ADESIVO
TERMOENDURECEDOR RESORCINOL-
FORMALDEÍDO**

VANESSA CRISTINA DO SACRAMENTO ALBINO

2009

VANESSA CRISTINA DO SACRAMENTO ALBINO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA COLAGEM
DA MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* W. Hill ex
Maiden COM ADESIVO TERMOENDURECEDOR
RESORCINOL-FORMALDEÍDO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Processamento e Utilização da Madeira, para obtenção do título de “Mestre”.

Orientador
Prof. Fábio Akira Mori

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL
2009

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Albino, Vanessa Cristina do Sacramento.

Estudo do comportamento da colagem da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden com adesivo termoendurecedor resorcinol-formaldeído / Vanessa Cristina do Sacramento Albino. – Lavras : UFLA, 2009.

89 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2009.

Orientador: Fábio Akira Mori.

Bibliografia.

1. Eucalipto. 2. Juntas coladas. 3. Posição radial e longitudinal.
I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 674.835

VANESSA CRISTINA DO SACRAMENTO ALBINO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA COLAGEM
DA MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* W. Hill ex
Maiden COM ADESIVO TERMOENDURECEDOR
RESORCINOL-FORMALDEÍDO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Processamento e Utilização da Madeira, para obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA em 26 de novembro de 2009.

Prof. Lourival Marin Mendes UFLA

Prof. Alexandre M. Nascimento UFRRJ

Prof. Fábio Akira Mori
UFLA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL

AGRADECIMENTOS

A Deus, por iluminar meu caminho e dar forças para seguir sempre em frente.

Aos meus pais, pela educação base para minha vida e apoio nos meus estudos.

Agradeço ao meu marido, amor da vida, pela paciência, pelo incentivo, por toda a ajuda nos momentos difíceis, por todas as críticas e soluções. Sem você tudo seria muito mais difícil.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fábio Akira Mori, por sua dedicação, paciência, sensibilidade e apoio ao longo desta jornada.

Aos professores Lourival (UFLA) e Alexandre (UFRRJ), pela disposição em colaborar e pela participação na banca examinadora.

A CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela concessão de bolsa.

Aos funcionários e docentes do Programa de Ciência e Tecnologia da Madeira que de alguma forma contribuíram para o meu crescimento e deram apoio.

A todas as minhas amigas, pelos momentos de descontração, auxílio e estímulo. A amizade surge quando aprendemos a admirar as qualidades de algumas pessoas que com sua simples presença consegue nos fazer feliz.

E a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para esta dissertação tornar-se realidade, MUITO OBRIGADA.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	ii
RESUMO GERAL.....	iv
GENERAL ABSTRACT.....	v
CAPÍTULO 1.....	1
1 Introdução Geral.....	2
2 Referencial Teórico	4
2.1 O Gênero <i>Eucalyptus</i>	4
2.2 Madeira Laminada colada.....	7
2.2.1 Aspectos gerais.....	7
2.2.2 Vantagens da madeira laminada colada.....	8
2.2.3 Usos da madeira laminada colada.....	9
2.3 Colagem da madeira.....	9
2.4 Aspectos do adesivo resorcinol-formaldeído.....	12
2.5 Aspectos anatômicos da madeira.....	14
2.6 Extrativos totais da madeira.....	17
3 Referências Bibliográficas	18
CAPÍTULO 2: Estudo da colagem da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> W. Hill ex Maiden com adesivo resorcinol-formaldeído.....	22
1 Resumo	23
2 Abstract	24
3 Introdução.....	25
4 Material e Métodos.....	28
4.1 Material de estudo e caracterização da área.....	28
4.2 Obtenção das tábuas.....	29
4.3 Determinação da densidade básica.....	30
4.4 Confeção das juntas coladas, determinação das propriedades físico- químicas do adesivo e avaliação da colagem nas diferentes posições da tora.....	30
5 Resultados e discussão.....	32
5.1 Densidade Básica da madeira.....	32
5.2 Propriedades físico-químicas do adesivo e tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento à tração.....	33
5.3 Percentagem de falha na madeira.....	38
6 Conclusões.....	41
7 Referências Bibliográficas	41

CAPÍTULO 3: Influência das características anatômicas e do teor de extrativos totais da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> W. Hill ex Maiden na colagem com adesivo resorcinol-formaldeído.....	44
1 Resumo.....	45
2 Abstract	46
3 Introdução.....	47
4 Material e métodos.....	49
4.1 Material de estudo e caracterização da área.....	49
4.2 Obtenção das tábuas.....	49
4.3 Caracterização anatômica e determinação do teor de extrativos totais.....	50
4.4 Confeção e avaliação das juntas coladas.....	52
4.5 Análise estatística dos dados.....	53
5 Resultados e discussão.....	53
5.1 Características anatômicas, teor de extrativos totais, resistência ao cisalhamento e percentagem de falha na madeira nas diferentes posições da tora.....	53
5.2 Relação das características anatômicas e o teor de extrativos totais da madeira com a qualidade da colagem.....	57
6 Conclusões.....	60
7 Referências Bibliográficas	61
CAPÍTULO 4: Estudo da interface madeira - adesivo de juntas coladas com resorcinol- formaldeído e madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> W. Hill ex Maiden.....	65
1 Resumo.....	66
2 Abstract.....	67
3 Introdução.....	68
4 Material e métodos.....	70
4.1 Material de estudo e caracterização da área.....	70
4.2 Obtenção das tábuas.....	71
4.3 Confeção das juntas coladas e avaliação da colagem nas diferentes posições da tora.....	72
4.4 Visualização da interface madeira-adesivo.....	73
5 Resultados e discussão.....	75
5.1 Interface madeira-adesivo	75
5.2 Relação entre espessura da linha de cola principal e a qualidade de colagem para as posições radial e longitudinal.....	79
6 Conclusões.....	82
7 Referências Bibliográficas.....	83
ANEXOS.....	85

LISTA DE FIGURAS

		Página
FIGURA 1	Estrutura química do resorcinol.....	12
FIGURA 2	Esquema de obtenção das tábuas.....	29
FIGURA 3	Esquema ilustrativo da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> contendo os valores de densidade básica (g/cm^3) para as posições: longitudinal e radial, ao longo da tora.....	32
FIGURA 4	Gráfico de correlação entre densidade básica da madeira e a tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento à tração, para a posição radial da tora de <i>Eucalyptus grandis</i>	35
FIGURA 5	Esquema de obtenção das tábuas.....	50
FIGURA 6	Esquema de obtenção das tábuas.....	71
FIGURA 7	Esquema de corte do bloco central.....	74
FIGURA 8	Esquema da mensuração da espessura da linha de cola....	74
FIGURA 9	Fotomicrografia da interface madeira-adesivo (face transversal -aumento de 20x).....	75
FIGURA 10	Fotomicrografia da interface madeira-adesivo (face transversal- aumento de 100x).....	75
FIGURA 11	Fotomicrografia da interface madeira-adesivo (face transversal- aumento de 100x).....	75
FIGURA 12	Fotomicrografia da interface madeira-adesivo (face transversal- aumento de 200x).....	75
FIGURA 13	Fotomicrografia da interface madeira-adesivo (face transversal- aumento de 400x).....	76
FIGURA 14	Fotomicrografia da interface madeira-adesivo (face transversal- aumento de 400x).....	76
FIGURA 15	Fotomicrografia da interface madeira-adesivo (face transversal- aumento de 400x).....	76
FIGURA 16	Fotomicrografia da interface madeira-adesivo (face longitudinal aumento de 100x).....	76
FIGURA 17	Fotomicrografia da interface madeira-adesivo (face longitudinal- aumento de 200x).....	77

FIGURA 18	Fotomicrografia da interface madeira-adesivo (face longitudinal- aumento de 200x).....	77
-----------	--	----

LISTA DE TABELAS

		Página
TABELA 1	Propriedades físico-químicas do adesivo resorcinol-formaldeído.....	33
TABELA 2	Resumo da ANOVA fatorial para tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento seco (tr seco) e após fervura (tr após fervura).....	34
TABELA 3	Valores médios de tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento seco (Mpa).....	35
TABELA 4	Valores médios de tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento após fervura (Mpa) de acordo com as posições: longitudinal e radial.....	37
TABELA 5	Valores percentuais de redução da tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento à tração (teste seco) para tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento à tração (teste após fervura).....	38
TABELA 6	Resumo da ANOVA fatorial para a percentagem de falha na madeira em relação à tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento seco (tr seco) e após fervura (tr após fervura).....	39
TABELA 7	Valores médios de percentagem de falha na madeira em relação à tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento seco e após fervura para as posições: longitudinal e radial.....	39
TABELA 8	Valores médios para as características anatômicas, teor de extrativos totais, resistência ao cisalhamento e percentagem de falha na madeira para a posição radial do tronco da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i>	54

TABELA 9	Valores médios para as características anatômicas, teor de extrativos totais, resistência ao cisalhamento e percentagem de falha na madeira para a posição longitudinal do tronco da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i>	55
TABELA 10	Coefficiente de correlação de Pearson entre as características anatômicas e o teor de extrativos totais da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> com a qualidade das juntas coladas com adesivo resorcinol-formaldeído quanto à resistência ao cisalhamento e percentagem de falha na madeira.....	58
TABELA 11	Variação da espessura da linha de cola (μm), densidade básica da madeira, tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento (Mpa) e percentagem de falha na madeira (%) do adesivo resorcinol-formaldeído para a posição radial.....	80
TABELA 12	Variação da espessura da linha de cola (μm), densidade básica da madeira, tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento (Mpa) e percentagem de falha na madeira (%) do adesivo resorcinol-formaldeído para a posição longitudinal.....	80

RESUMO GERAL

ALBINO, Vanessa Cristina do Sacramento. **Estudo do comportamento da colagem da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden com adesivo termoendurecedor resorcinol-formaldeído**. 2009. 89 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras. •

O trabalho teve como objetivo avaliar a resistência de juntas coladas com adesivo termoendurecedor resorcinol-formaldeído provenientes de três posições radiais e três posições longitudinais da tora da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden (Myrtaceae), com idade de 18 anos, correlacionar a densidade básica da madeira, às características anatômicas e o teor de extrativos totais com a qualidade da colagem, visualizar a interface madeira-adesivo, mensurar a espessura da linha de cola e correlacionar essa variável com a qualidade da colagem das juntas produzidas. As juntas coladas foram preparadas de acordo com a norma ASTM D 2339-98. Para a análise dos dados, utilizou-se o modelo de delineamento inteiramente casualizado e o teste Scott-Knott a 95% de probabilidade para a comparação das médias. Houve tendência de aumento nos valores médios da densidade básica no sentido medula-casca e no sentido longitudinal não houve variação significativa. Os valores médios mais elevados de resistência ao cisalhamento foram obtidos em juntas provenientes das posições próximas à casca e à base da tora. A menor percentagem de falha na madeira foi obtida em juntas provenientes das posições próximas à base e à casca da tora. Foram preparadas lâminas histológicas para o estudo anatômico. A determinação do teor de extrativos totais realizou-se de acordo com a norma ABTCP M 3/69 (ABTCP, 1974). Utilizou-se o coeficiente de correlação de Pearson, a 1% de probabilidade pelo teste t de Student, na análise estatística dos dados. Verificou-se que houve correlação entre resistência ao ensaio de cisalhamento com as seguintes características: diâmetro do vaso, largura da parede, largura e o comprimento da fibra, largura do raio e teor de extrativos totais. E em relação à percentagem de falha na madeira, houve correlação entre esta com as seguintes características: frequência de vasos, espessura do lume da fibra, frequência e altura do raio. Para a visualização da interface madeira-adesivo retirou-se duas juntas coladas de cada região (radial e longitudinal) da tora. Foi possível caracterizar a linha de cola produzida pela ligação entre o adesivo e a madeira. Houve a penetração do adesivo nos vasos, nas fibras e nos raios, sendo que nas placas de perfuração não houve a

• Comitê Orientador: Fábio Akira Mori – UFLA (Orientador), Lourival Marin Mendes – UFLA.

penetração do adesivo. A espessura da linha de cola principal variou no sentido radial e longitudinal.

GENERAL ABSTRACT

ALBINO, Vanessa Cristina do Sacramento. **Study of the bonding of *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden thermosetting adhesive resorcinol-formaldehyde.** 2009. 89 p. Dissertation (Master in Science and Technology of Wood) – Universidade Federal de Lavras, Lavras. *

The study aimed to evaluate the resistance of bonded joints with thermosetting adhesive resorcinol-formaldehyde from three radial positions and three positions of the longitudinal log of *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden (Myrtaceae), 18 old years, to correlate the basic density of wood anatomical characteristics and the total extractives content of the species concerned with the quality of bonding, the interface view wood - adhesive, measure the thickness of the line glue and correlate this variable with the quality of glue joints produced. The bonded joints were prepared in accordance with ASTM D 2339 -98. For data analysis, we used the model of a completely randomized and Scott-Knott test at 95% probability for the comparison of means. There was a trend in the average values of the density in the pith-bark and longitudinally no significant variation. The higher average values of shear strength of joints were obtained from the positions close to the shell and the base of the log. A lower percentage of wood failure in joints was obtained from the positions near the base and the bark of the log. Histological slides were prepared for anatomical study. The determination of the total extractives content and the preparation of bonded joints were held in accordance with the standards ABTCP M 3 / 69 ABTCP (1974) and ASTM D 2339 -98, respectively. We used the correlation coefficient of Pearson, the 1% probability by t test, analysis of the data. It was found that there was no correlation between resistances to shear tests with the following characteristics: vessel diameter, wall width, length and width of the fiber, the width of the radius and total extractives content. And the percentage of wood failure, there was a correlation between this with the following characteristics: the frequency of vessels, thickness of the heat of fiber, and high frequency of lightning. To visualize the wood-adhesive interface withdrew two bonded joints of each region (radial and longitudinal) of the log. It was possible to characterize

* Guidance Committee: Fábio Akira Mori - UFLA (Adviser), Lourival Marin Mendes - UFLA.

the line of glue produced by the connection between the adhesive and wood. There was penetration of the adhesive in vessels, fibers and rays, and the perforation plates there was no penetration of the adhesive. The thickness of glue line main ranged in a radial and longitudinal.

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO GERAL

A grande procura das empresas florestais por espécies do gênero *Eucalyptus* como fonte de matéria-prima se deve ao fato deste gênero possuir rápido crescimento, boa produtividade, grande capacidade de adaptação, inúmeras aplicações em diferentes setores e, além disso, a demanda por essa madeira aumenta a cada dia.

Para que se possam obter novos produtos a partir do eucalipto tornam-se necessários vários estudos anatômicos, físicos, químicos e mecânicos dessa madeira, a fim de fornecer informações capazes de generalizar o seu aproveitamento. Com relação à colagem da madeira de eucalipto, os trabalhos são escassos, principalmente em relação à madeira sólida.

A madeira sólida não é um produto homogêneo, pois possui uma estrutura heterogênea e anisotrópica, com características próprias e limitações quanto ao seu emprego. As dimensões quanto ao comprimento e largura das peças de madeira a serem obtidas são diretamente limitadas ao diâmetro e altura das árvores que as originaram.

Neste contexto, a reconstituição da madeira maciça em madeira laminada colada apresenta-se como uma alternativa de melhorar o aproveitamento da matéria-prima, sendo que esta técnica depende da tecnologia dos adesivos empregados no processo de colagem e da espécie a ser utilizada. A combinação perfeita desses elementos é que resultará num produto final de boa qualidade.

Como a madeira apresenta uma estrutura heterogênea, é necessário conhecer a variabilidade dos elementos que a constituem nas diferentes posições do tronco, pois isso pode provocar interações diferentes entre o adesivo e a madeira e conseqüentemente interferir no desempenho da colagem.

A estrutura anatômica, a constituição química e a densidade da madeira de uma espécie influenciam diretamente na colagem. A influência da estrutura anatômica está relacionada às diferenças das dimensões dos elementos celulares, disposição e frequência, que por sua vez vão afetar a mobilidade e penetrabilidade do adesivo na madeira. A densidade está relacionada com a porosidade exercendo influência direta na colagem. A constituição química, principalmente os extrativos, pode provocar um fraco desempenho na linha de cola, uma vez que eles podem reagir com o adesivo empregado.

A tecnologia de desenvolvimento de classes de adesivos sintéticos é alta, devido ao grande avanço da química. Várias classes de adesivos existem, devendo ser estudadas as que melhor se adaptem e interajam com a madeira de *Eucalyptus*.

Dentre as diferentes classes de adesivos existentes, os adesivos a base de resorcinol, que é um termoendurecedor, são muito utilizados na confecção de vigas estruturais, uma vez que estes adesivos apresentam uma excelente resistência, porém os mesmos possuem um custo muito elevado, quando comparados as outras classes de adesivos. Como é muito utilizado é necessário conhecer a interação do adesivo resorcinol com a madeira propriamente dita, fornecendo assim informações que poderão ajudar na fabricação de novos produtos.

A necessidade de obter produtos de madeira laminada de boa qualidade que poderão ser utilizados como vigas estruturais nas construções civis e a necessidade de fazer com que os custos destes produtos sejam mais baixos utilizando madeira de reflorestamento, faz com que maiores estudos sejam realizados, o que permitirá conhecer melhor o comportamento da colagem com a madeira de eucalipto.

Sendo assim, os objetivos deste trabalho foram os seguintes:

- 1) Avaliar a qualidade de juntas coladas, provenientes de três posições longitudinais e três posições radiais da tora da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, utilizando o adesivo termoendurecedor resorcinol-formaldeído e determinar a variação da densidade básica no sentido longitudinal e radial da tora e avaliar a influência desta variável nas propriedades de colagem.
- 2) Caracterizar anatomicamente e quantificar o teor de extrativos totais em diferentes posições da tora e avaliar a influência dessas características sobre a resistência ao cisalhamento e percentagem de falha na madeira das juntas coladas.
- 3) Visualizar a interface madeira-adesivo, mensurar a espessura da linha de cola principal e correlacionar essa variável com a resistência ao cisalhamento e percentagem de falha na madeira utilizando juntas coladas provenientes das posições: radial e longitudinal.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O Gênero *Eucalyptus*

No Brasil, as florestas plantadas, estão distribuídas estrategicamente, em sua maioria, nos estados do Paraná, Rio Grande do Sul, Santa Catarina, São Paulo, Minas Gerais e Espírito Santo. Tais florestas visam garantir o suprimento de matéria-prima para as indústrias de papel e celulose, siderurgia, lenha, serrados, compensados, lâminas e painéis (aglomerados, chapas de fibras e MDF).

O eucalipto foi introduzido no Brasil em 1904, com o objetivo de suprir as necessidades de lenha, postes e dormentes das estradas de ferro na região Sudeste. Na década de 50 passou a ser produzido, como matéria prima, para o

abastecimento das fábricas de papel e celulose. Durante o período dos incentivos fiscais, na década de 60, sua expansão foi ampliada. Esses incentivos perduraram até meados dos anos 80. Esse período foi considerado um marco na silvicultura brasileira visto os efeitos positivos que foram gerados no setor. A partir do término dos incentivos fiscais houve um crescimento marginal negativo no plantio de eucaliptos. Exceção disso ocorreu naqueles feitos independentes dos investimentos das indústrias de papel e celulose e de siderúrgicas a carvão vegetal (Dossa, 2003).

Pertencente à família das Mirtáceas, o eucalipto é nativo da Austrália, onde cobre 90% da área do país, formando densos maciços florestais nativos. Engloba cerca de 670 espécies e apenas duas delas, *Eucalyptus urophylla* e *E. deglupta*, têm ocorrência natural fora do território australiano. Além do elevado número de espécies, existe um número muito grande de variedades e híbridos (Silva, 2001).

A disseminação das sementes de eucaliptos no mundo começou no início do século XIX. Hoje, as espécies mais utilizadas no mundo são o *Eucalyptus grandis*, *E. urophylla*, *E. camaldulensis*, *E. saligna*, *E. citriodora*, *E. globulus*, *E. viminalis* e *E. tereticornis*, direcionados para fins bastante diversificados, como celulose, papel, lenha e carvão vegetal (Lima, 2006).

Com relação à espécie *Eucalyptus grandis* ela é nativa da Nova Gales do Sul e da costa sul de Queensland, na Austrália. Distribui-se principalmente entre as latitudes 26° a 32° Sul e altitudes de 0-300 m e se adapta muito bem em regiões com precipitações entre 1000 e 1750 mm e valores de temperaturas médias máximas entre 29-32°C e médias mínimas entre 5- 6°C (Food and Agriculture Organization of United Nation – FAO, 1981). É a mais plantada no mundo devido às suas características silviculturais desejáveis e a aplicabilidade da madeira para diversos fins, aliada à grande variabilidade genética e à facilidade de aquisição de sementes em quantidade e qualidade (Martins, 1999).

Seguindo uma tendência mundial, as empresas florestais buscam novas alternativas para agregar maior valor aos seus produtos. Associada a isso, a madeira continua sendo a matéria-prima principal para um grande número de produtos, tornando-se necessária a adequação de espécies de rápido crescimento para suprir a demanda que recai sobre as florestas nativas. Dessa forma, o eucalipto é uma opção potencial para utilização em produtos de maior valor agregado, como sólidos de madeira, o que inclui madeira serrada, movelaria, construção civil, madeira processada para produção de aglomerados, chapas de fibra, lâminas e outros (Lima, 2006).

Em relação à colagem da madeira de eucalipto, alguns estudos já foram realizados como o de Vital et al. (2006) que avaliaram a resistência de juntas coladas formadas pelas combinações de lâminas provenientes de três posições no tronco da madeira de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*. Os autores encontraram valores médios mais elevados de resistência ao cisalhamento para juntas produzidas com madeira de *Eucalyptus saligna*, coladas com adesivos de poliacetato de média viscosidade e resorcinol-formaldeído. As combinações de lâminas oriundas das seguintes posições no tronco: medula e casca, intermediária e casca e casca e casca resultaram em linhas de cola com maiores resistências ao cisalhamento.

Melloto (2007) verificando a capacidade de carga ao cisalhamento no plano de cola de corpos de prova de *Eucalyptus grandis* preparados com um adesivo sem solvente, concluiu que a temperatura de 90°C possibilitou os melhores valores de tensão de cisalhamento e a pressão de colagem e o tempo de cura do adesivo não influenciaram nessa propriedade mecânica.

Lima et al. (2008) avaliaram a qualidade de juntas coladas da madeira de quatro clones de *Eucalyptus*, utilizando três adesivos comerciais (acetato de polivinila, uréia-formaldeído e resorcinol-formaldeído). Os autores encontraram diferença significativa na resistência ao cisalhamento, sendo que o clone 26 foi o

de melhor desempenho. Encontraram em relação à percentagem de falha na madeira, diferença em função do clone e do adesivo, sendo o clone 39 de melhor desempenho e o melhor adesivo aquele à base de uréia-formaldeído.

2.2 Madeira Laminada colada

2.2.1 Aspectos gerais

Denomina-se “madeira laminada colada” peças de madeiras reconstituídas a partir de lâminas de madeira (tábuas), que são de dimensões relativamente reduzidas se comparadas às dimensões da peça final assim constituída. Essas lâminas, que são unidas por colagem, ficam dispostas de tal maneira que as suas fibras fiquem paralelas entre si (Szucs, 2003).

A prática de executar estruturas ou partes de estruturas em madeira laminada colada é antiga. Segundo Moody & Liu (1999), o uso desse conceito originou-se na Europa; a primeira estrutura executada data de 1983, na construção de um auditório na Suíça (Petrauski, 1999).

Antigamente a maioria das aplicações da madeira laminada colada destinava-se a sistemas estruturais interiores. Entretanto, com o desenvolvimento dos adesivos a prova d'água, este produto veio a ser usado com sucesso em estruturas expostas. Isso permitiu utilizar a madeira laminada colada na construção dos mais variados tipos de estruturas de cobertura e pontes (Fiorelli, 2005).

Em 1940, com o aparecimento das colas sintéticas o sistema laminado-colado conheceu o seu grande progresso. Essa técnica, que de alguma maneira surgiu também da necessidade de utilização da madeira de reflorestamento, basicamente formada por *Pinus* e que se apresentava em abundância em países principalmente europeus, teve nessa madeira de fácil trabalhabilidade, a sua grande aliada. Portanto, o emprego da madeira sob a técnica do laminado-

colado, pouco conhecida no Brasil, é marcante em países do hemisfério norte (Szucs et al., 2006).

A madeira laminada colada deve ser fabricada por rígidos padrões de controle de qualidade, para que a mesma tenha alta resistência e durabilidade, resultando num material mais homogêneo que a madeira serrada. As especificações estipulam resistência a cisalhamento na linha de cola, e que os valores variam conforme as espécies vegetais e a umidade da madeira na ocasião da colagem (Pfeil & Pfeil, 2003).

Um dos problemas encontrados na abertura do mercado para a MLC, além da aceitação pelo usuário quanto à sua qualidade, é o seu alto custo, que reduz sua competitividade em relação a outros materiais que também possibilitam a pré-fabricação (Melotto, 2007). O elevado custo deve principalmente ao adesivo “cold-setting”, ou seja, termo-endurecedor de cura fria.

2.2.2 Vantagens da madeira laminada colada

A maior vantagem da madeira colada é que se pode aproveitar uma grande quantidade de madeira de pequenas dimensões para serem usadas como parte de laminações de vigas estruturais. Outro fator importante é que madeiras de variadas classes de resistência podem ser usadas nas vigas de forma que as peças com maiores resistências componham as partes mais externas e as de menor resistência a região interna da viga. Pode-se também variar a espécie de madeira na estrutura, de acordo com a solicitação de resistência das laminações em cada região da viga (Forest Products Laboratory, 1999).

A escolha da madeira laminada colada para as estruturas pode ser de fundamental importância principalmente quando se tratar de estruturas que ficarão expostas a um meio corrosivo, ou então, quando existir o risco de incêndio (Szucs et al., 2006).

A madeira laminada colada apresenta uma qualidade estética indiscutível, e isso faz com que arquitetos e engenheiros a explorem para a composição de um conjunto agradável e perfeitamente integrado ao ambiente. Estas estruturas são mais leves, tornando a montagem e desmontagem mais fácil, possibilitando ampliações.

2.2.3 Usos da madeira laminada colada

A aplicação da madeira laminada colada pode ser vista sob as mais variadas formas estruturais. O seu emprego vai desde pequenas passarelas, escadas e abrigos até grandes estruturas concebidas sob as mais variadas formas estéticas. São destinadas a cobrir vãos de até 100 metros sem apoio intermediário. Como exemplo, pode-se citar a obra do Hall de Tours, na França, com 98 metros de vão livre, assim como, o Palais d'Exposition d'Avignon, também na França, que tem mais de 100 metros de vão livre. Outra estrutura, também arrojada e onde os projetistas souberam bem explorar estética e praticamente a aplicação da madeira sob a técnica do laminado-colado, foi na antiga sede do Parlamento Europeu, em Estrasburgo na França. Uma estrutura em arcos, formando um conjunto semicircular, onde aconteciam as reuniões dos parlamentares representantes dos países da Comunidade Económica Europeia (Szucs, 2003).

2.3 Colagem da madeira

Os principais conceitos de uma ligação adesiva são: adesivo, adesão e aderentes. Adesão é o fenômeno interfacial ou a energia de separação de dois substratos, enquanto adesivo é o material que promove a união entre os mesmos. E os aderentes são os materiais sólidos ligados ao adesivo. Podem ser chamados também de substratos. Os mecanismos envolvidos no processo de adesão podem

ser explicados pelas teorias mecânicas, difusão de polímeros e adesão química (Marra, 1992).

A Teoria da adesão mecânica parte de uma chave mecânica, ou ancoramento, do adesivo dentro de cavidades, poros e asperezas da superfície para ser o principal fator determinante da resistência adesiva. Na maioria dos casos, o aumento da adesão pela ligação mecânica pode ser atribuído simplesmente ao aumento da área interfacial devido à rugosidade da superfície e no quanto as características do substrato iram permitir a penetração do adesivo nos poros e cavidades (Schultz & Nardin, 1994).

A Teoria da difusão de polímeros admite que a adesão ocorra através da difusão de segmentos de cadeias de polímeros a nível molecular através da interface, que permite conseqüentemente uma absorção gradual. Tal mecanismo pressupõe que correntes moleculares ou elos de correntes são suficientemente móveis e mutuamente solúveis. Este fato é de grande importância para muitos problemas da adesão, tal como nos processos de penetração e solidificação. Portanto, se o fenômeno da interdifusão está envolvido, a resistência da junta irá depender de diferentes fatores, como tempo de contato, temperatura, natureza e peso molecular dos polímeros (Schultz & Nardin, 1994).

Na Teoria da adesão química, a adesão ocorre através de ligações primárias iônicas ou covalentes, e/ou por forças intermoleculares secundárias. Os termos: primário e secundário originam-se da resistência relativa ou energia de colagem de cada tipo de interação, por exemplo, a força de uma ligação covalente geralmente encontra-se entre 100 a 1000kJ/mol enquanto que a ligação de Van der Waals e pontes de hidrogênio não passam de 50kJ/mol. A formação da ligação química depende da reatividade entre o adesivo e o substrato (Schultz & Nardin, 1994).

O processo de colagem da madeira se inicia com o espalhamento do adesivo sobre a superfície do substrato, iniciando as fases de movimento e se

finaliza com a sua solidificação, formando o ancoramento ou ganchos entre duas peças coladas. O grau de adesão depende da intensidade de cada elo, ou seja, dos aderentes, do adesivo e das interfaces (Schultz & Nardin, 1994).

Os adesivos de madeira são utilizados pelo homem durante muitos séculos e vem sendo aprimorados a cada ano à medida que os números de pesquisas vão aumentando, principalmente em relação ao progresso da química (Tienne, 2006).

O primeiro adesivo estrutural de grande importância foi a caseína, que deu origem a técnica do laminado colado substituindo as braçadeiras metálicas utilizadas no século XIX na Europa. Com o aparecimento das colas sintéticas o sistema laminado teve grande sucesso que continua desde então (Grohmann, 1998).

O primeiro adesivo sintético desenvolvido foi o fenol-formaldeído que surgiu em 1929, seguida de uréia-formaldeído em 1931, melanina-formaldeído no final dos anos 30 e a resorcina-formaldeído em 1943. Foi acompanhado também o surgimento dos adesivos termoplásticos como, por exemplo, o acetato polivinílico (Tsoumis, 1991).

A função de um adesivo, além de aderir dois substratos, é fluir e preencher espaços vazios entre as juntas a serem coladas, diminuindo assim, a distância entre elas, gerando interações entre o próprio adesivo e o substrato (Pizzi, 1994a).

A adesão é um campo muito complexo além do alcance de qualquer modelo ou teoria. Dado o número de fenômenos envolvendo a adesão, a variedade dos materiais a serem colados, e a diversidade de condições de colagem, a procura por uma única, teoria universal capaz de explicar todos os fatos experimentais é inútil. Na prática, diversos mecanismos de adesão podem ocorrer simultaneamente (Schultz & Nardin, 1994).

2.4 Aspectos do adesivo resorcinol-formaldeído

O resorcinol é um dihidróxi-fenol cristalino, com um odor característico, e com um gosto amargo adocicado, tendo a fórmula química $C_6H_4(OH)_2$. Este composto também é conhecido como resorcina, m-dihidroxibenzeno, 1, 3- benzenodiol, 1, 3- dihidroxibenzeno, 3- hidroxifenol, m-hidroquinona, m- benzenediol, e 3- hidroxiciclohexadieno- 1- ona. Estruturalmente, a química do resorcinol pode ser representada como se segue (Figura 1).

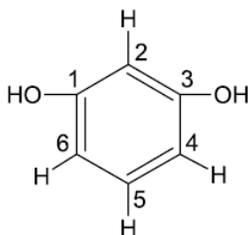


FIGURA 1 Estrutura química do resorcinol
Fonte: Durairaj (2005)

Observa-se pela figura que a molécula de resorcinol tem dois grupos hidroxila na estrutura do anel aromático, tendo os radicais hidroxila na posição meta.

O adesivo resorcinol formaldeído é quimicamente semelhante ao fenol-formaldeído, porém tem um peso molecular menor (Sellers Júnior, 1994). A diferença desses adesivos está no anel benzeno do adesivo resorcinol que apresenta uma hidroxila localizada na posição 1 e outra na posição 3 (figura 1), isto faz com que o adesivo resorcinol seja de 12 a 15 vezes mais reativo que o adesivo fenol- formaldeído. A cura dos adesivos fenol e resorcinol é obtida a partir da ligação desses grupos com o formaldeído. Quando o adesivo é feito sob condições alcalinas com excesso de formaldeído é formado o adesivo do tipo resol. Quando o adesivo é formado em condições ácidas com excesso de adesivo

é formado o novolak. A forma novolak tem estrutura linear e termoplástica, mas o adesivo pode vir a ter estrutura ramificada e termofixa pela adição de mais catalisador, isto é, o formaldeído. O resorcinol reage rapidamente com formaldeído para produzir uma resina do tipo novolak, o qual endurece a temperatura ambiente quando o formaldeído é adicionado (Pizzi, 1994a). A hidroxila adicional no resorcinol faz com que a reação com o formaldeído seja mais rápida e apresente uma ligação melhor do que o fenol-formaldeído, esta ligação faz com que o resorcinol formaldeído tenha uma alta durabilidade a ambientes externos (Dressler, 1994).

O metanol e o etanol diminuem a velocidade de reação. Outros alcoóis agem similarmente, a extensão de seus efeitos depende da sua estrutura. O metanol aumenta o tempo de gelatinização mais do que outros alcoóis; alcoóis com estruturas moleculares maiores são bem menos efetivos. O retardo ocorre pela formação de hemiformóis entre os alcoóis e o formaldeído. Esta redução de reação causa uma menor concentração de formaldeído disponível. Na manufatura de adesivos resorcinólicos puros, a reação pode ser violentamente exotérmica a menos que ela seja controlada pela adição dos alcoóis e por causa do desempenho dos alcoóis eles também podem ser úteis nas misturas dos adesivos (Pizzi, 1994a).

O resorcinol tem sido considerado como sendo uma das mais importantes matérias-primas para o desenvolvimento de vários tipos de resinas sintéticas com excelentes propriedades. Os adesivos resorcinólicos desenvolvidos a partir da reação de resorcinol e formaldeído foram inicialmente utilizados para a fabricação de aviões bombardeiros com madeira compensada e hélices de helicóptero com madeira laminada de folhosas durante II Guerra Mundial. Estes adesivos foram descobertos por sua excelente durabilidade e propriedades. A ligação do adesivo resultante do uso do resorcinol possui uma boa resistência estrutural. Essas juntas ou ligações são conhecidas por serem

resistentes a muitos tipos de condições, incluindo água fervente, alta umidade e muitos tipos de solventes, exceto soluções com altos teores de soda cáustica (Durairaj, 2005).

Os adesivos baseados no resorcinol têm sido amplamente utilizados na colagem de materiais de madeira, especialmente na construção de vigas de madeira laminada e de arcos. Da mesma forma, esses adesivos são conhecidos por serem úteis na colagem de muitos outros materiais como papel, têxteis, borrachas, metais, vidro, cerâmica e concreto (Durairaj, 2005).

2.5 Aspectos anatômicos da madeira

A influência da anatomia da madeira no processo de colagem está relacionada à sua estrutura no que se refere às diferenças de dimensões dos elementos celulares, tamanho, disposição e frequência das cavidades celulares que, por sua vez, estão relacionadas com a porosidade e permeabilidade da madeira, ou seja, essas características influenciam na mobilidade e penetrabilidade do adesivo (Marra, 1992; Pizzi, 1994a).

Entre as principais características anatômicas da madeira que influenciam na colagem, podem-se citar: os anéis de crescimento (lenho inicial e tardio), porcentagem de cerne e alburno, idade da árvore, lenhos de reação, grã e porosidade, que está relacionada com a densidade da madeira e influencia na penetração do adesivo.

Segundo Marra (1992) a significativa diferença de porosidade entre lenho inicial e tardio, e a pequena proximidade entre estas duas zonas na superfície da madeira, são causadores de uma das maiores dificuldades a superar na formulação de adesivos. A otimização da movimentação do adesivo, numa face de semelhante variabilidade superficial, necessita muito da tolerância das características de mobilidade do adesivo. Em muitos casos, o adesivo não pode

fazer tudo, mas deve ser auxiliado por algum fator operacional sob controle do usuário, tal como tempo de montagem.

Esta estrutura diferenciada pode ocasionar problemas relativos à penetração de adesivos, à linha de cola “famina” ou “espessa”, o que é contornável pela alteração na formulação do adesivo. Já a viscosidade, é dificultada em função da variabilidade, causada pelos diferentes planos de corte obtidos na obtenção dos elementos de madeira (Iwakiri, 1998).

A formação do cerne, ainda sem uma explicação concisa, mostra que células da região do alburno, são lentamente preenchidas com materiais como óleos, graxas e substâncias fenólicas, decorrentes provavelmente de processos metabólicos (bioquímicos) ainda remanescentes nas células dos raios na região periférica compreendida entre o cerne e o alburno. Tais materiais alteram a cor da madeira, sua permeabilidade, sua higroscopicidade, seu equilíbrio no conteúdo de umidade, sua contração e inchamento, sua durabilidade, sua densidade (em algumas espécies). Além disso, outro fato de destacada importância é que, em certas madeiras de folhosas, durante a formação do cerne, ocorre a oclusão de vasos por tiloses. A tilose provoca, então, o entupimento dos poros e, conseqüentemente, reduz de forma significativa a permeabilidade da madeira com relação aos fluídos (Burger & Richter, 1991; Marra, 1992).

A proporção de cerne e alburno é uma característica de cada espécie, idade, sítio, solo e clima, além de outros fatores. O cerne, em relação ao alburno, é menos permeável, possuindo maiores dificuldades na secagem e na absorção de produtos preservativos (Burger & Richter, 1991).

Segundo Marra (1992), o lenho juvenil possui anéis de crescimento largos, mas a madeira produzida possui a tendência de possuir inferior qualidade, pois é mais fraca, possuindo contração e inchamento mais elevados ao longo da grã. O processo de colagem é relativamente fácil, devido a sua baixa densidade e estrutura porosa, porém possui uma baixa resistência e instabilidade.

Por outro lado, árvores velhas tendem a um lento crescimento, com produção de estreitos anéis, além de apresentarem uma percentagem de cerne mais elevada, com quantidade de alburno mais reduzida.

Em relação a porosidade, esta se relaciona com a densidade, que influenciam na penetração dos adesivos na madeira. A porosidade pode ser considerada como o inverso da densidade, do ponto de vista da liga adesiva, desde que esta se relacione com as aberturas da madeira relativas à passagem de líquidos ou gases (Marra, 1992).

De acordo com Tsoumis (1991), Baldwin (1995) e Sellers Júnior (1994), as lâminas de madeira de menor massa específica, absorvem maior quantidade de adesivo em relação às lâminas de maior massa específica, devido à maior porosidade e permeabilidade da madeira. Assim, o painel compensado produzido com lâminas de menor massa específica poderá apresentar linha de cola “faminta” e baixa resistência da ligação adesiva. Portanto, é de suma importância que, o uso de madeiras provenientes de florestas de rápido crescimento, seja adaptado às suas características peculiares (Iwakiri et al., 2002).

Em relação às fibras, Pranda (1995), em seu trabalho, verificou que o MDF produzido com fibras de eucalipto exigiu maior porcentagem de adesivo para alcançar as mesmas propriedades mecânicas que apresentam MDF produzidos com fibras de Pinus.

Butterfield et al. (1992), comentam que, durante a redução da espessura de um colchão de fibras, estas se orientam, preferencialmente, no sentido horizontal ao plano do painel, resultando em uma considerável pressão das fibras, umas sobre as outras, provocando amplo contato entre as paredes destas fibras e a resina.

A adesão entre as fibras da madeira e o adesivo, depende de interação físico-química. Os adesivos realizam três fases distintas durante o processo de

ligação. Inicialmente o adesivo deve umedecer as fibras; em seguida, deve fluir de modo controlado durante a prensagem e, finalmente, adquirir forma sólida. Se ocorrerem falhas em algumas destas etapas, certamente a qualidade da colagem será afetada. Uma ótima ligação requer íntimo contato entre o adesivo e a fibra.

2.6 Extrativos totais da madeira

Quanto aos extrativos da madeira sua presença, quantidade e tipo afetam a adesão. Pesquisas têm mostrado que os extrativos na superfície da madeira são os principais contribuidores da inativação da superfície, gerando assim um pobre umedecimento do adesivo, especialmente em espécies resinosas como, por exemplo, o *Pinus*. Durante o processo da cura ou secagem que utiliza temperaturas elevadas, os extrativos tendem a migrar para a superfície onde eles se concentram e fisicamente bloqueiam o contato do adesivo com a madeira. Isto evita o ancoramento deste após a cura, gerando uma fraca ligação mecânica. Além disso, resinas e exudados oleosos são hidrofóbicos, ou seja, repelem a água.

Os adesivos utilizados em madeira, na sua maioria, usam a água como carreador. Isto gera problema de umedecimento, fluxo e penetração da superfície coberta pelo extrativo.

Outra influência do extrativo se dá na alteração do pH da superfície da madeira. Quando os extrativos depositados na superfície são de caráter ácido estes podem interferir na cura de um adesivo alcalino (fenol-formaldeído) acelerando assim uma polimerização prematura e reduzindo o umedecimento, fluxo e penetração do adesivo. O inverso também pode ocorrer caso utilize-se um adesivo de caráter ácido (ureia-formaldeído) retardando assim a cura do adesivo.

Segundo Pizzi (1994b) o adesivo resorcinol não apresenta problemas relacionado ao pH da superfície, ele pode curar tanto em condições ácidas quanto básicas.

3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALDWIN, R. F. **Plywood manufacturing practices**. San Francisco: M. Freeman, 1995. 388 p.

BURGER, M. L.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 224 p.

BUTTERFIELD, B.; CHAPMAN, K.; CHRISTIEL, L.; DICKSON, A. Ultra structural characteristics of failures surfaces in medium density fiberboard FPJ. **Forest Products Journal**, Madison, v. 42, n. 5, p. 55-60, 1992.

DOSSA, D. **Cultivo do eucalipto**. Colombo, PR: Embrapa Florestas, 2003. (Sistemas de produção, 4). Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Eucalipto/CultivoDoEucalipto/01_Importancia_economica.htm>. Acesso em: 02 set. 2009.

DRESSLER, V. L. **Investigação de métodos e procedimentos para determinação de tanino e cromo em efluente de curtume**. 1994. 102 p. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

DURAIRAJ, R. B. **Resorcinol: chemistry, technology and applications**. Berlin: Springer, 2005. 748 p.

FIORELLI, J. **Estudo teórico e experimental de vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro**. 2005. 108 p. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF UNITED NATION. **Eucalyptus for planting**. Italy: FAO, 1981. 677 p.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook: wood as an engineering material**. Madison: U.S. Department of Agriculture, 1999. 463 p.

GROHMANN, S. Z. **Vigas de madeira laminada colada com lâminas pré-classificadas de *Eucalyptus grandis***. 1998. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira**. Curitiba: FUPEF, 1998. 128 p. (Série didática, 1/98).

IWAKIRI, S.; SHIMOYAMA, V. R. S.; PEDROSA, A. L.; SANTOS, R. A. M. Efeito do crescimento radial de *Pinus taeda* (L.) nas propriedades do painel compensado. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 9, n. 1, p. 90-96, 2002.

LIMA, C. K. P. **Avaliação da qualidade de juntas coladas da madeira de clones de *Eucalyptus***. 2006. 89 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

LIMA, C. K. P.; MORI, F. A.; MENDES, L. M.; TRUGILHO, P. F.; MORI, C. L. S. O. Colagem da madeira de clones de *Eucalyptus* com três adesivos comerciais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 77, p. 73-77, 2008.

MARRA, A. A. **Technology of wood bonding: principles and practice**. Nova York: Van Nostrand Reinhold, 1992. 454 p.

MARTINS, I. S. **Comparação entre métodos uni e multivariados aplicados na seleção em *Eucalyptus grandis***. 1999. 94 f. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

MELLOTO, M. A. **Estudo do tempo de adesão, da temperatura e da pressão de colagem na tensão limite de cisalhamento de uniões de madeira de *Eucalyptus grandis* coladas com adesivo sem solvente**. 2007. 124 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

MOODY, R. C.; LIU, J. Y. Glue structural members. In: _____. **Wood handbook: wood as an engineering material**. Madison, WI: Department of Agriculture - Forest Service - Forest Products Laboratory, 1999. chap. 11, p. 1-24.

PETRAUSKI, A. **Comportamento de ligações adesivas e avaliação experimental de tesouras de telhados feitas de laminado colado em madeira de *Eucalyptus grandis***. 1999. 128 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

PFEIL, W. E.; PFEIL, M. **Estruturas de madeira**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 224 p.

PIZZI, A. **Advanced wood adhesives technology**. New York: M. Dekker, 1994a. 289 p.

PIZZI, A. Natural phenolic adhesives I: Tannin. In: PIZZI, A.; MITTAL, K. L. **Handbook of adhesive technology**. New York: M. Dekker, 1994b. p. 347-358.

PRANDA, J. Painéis de fibra de média densidade feitos de *Pinus pinaster* e *Eucalypto globulus*: área de composição química específica da madeira desfibrada. **Drevarsky Vyskum**, Bratislava, v. 2, p. 19-28, 1995.

SCHULTZ, J.; NARDIN, M. Theories and mechanisms of adhesion. In: PIZZI, A.; MITTAL, K. L. (Ed.). **Handbook of adhesive technology**. New York: M. Dekker, 1994. p. 19-32.

SELLERS JUNIOR, T. Adhesives in the wood industry. In: PIZZI, A.; MITTAL, K. L. (Ed.). **Handbook of adhesive technology**. New York: M. Dekker, 1994. p. 599-614.

SILVA, J. C. O eucalipto e suas origens. **Madeira**, Curitiba, Edição Especial, 2001.

SZUCS, C. A. Aplicação da madeira laminada colada - MLC em elementos construtivos. **Madeira**, Curitiba, v. 13, n. 71, maio 2003. Disponível em: <http://www.remade.com.br/pt/revista_materia.php?edicao=71&id=3321>. Acesso em: 28 jun. 2009.

SZUCS, C. A.; TEREZO, R. F.; VALLE, Â.; MORAES, P. D. **Estruturas de madeira**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2006. 186 p. Apostila. Disponível em: <<http://www.ecv.ufsc.br/secdepto/graduacao/planoensino/AEstruturaMadeiras.pdf>>. Acesso em: 05 ago. 2009.

TIENNE, D. L. C. **Qualidade da adesão de juntas coladas expostas a condições de serviço externo e interno**. 2006. 55 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.

TSOUMIS, G. **Science and technology of wood**: structure, properties, utilization. Nova York: Van Nostrand Reinhold, 1991. 494 p.

VITAL, B. R.; MACIEL, A. S.; DELLA LUCIA, R. M. Qualidade de juntas coladas com lâminas de madeira oriundas de três regiões do tronco de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*. **Árvore**, Viçosa, MG, v. 30, n. 4, p. 637-644, 2006.

CAPÍTULO 2
ESTUDO DA COLAGEM DA MADEIRA DE *Eucalyptus*
grandis W. Hill ex Maiden COM ADESIVO RESORCINOL-
FORMALDEÍDO.

1 RESUMO

O trabalho teve como objetivo avaliar a resistência de juntas coladas com adesivo termoendurecedor resorcinol-formaldeído provenientes de três posições radiais e três posições longitudinais do tronco da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden (Myrtaceae), com idade de 18 anos, relacionando-a com a densidade básica da árvore. A gramatura utilizada foi de 250 g/m², em face dupla, com adição de endurecedor, na proporção de uma para cinco partes de adesivo. A umidade das lâminas utilizadas estava em torno de 12% e as juntas coladas foram preparadas de acordo com a norma ASTM D 2339-98. Verificou-se que houve tendência de aumento nos valores médios da densidade básica no sentido medula-casca e no sentido longitudinal não houve variação significativa. Os valores médios mais elevados de resistência ao cisalhamento foram obtidos em juntas provenientes das posições próximas à casca e à base da tora. A menor percentagem de falha na madeira foi obtida em juntas provenientes das posições próximas à base e à casca da tora. O comportamento da colagem foi bastante variável na madeira de *Eucalyptus grandis* com adesivo resorcinol-formaldeído para as posições: radial e longitudinal.

2 ABSTRACT

This study aimed to evaluate the resistance of bonded joints with thermosetting adhesive resorcinol-formaldehyde from three radial positions and three longitudinal trunk positions of *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden (Myrtaceae), aged 18 years, linking it with the basic density of the tree. The weight used was 250 g/m², in double face, with the addition of hardener, the ratio of 1 part to 5 parts of adhesive. The humidity of the slides used was around 12% and the bonded joints were prepared in accordance with ASTM D 2339-98. There was an increasing trend in the average values of the basic density in the pith-bark and there was no significant variation longitudinally. The higher average values of shear resistance were obtained in joints from positions near the shell and the base of the log. The lower percentage of wood failure was obtained in joints from the positions near the base and the shell of the log. The behavior of the glue was quite variable in *Eucalyptus grandis* with resorcinol-formaldehyde adhesive for the radial and longitudinal positions.

3 INTRODUÇÃO

O emprego da madeira em diversos produtos se deve em grande parte aos avanços obtidos no processo de colagem. De acordo com Marra (1980), cerca de 70% de todos os produtos derivados da madeira utilizam algum tipo de adesivo na sua confecção. Tais produtos incluem desde os compensados, vigas laminadas, alguns tipos de chapas de fibras, chapas de partículas, os derivados de papel, móveis, etc.

A adesão entre componentes celulares da madeira, bem como outros materiais, depende de uma série de parâmetros relacionados às características físico-químicas do adesivo, do material a ser colado, do procedimento adotado na colagem, da forma geométrica e do tamanho das peças a serem coladas e, ainda, das condições as quais as peças coladas serão expostas, quando em serviço (Sobral Filho, 1982; Marra, 1992b). A resistência, a estabilidade e a vida útil de uma estrutura colada dependem, em grande parte, da resistência, rigidez e durabilidade das ligações (Vital et al., 2006).

A densidade básica da madeira é considerada como um parâmetro de grande importância para a colagem. Ela indica a quantidade aproximada de espaços vazios disponíveis para receber líquidos, como adesivos, por exemplo. Segundo Marra (1992b) e Tsoumis (1991) madeiras de alta densidade são de difícil colagem uma vez que há pouca penetração do adesivo, diminuindo a possibilidade de um bom desenvolvimento de uma linha de cola.

Várias técnicas dão origem aos diversos produtos a base de madeira e entre estas existe a técnica do laminado colado. A madeira laminada colada é um componente estrutural, constituído por uma associação de lâminas (tábuas) de madeira, coladas com adesivo à prova d água, e sob pressão variável. As tábuas são coladas em direções paralelas quanto à disposição de suas fibras e estas podem ser emendadas por juntas em bisel ou dentadas nas situações em que é

necessário vencer grandes vãos (Pfeil & Pfeil, 2003). Uma das características de peças laminadas coladas é a possibilidade da utilização racional e otimizada da madeira, permitindo a utilização de tábuas com seções e comprimentos variados que poderão ser usadas como parte de laminações de vigas estruturais, além de combinações com madeira de qualidade diferenciada (Nielsen, 1998). Seu emprego vai desde pequenas passarelas, escadas e abrigos até grandes estruturas concebidas sob as mais variadas formas estéticas.

O sucesso dos produtos a base de madeira laminada colada está intimamente ligado ao adesivo empregado na sua construção. O adesivo deve possuir características de uma união resistente, estável e durável e estas características se relacionam diretamente com as propriedades da madeira utilizada.

No Brasil, o grande fator limitante para a produção de madeira laminada colada é o custo do adesivo. Os adesivos mais utilizados para uso estrutural em madeiras são os adesivos fenólicos e suas modificações, bem como os adesivos a base de resorcinol. O adesivo resorcinol apresenta excelente durabilidade, propriedade de baixa temperatura e alta resistência em peças estruturais. As ligações adesivas realizadas com este adesivo são conhecidas por serem muito resistentes a diversos tipos de condições, incluindo água fervente, alta umidade e muitos tipos de solventes, exceto soluções com altos teores de soda cáustica (Durairaj, 2005). A reatividade do resorcinol é muito mais elevada do que a do fenol, todavia, é um produto muito caro, o que leva a misturá-lo, em partes iguais, com o fenol, ou ainda usado como co-condensado de resorcinol e fenol. Estes adesivos custam cerca de quatro a cinco vezes mais que os adesivos a base de fenol-formaldeído. Na tentativa de reduzir o custo do adesivo resorcinol, alguns pesquisadores têm estudado o comportamento da resistência das juntas coladas quando estas são coladas com adesivo diluído ou reduzindo-se a área colada.

Nascimento et al. (2002) estudando o comportamento de ligações adesivas em madeiras de pinus e eucalipto obteve como resultado para o efeito da diluição do adesivo à base de resorcinol que as diluições feitas em até 10% e 15%, respectivamente, tiveram o mesmo desempenho do adesivo a base de resorcinol não diluído.

A madeira utilizada na técnica do laminado colado pode ser proveniente de varias espécies. Assim a qualidade e o valor do produto final vão depender da espécie e do adesivo utilizado.

As madeiras de reflorestamento têm sido bastante estudadas para fins estruturais, especialmente fazendo-se uso de adesivo como agente de ligação, uma vez que o fato de utilizar madeiras oriundas de florestas plantadas pode reduzir o custo do produto final, já que estas madeiras apresentam crescimento mais rápido e já ocupam grandes áreas quando comparadas a florestas nativas. O interesse em ligações de madeira utilizando-se adesivos e em madeira laminada colada tem sido revelado através do grande número de pesquisas que estão sendo desenvolvidas (Nascimento et al., 2002).

Dentre as madeiras de reflorestamento o gênero *Eucalyptus* é uma opção potencial para utilização em produtos de maior valor agregado, como sólidos de madeira, o que inclui madeira serrada, movelaria, construção civil, madeira processada para produção de aglomerados, chapas de fibra, lâminas e outros (Lima, 2006).

Em 2007 as florestas plantadas atingiram um total muito próximo de 6,0 milhões de hectares. O eucalipto representou 62,7% do total e a região sudeste concentrou 57% das florestas plantadas com esta espécie do Brasil. O eucalipto ocupa o 2º lugar no ranking das espécies florestais plantadas destinadas à indústria de madeira processada mecanicamente (Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada e Industrial – ABIMCI, 2008).

A crescente procura de madeira serrada de eucalipto no Brasil faz com que sejam realizadas avaliações mais detalhadas sobre suas características e comportamentos frente aos processos industriais. Em relação ao processo de colagem, existe uma variação no comportamento desta em diferentes posições do tronco da árvore. O melhor conhecimento deste aspecto permitirá uma colagem mais eficiente, com melhor desempenho e consequentemente redução dos custos.

O trabalho teve como objetivo avaliar a qualidade de juntas coladas, provenientes de três posições longitudinais e três posições radiais do tronco da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, utilizando o adesivo termoendurecedor resorcinol-formaldeído, determinar a variação da densidade básica no sentido longitudinal e radial do tronco e avaliar a influência desta variável nas propriedades de colagem. A qualidade das juntas foi avaliada, determinando-se a tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento (seco e após fervura) na linha de cola e a percentagem de falha na madeira.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material de estudo e caracterização da área

Utilizou-se madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, provenientes de duas árvores cultivadas no município de Lavras, MG. As árvores apresentavam 18 anos de idade e diâmetro médio de 23 cm a 1,30 metros do solo.

A cidade de Lavras, no Sul de Minas, localiza-se nas coordenadas 21°14'S de latitude e longitude 45°00'W, à altitude média de 900 m. A precipitação média anual está em torno de 1.400 mm e a temperatura média anual é de 19,4° C. A área de plantio possui relevo declivoso, com predominância de solo podzólico. O plantio foi feito em covas, com

espaçamento de 2x2m. Na área realizaram-se desbastes sucessivos e corte seletivo.

4.2 Obtenção das tábuas

De cada árvore retirou-se uma tora com 4 metros de comprimento, sendo este obtido a partir da base da árvore. As toras foram processadas na forma de tábuas com espessuras médias de 25 mm conforme mostrado na figura 2. Foram obtidas amostras próximo à medula (A), próximo à casca (C) e à região intermediária (B). Tais amostras foram secas ao ar livre e após a secagem foram cortadas em três posições adjacentes considerando-se o sentido longitudinal da tora, a partir das quais obteve-se tábuas que foram consideradas como base da tora (região próxima à base da árvore, com 1,3 metros de comprimento), meio da tora (1,3 metros de comprimento) e ápice da tora (1,3 metros de comprimento).

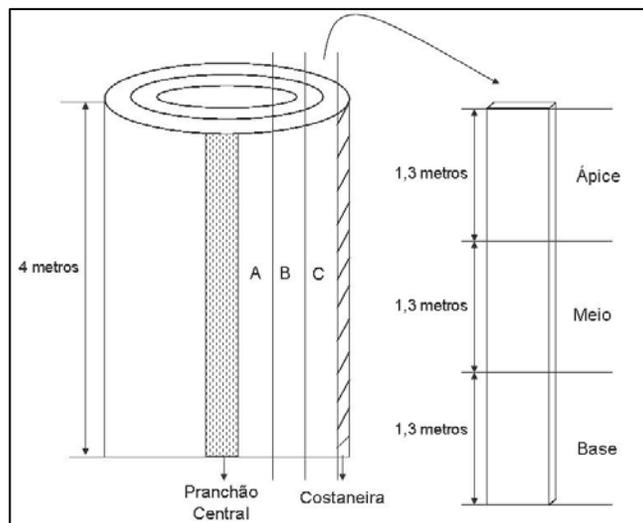


FIGURA 2 Esquema de obtenção das tábuas, em que “A” se refere à região próxima à medula; “B” à região intermediária e “C” à região próxima à casca

4.3 Determinação da densidade básica

Para a determinação da densidade básica retiraram-se de cada posição longitudinal e radial três corpos-de-prova os quais foram submersos em água destilada, onde permaneceram até atingir peso constante, ou seja, completa saturação das fibras. Então foram pesados e levados à estufa de laboratório com ventilação até atingir massa constante e posteriormente os corpos-de-prova foram pesados em uma balança de precisão de 0,01g. Seguiu-se o método descrito pela NBR 11941 (Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, 2003) em que a densidade básica da madeira (DB), em g/cm^3 é dada pela relação entre peso seco (PS), em gramas e o volume saturado (Vs), em centímetros cúbicos.

4.4 Confeção das juntas coladas, determinação das propriedades físico-químicas do adesivo e avaliação da colagem nas diferentes posições da tora

As tábuas obtidas foram processadas na forma de sarrafos, nas dimensões de 0,5 x 10 x 30 cm (espessura x largura x comprimento), destinados à preparação das juntas coladas de acordo com a norma ASTM D 2339-98. Os sarrafos obtidos foram acondicionados em uma câmara de climatização a $25 \pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura a $60 \pm 2\%$ de umidade relativa, para posterior colagem, ficando os sarrafos com umidade média em torno de 12%.

O adesivo utilizado foi o resorcinol - formaldeído (Cascofen-RS-216) com adição de endurecedor (FM), na proporção de uma para cinco partes de adesivo.

A gramatura do adesivo utilizada foi de 250 g/m^2 aplicado em face dupla. O adesivo foi preparado previamente antes de seu emprego e espalhado sobre as superfícies com auxílio de um pincel. As juntas foram imediatamente fechadas e, assim, permaneceram por aproximadamente 15 minutos, sendo, então, prensadas a frio a 12 kgf/cm^2 durante 24 horas. Foram confeccionados 36

pares de juntas para cada árvore, resultado de um delineamento fatorial completo do tipo 3x3x3, correspondentes às combinações entre posição radial, posição longitudinal e três repetições.

Após a colagem, as juntas foram novamente acondicionadas na câmara de climatização, nas mesmas condições já citadas, por aproximadamente 15 dias e então foram desdobradas em 12 corpos-de-prova cada uma. Do total dos corpos-de-prova foram retirados 20% destes para ensaio em ciclo de envelhecimento (água a 98°C, durante 4 horas; estufa a 63°C por 20 horas; água a 98°C, durante 4 horas; resfriamento, segundo Marra, 1992a). Para todos os corpos-de-prova foram realizados testes de resistência ao esforço ao cisalhamento, em uma máquina pneumática de ensaio, marca Contenco-Pavitest Cisalhamento na Colagem 1.01-0, modelo I 4230, instalada no no Laboratório de Adesão e Adesivos na Unidade Experimental de Produção de Painéis de Madeira DCF-UFLA, Lavras, MG. Após a ruptura, quatro pessoas da área de Ciência e Tecnologia da Madeira inspecionaram todos os corpos-de-prova, com o auxílio de uma lâmina reticulada, a quantificação da percentagem de falha na madeira. As avaliações da percentagem de falhas na madeira foram julgadas pela ASTM D-3110 (American Society for Testing and Materials – ASTM, 1994a). As percentagens de falha na madeira foram transformadas em arco-seno para normalização dos dados.

O método estatístico utilizado foi o delineamento inteiramente casualizado (DIC) e os resultados dos ensaios foram interpretados com o auxílio de análise de variância e do teste de Scott-Knott a 95% de probabilidade.

Foram também determinadas as propriedades físico-químicas do adesivo utilizado, como o teor de sólidos, o pH, a viscosidade e o tempo de endurecimento. Para determinação do teor de sólidos do adesivo, empregou-se um procedimento adaptado da norma ASTM D1582-60 (ASTM, 1994b). A determinação do pH foi feita utilizando-se um pHmetro, à temperatura de 25°C,

colocando-se o eletrodo diretamente dentro de um béquer contendo 50 g de adesivo. A viscosidade foi determinada por meio de um viscosímetro do tipo Copo Ford, com furo de 4 mm de diâmetro. Para a determinação do tempo de endurecimento foram pesados 10g do adesivo em tubo de ensaio (15 cm de altura e 2 cm de diâmetro) e este foi misturado manualmente com o auxílio de um bastão de vidro durante a operação. O tempo de endurecimento foi considerado desde o momento da primeira mistura até o endurecimento completo do adesivo, quando não foi mais possível misturar.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Densidade Básica da madeira

Os valores médios da densidade básica da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden para as posições longitudinal e radial se apresentam na figura 3, a qual representa um esquema ilustrativo da tora da árvore.

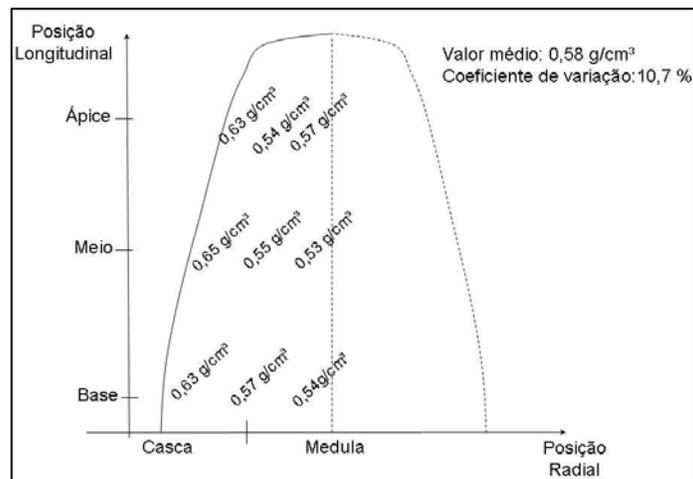


FIGURA 3 Esquema ilustrativo da madeira de *Eucalyptus grandis* contendo os valores de densidade básica (g/cm³) para as posições longitudinal e radial, ao longo da tora.

O valor médio de densidade básica ($0,58 \text{ g/cm}^3$) encontrado para a madeira em estudo foi superior àquele encontrado por Silva et al. (2004) o qual trabalhou com madeira de *Eucalyptus grandis*, de quatro idades em diferentes posições radiais, obtendo para a idade de 20 anos o valor médio de $0,47 \text{ g/cm}^3$.

É possível perceber na figura 3 uma tendência do aumento nos valores médios de densidade básica no sentido medula-casca. Trevisan et al. (2008) trabalhando com madeira *Eucalyptus grandis*, aos 14 anos de idade encontrou valores médios mais baixos na região da medula ($0,37 \text{ g/cm}^3$), seguida de acréscimo até a região mais periférica do tronco ($0,43 \text{ g/cm}^3$). No sentido longitudinal observa-se que a densidade básica não apresentou variação significativa nos valores médios.

A variabilidade da densidade básica pode decorrer das mudanças na proporção de vasos e da espessura das paredes celulares das fibras. O aumento da densidade no sentido medula-casca pode ter sido resultado do aumento da espessura da parede celular das fibras ou de um aumento na proporção das fibras em relação à proporção de vasos, por exemplo.

5.2 Propriedades físico-químicas do adesivo e tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento à tração

Os resultados obtidos para as propriedades físico-químicas do adesivo utilizado encontram-se na Tabela 1.

TABELA 1 Propriedades físico-químicas do adesivo resorcinol-formaldeído

Propriedades	
Aspecto do Adesivo	Líquido de cor escura
Teor de sólidos (%)	59,4
Viscosidade (cP)	5488,3
Ph	7,1
Tempo de endurecimento (horas)	8 (aproximadamente)

A Tabela 2 apresenta o resultado da ANOVA fatorial para a avaliação do efeito das posições sobre tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento à tração seco e após fervura.

TABELA 2 Resumo da ANOVA fatorial para tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento à tração seco (tr seco) e após fervura (tr após fervura)

		tr seco	tr após fervura
Fonte de variação	Grau de Liberdade	Quadrado Médio	Quadrado Médio
Longitudinal	2	0,0953	0,873389*
Radial	2	8,31847*	13,162702*
Long*Rad	4	0,36881*	0,555702
Resíduo (tr seco)	18	0,090970	-
Resíduo (tr após fervura)	36	-	0,211626
Coefficiente de variação (%)		6,33	11,43

e*: Significativo a 5% de significância, pelo teste F.

Pode-se constatar que houve efeito significativo entre a interação das posições na tora e da posição radial para a variável tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento teste seco. Para a tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento após fervura, houve efeito significativo de cada posição da tora isoladamente.

Na Tabela 3, mostram-se os valores médios de tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento teste seco.

TABELA 3 Valores médios de tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento à tração teste seco (Mpa)

Posição	Casca	Intermediária	Medula	Média
Base	5,83 aA	4,64 aB	3,93aC	4,80
Meio	5,93 aA	4,47 aB	4,14 aB	4,84
Ápice	5,49 aA	5,04 aA	3,42 bB	4,65
Média	5,75	4,72	3,83	

Médias acompanhadas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si em nível de 95% de probabilidade, comparadas pelo teste de Scott-Knott. A primeira letra (minúscula) se refere ao desdobramento da posição longitudinal dentro da posição radial no sentido vertical da tabela. A segunda letra (maiúscula) se refere ao desdobramento da posição radial dentro da posição longitudinal no sentido horizontal da tabela.

tr seco: tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento seco.

Na figura 4 mostra-se o gráfico de correlação entre a densidade básica da madeira e a tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento à tração teste seco, para a posição radial da tora.

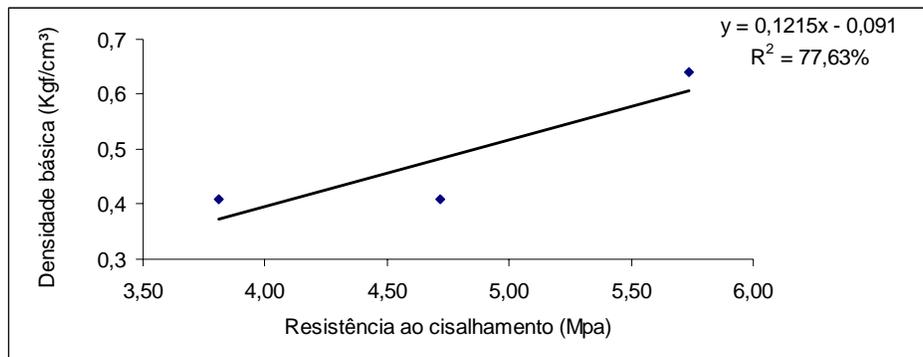


FIGURA 4 Gráfico de correlação entre densidade básica da madeira e a tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento à tração, para a posição radial da tora de *Eucalyptus grandis*.

Em relação ao desdobramento longitudinal dentro de radial (Tabela 3) para a variável em questão, houve diferença significativa apenas para a posição

próxima à medula, em que o menor valor (3,42 Mpa) foi encontrado para a posição do ápice da tora. Para o desdobramento radial dentro de longitudinal (Tabela 3) houve efeito significativo da posição longitudinal sobre a posição radial, em que o maior valor (5,93 Mpa) encontrado foi para a posição próxima à casca e o menor (3,42 Mpa) próximo à medula. Tal resultado é compatível com o resultado obtido por Vital et al. (2006), os quais encontraram valores médios para a tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento das madeiras oriundas da região próxima da casca maiores do que à resistência das madeiras oriundas da região próxima da medula.

A diferença encontrada para a posição radial pode ser atribuída à densidade da madeira ou à própria característica anatômica. Na Figura 4 observa-se a correlação positiva entre a densidade básica da madeira e a resistência ao cisalhamento, ou seja, quanto menor a densidade da madeira, menor é a resistência ao cisalhamento da junta colada. Este comportamento pode ter resultado em maior penetração do adesivo nas tábuas próximas à medula, as quais apresentam menor densidade, paredes celulares finas e maior porosidade, resultando em linha de cola faminta e, conseqüentemente, menor resistência da ligação adesiva.

Comparando-se os valores médios de tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento com valores médios encontrados por outros autores (Lima et al., 2008; Vital et al., 2006; Nascimento et al., 2002), observa-se que os valores encontrados neste trabalho foram inferiores, porém vários são os fatores que podem ter contribuído para esta diferença como, as normas utilizadas, as gramaturas de colas, as idades das árvores, os locais de crescimento e os tipos de ensaio. As normas utilizadas para testar a tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento diferem quanto à dimensão dos corpos-de-prova, o que pode provocar uma maior ou menor resistência. Corpos-de-prova com dimensões maiores podem apresentar uma resistência maior, uma vez que a área testada é

maior. Em relação à gramatura de cola, quando se utiliza uma gramatura maior pode haver uma maior mobilidade do adesivo na madeira e conseqüentemente uma maior resistência.

Lobão & Gomes (2006) avaliou a qualidade de adesão da madeira de eucalipto em dois diferentes planos e com madeiras de diferentes densidades, de acordo com a norma NBR/7190/97, e encontrou para a tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento para os corpos-de-prova com fibras paralelas e baixa densidade (características estas que se assemelham às usadas neste trabalho) valor médio de 7,7 Mpa. Este valor foi maior que o encontrado neste trabalho e possivelmente isto ocorreu porque a norma utilizada pelo autor especifica dimensões maiores para a área de colagem e a norma utilizada neste trabalho especifica dimensões menores, o que pode ter resultado em valores mais baixos.

Na Tabela 4, mostram-se os valores médios de tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento à tração teste após fervura para as posições longitudinal e radial.

TABELA 4 Valores médios de tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento à tração após fervura (Mpa) de acordo com as posições longitudinal e radial.

Longitudinal		Radial	
Posição	tr após fervura	Posição	tr após fervura
Base	4,20 a	Casca	4,88 a
Meio	4,12 a	Intermediária	4,17 b
Ápice	3,75 b	Medula	3,02 c

Médias acompanhadas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si em nível de 95% de probabilidade, comparadas pelo teste de Scott-Knott.

tr após fervura: resistência ao cisalhamento após fervura.

O menor valor encontrado para a variável tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento após fervura na posição longitudinal foi de 3,75 Mpa para a posição próxima ao ápice da tora. Na posição radial, o maior valor encontrado

foi de 4,88 Mpa, na posição próxima à casca, e o menor valor foi de 3,02 Mpa, na posição próxima à medula.

Na Tabela 5 mostram-se os valores médios percentuais de redução da tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento à tração (teste seco) para tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento à tração (teste após fervura).

TABELA 5 Valores percentuais de redução da tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento à tração (teste seco) para tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento à tração (teste após fervura).

Longitudinal		Radial	
Posição	Redução Percentual (%)	Posição	Redução Percentual (%)
Base	-12,50	Casca	-15,13
Meio	-14,88	Intermediária	-11,65
Ápice	-19,35	Medula	-21,15

Observou-se perda de resistência para o adesivo utilizado nas juntas coladas quando estas foram expostas às condições de intemperismo (envelhecimento), o que era esperado, pois quando se submete a madeira laminada colada a condições extremas observam-se resultados inferiores de resistência.

5.3 Percentagem de falha na madeira

A Tabela 6 apresenta o resultado da ANOVA fatorial para a avaliação do efeito das posições sobre a percentagem de falha na madeira em relação à tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento seco (tr seco) e após fervura (tr após fervura).

TABELA 6 Resumo da ANOVA fatorial para a percentagem de falha na madeira em relação à tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento seco (tr seco) e após fervura (tr após fervura).

Fonte de variação	Grau de Liberdade	tr seco	tr após fervura
		Quadrado Médio	Quadrado Médio
Longitudinal	2	0,047315*	0,019296
Radial	2	0,280493*	0,492469*
Long*Rad	4	0,012854	0,035626
Resíduo (tr seco)	18	0,005656	-
Resíduo (tr após fervura)	36	-	0,060711
Coeficiente de variação (%)		5,9	18,34

e*: Significativo a 5% de significância, pelo teste F.

Para a percentagem de falha na madeira em relação à tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento seco houve efeito significativo de cada posição da tora (radial e longitudinal) isoladamente, e em relação à tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento após fervura houve efeito significativo somente da posição radial.

Na Tabela 7, mostram-se os valores médios de percentagem de falha na madeira em relação à tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento seco e após fervura para as posições longitudinal e radial.

TABELA 7 Valores médios de percentagem de falha na madeira em relação à tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento seco e após fervura para as posições longitudinal e radial.

Posição	Longitudinal		Posição	Radial	
	Seco	Após fervura		Seco	Após fervura
Base	86,34 b	93,08 a	Casca	77,78 c	83,01b
Meio	92,73 a	95,23 a	Intermediária	93,63 b	96,50 ^a
Ápice	94,36 a	96,23 a	Medula	97,91 a	99,53 ^a

Médias acompanhadas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si em nível de 95% de probabilidade, comparadas pelo teste de Scott-Knott.

Para percentagem de falha na madeira em relação à tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento seco para posição longitudinal o menor valor (86,34%) encontrado foi para a posição próxima à base.

Segundo ASTM (2000) valores altos para o percentual de falha na madeira são indicativos de boa qualidade na adesão, pois demonstram que a coesão do adesivo e a resistência da interface adesivo-madeira são mais altas que a resistência da própria madeira. Na região próxima ao ápice da tora encontraram-se valores altos de percentagem de falha na madeira e esta apresentou baixa resistência à tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento. Provavelmente a estrutura anatômica desta região apresenta baixa resistência ocasionando tal fato.

Para a posição radial tanto para a percentagem de falha na madeira em relação à tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento seco e tanto para o teste após fervura o menor valor encontrado foi para a posição próxima à casca e o maior valor para a posição próximo à medula.

A região próxima à casca apresentou alta resistência à tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento, porém baixa percentagem de falha. Isto pode ter ocorrido devido ao próprio adesivo utilizado na colagem, que conferiu maior resistência a esta região, ou à própria densidade básica da madeira, que nesta região apresentou-se maior.

Pode-se observar também aumento da percentagem de falha na madeira quando as juntas coladas foram expostas a ciclos de envelhecimento (teste após fervura). Como as juntas coladas foram expostas a temperaturas muito altas, isso pode ter contribuído para o desprendimento do adesivo na estrutura da madeira, diminuindo assim a área de adesão e fazendo com que a ligação ficasse mais fraca, aumentando a percentagem de falha na madeira.

6 CONCLUSÕES

- Para a densidade básica da madeira, houve um acréscimo no sentido medula-casca e no sentido base-ápice da tora os valores se assemelham.
- No sentido base-ápice da tora ocorreram valores médios de resistência ao cisalhamento (seco e após-fervura) maiores na base e menores no topo. Para a percentagem de falha na madeira ocorreu o inverso.
- No sentido radial ocorreram valores médios de resistência ao cisalhamento (seco e após-fervura) maiores na casca e menores na medula. Para a percentagem de falha na madeira ocorreu o inverso.
- Houve um comportamento bastante variável da qualidade da colagem com o adesivo resorcinol-formaldeído na madeira de *Eucalyptus grandis*, para as posições radial e longitudinal.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of ASTM standards:** adhesives. Philadelphia, 2000. 600 p. D2339-98 Standard test method for strength properties of adhesives in two-ply wood construction in shear by tension loading.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of ASTM standards:** adhesives. Philadelphia, 1994a. 600 p. D-3110 Standard specification for adhesives used in nonstructural glued lumber products.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of standards:** D1582-60. Denver: ASTM, 1994b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA E INDUSTRIAL. **Madeira processada mecanicamente:** estudo setorial. 2008. Disponível em: <http://www.abimci.com.br/abimcidocs/ABIMCI_Estudo_Setorial_2008.pdf>. Acesso em: 23 out. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Madeira – determinação da densidade básica**: NBR 11941. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 6 p.

DURAIRAJ, R. B. **Resorcinol**: chemistry, technology and applications. Berlin: Springer, 2005. 748 p.

LIMA, C. K. P. **Avaliação da qualidade de juntas coladas da madeira de clones de *Eucalyptus***. 2006. 89 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

LIMA, C. K. P.; MORI, F. A.; MENDES, L. M.; TRUGILHO, P. F.; MORI, C. L. S. O. Colagem da madeira de clones de *Eucalyptus* com três adesivos comerciais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 77, p. 73-77, 2008.

LOBÃO, M. S.; GOMES, A. Qualidade da adesão de madeira de eucalipto em corpos-de-prova colados em dois diferentes planos e densidades. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 194-200, abr./jun. 2006.

MARRA, A. A. Bond performance: testing and evaluation. In: _____. **Technology of wood bonding**: principles and practice. Nova York: Van Nostrand Reinhold, 1992a. p. 342-352.

MARRA, A. A. **Technology of wood bonding**: principles and practice. Nova York: Van Nostrand Reinhold, 1992b. 454 p.

MARRA, G. G. The role of adhesion and adhesives in the wood products industry. In: SYMPOSIUM ON WOOD ADHESIVES RESEARCH, APPLICATION AND NEEDS, 1., 1980, Madison. **Proceedings...** Madison: Forest Products Laboratory, 1980. p. 1-8.

NASCIMENTO, A. M.; LELIS, R. C. C.; COSTA, D. L.; OLIVEIRA, C. S. Comportamento de ligações adesivas em madeiras de reflorestamento. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 9, n. 1, p. 54-62, jan./dez. 2002.

NIELSEN, I. R. **Utilização da madeira comercial do híbrido de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake x *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden na confecção de vigas laminadas coladas**. 1998. 109 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

PFEIL, W. E.; PFEIL, M. **Estruturas de madeira**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 224 p.

SILVA, J. C.; OLIVEIRA, J. T. S.; TOMAZELLO FILHO, M.; KEINERT JÚNIOR, S.; MATOS, J. L. M. de. Influência da idade e da posição radial na massa específica básica da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Floresta**, Curitiba, v. 34, n. 1, p. 13-22, 2004.

SOBRAL FILHO, M. **Adesão e adesivos para madeira**: teorias da adesão e a natureza das colagens com madeira. Brasília: Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal, 1982. 22 p. (Série técnica, 5).

TREVISAN, R.; HASELEIN, C. R.; MELO, R. R.; STANGERLIN, D. M.; BELTRAME, R.; GATTO, D. A.; CALEGARI, L. Variação radial da massa específica básica da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 3, p. 553-559, jul./set. 2008.

TSOUMIS, G. **Science and technology of wood**: structure, properties, utilization. Nova York: Van Nostrand Reinhold, 1991. 494 p.

VITAL, B. R.; MACIEL, A. S.; DELLA LUCIA, R. M. Qualidade de juntas coladas com lâminas de madeira oriundas de três regiões do tronco de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*. **Árvore**, Viçosa, MG, v. 30, n. 4, p. 637-644, 2006.

CAPÍTULO 3
INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS ANATÔMICAS E
DO TEOR DE EXTRATIVOS TOTAIS DA MADEIRA DE
Eucalyptus grandis W. Hill ex Maiden NA COLAGEM COM
ADESIVO RESORCINOL-FORMALDEÍDO

1 RESUMO

O trabalho teve como objetivo caracterizar anatomicamente e quantificar os extrativos totais em diferentes posições do tronco de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden com 18 anos de idade e avaliar a influência dessas características sobre a resistência ao cisalhamento e percentagem de falha na madeira em juntas coladas com adesivo termoendurecedor resorcinol-formaldeído. Foram preparadas lâminas histológicas para o estudo anatômico e determinou-se o teor de extrativos totais. A preparação de juntas coladas foram feitas de acordo com a norma ASTM D 2339-98. Utilizou-se o coeficiente de correlação de Pearson, a 1% de probabilidade pelo teste t de Student para avaliar as correlações existentes entre as características anatômicas e teor de extrativos com a qualidade das juntas coladas. Verificou-se que houve correlação entre resistência ao ensaio de cisalhamento com as seguintes características: diâmetro do vaso, largura da parede, largura e o comprimento da fibra, largura do raio e teor de extrativos totais. E em relação à percentagem de falha na madeira, houve correlação entre esta com as seguintes características: frequência de vasos, espessura do lume da fibra, frequência e altura do raio. Tanto no sentido radial quanto no sentido longitudinal houve variação dos valores encontrados para a mensuração dos elementos anatômicos, quantidade de extrativos totais, resistência ao ensaio cisalhamento e percentagem de falha na madeira.

2 ABSTRACT

The study aimed to anatomically characterize and quantify the total extractives in different positions of the trunk of *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden with 18 years of age and assess their influence on the shear strength and percentage wood failure in adhesive bonded joints with thermosetting resorcinol-formaldehyde. Histological slides were prepared for anatomical study and determined the total extractives content. The preparation of bonded joints were made according to ASTM D 2339-98. We used the correlation coefficient of Pearson, the 1% probability by t test to evaluate the correlation between the anatomical and extractives content with the quality of the glue joints. It was found that there was no correlation between resistances to shear test with the following: vessel diameter, wall width, length and width of the fiber, the width of the radius and total extractives content. And the percentage of wood failure, there was a correlation between this with the following characteristics: the frequency of vessels, thickness of the heat of fiber, and high frequency of lightning. Both in the radial and the longitudinal range of values was found for the measurement of anatomical elements, the total amount of extractives, shear test strength and percentage wood failure.

3 INTRODUÇÃO

A aplicação da madeira cada vez maior nas construções civis e nas indústrias de móveis faz com que a procura por produtos de maior valor agregado aumente a cada dia. E para suprir essa demanda as áreas de florestas plantadas vêm aumentando a cada ano. Em 2008 estas áreas acumularam no Brasil o total estimado de 6.126.000 ha com eucalipto e pinus. A área correspondente às florestas de eucalipto foi de 69,5% (4.258.704 ha) (Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas – ABRAF, 2009).

O sucesso alcançado pelas indústrias florestais a cada tempo se deve aos esforços de vários pesquisadores. Várias pesquisas estão sendo feitas para viabilizar industrialmente a madeira do eucalipto, já que essa vem ocupando posição de destaque no setor florestal brasileiro.

Os produtos reconstituídos de madeira têm sua importância no setor florestal e, segundo Marra (1992), são fabricados através da colagem de lâminas, tábuas, sarrafos, partículas ou fibras com dimensões e características definidas em função de suas aplicações finais. O balanço estrutural do produto é conferido através da ligação adesívica entre os elementos de madeira, sua distribuição e orientação na estrutura do composto. Percebe-se, neste contexto, a grande necessidade de informações relacionadas às características da madeira e sua influência na colagem.

Alguns estudos já foram feitos para se conhecer o comportamento diante da colagem de espécies do gênero *Eucalyptus* (Famer, 1972; Della Lucia & Vital, 1981, 1989; Nascimento et al., 2001; Serpa, 2001; Vital et al., 2006; Lobão & Gomes, 2006; Lima et al., 2008).

Um outro fato que se deve levar em consideração é o adesivo utilizado na colagem. Em componentes estruturais, o adesivo resorcinol-formaldeído é muito utilizado uma vez que ele confere às juntas coladas alta resistência

mecânica, elevada resistência à água e à temperatura. Porém é um adesivo que possui custo elevado, o que nos leva a propor alternativas, como por exemplo, o emprego do mesmo em madeiras de reflorestamento que poderia fazer com que o custo final do produto seja menor. Por isso torna-se de grande importância conhecer e estudar o comportamento deste adesivo em madeira do gênero *Eucalyptus*.

O processo de colagem é influenciado pelas propriedades anatômicas da madeira e segundo Marra (1992) a relevância está voltada aos seus efeitos no movimento do adesivo para o interior da estrutura da madeira, ou seja, relativo à penetração. Dentre as principais características anatômicas da madeira que influenciam a colagem, podem-se citar: os anéis de crescimento (lenho inicial e tardio), percentagem de cerne e albarno, lenhos de reação, grã, porosidade, fibra, parênquima, raios e tiloses.

A estrutura diferenciada dos anéis de crescimento pode ocasionar problemas relativos à penetração de adesivos, à linha de cola “faminta” ou “espessa”, o que é contornável pela alteração na formulação do adesivo (Iwakiri, 2005). O cerne, em relação ao albarno, é menos permeável, possuindo maiores dificuldades na secagem e na absorção de produtos, como adesivos (Burger & Richter, 1991). A presença de madeira juvenil por sua menor densidade, menor percentagem de lenho tardio e elementos fibrosos de menor comprimento com paredes mais finas, com menor conteúdo de celulose, também pode interferir no processo de adesão (Vital et al., 2006).

Os constituintes químicos da madeira também podem interferir no processo de colagem. E em relação aos extrativos sua presença, quantidade e tipo podem afetar a adesão. Pesquisas têm mostrado que os extrativos na superfície da madeira são os principais contribuidores da inativação da superfície, gerando assim um pobre umedecimento do adesivo. Os adesivos utilizados em madeira, na sua maioria, usam a água como carreador, gerando

assim problema de umedecimento, fluxo e penetração da superfície coberta pelo extrativo (Skeist, 1990; Forest Products Laboratory, 1999). Outra influência do extrativo se dá na alteração do pH da superfície da madeira.

O trabalho teve com objetivo caracterizar anatomicamente e quantificar o teor de extrativos totais em diferentes posições do tronco da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e avaliar a influência dessas características sobre a resistência ao cisalhamento e percentagem de falha na madeira em juntas coladas com adesivo termoendurecedor resorcinol-formaldeído.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material de estudo e caracterização da área

Utilizou-se madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, provenientes de duas árvores cultivadas no município de Lavras, MG. As árvores apresentavam 18 anos de idade e diâmetro médio de 23cm a 1,30m do solo.

A cidade de Lavras, no Sul de Minas, localiza-se nas coordenadas 21°14'S de latitude e longitude 45°00'W, à altitude média de 900 m. A precipitação média anual está em torno de 1.400 mm e a temperatura média anual é de 19,4° C. A área de plantio possui relevo declivoso, com predominância de solo podzólico. O plantio foi feito em covas, com espaçamento de 2x2m. Na área realizaram-se desbastes sucessivos e corte seletivo.

4.2 Obtenção das tábuas

De cada árvore retirou-se uma tora com 4 metros de comprimento, sendo este obtido a partir da base da árvore. As toras foram processadas na forma de

tábuas com espessuras médias de 25 mm conforme mostrado na figura 2. Foram obtidas amostras próximo à medula (A), próximo à casca (C) e à região intermediária (B). Tais amostras foram secas ao ar livre e após a secagem foram cortadas em três posições adjacentes considerando-se o sentido longitudinal da tora, a partir das quais obteve-se tábuas que foram consideradas como base da tora (região próxima à base da árvore, com 1,3 metros de comprimento), meio da tora (1,3 metros de comprimento) e ápice da tora (1,3 metros de comprimento).

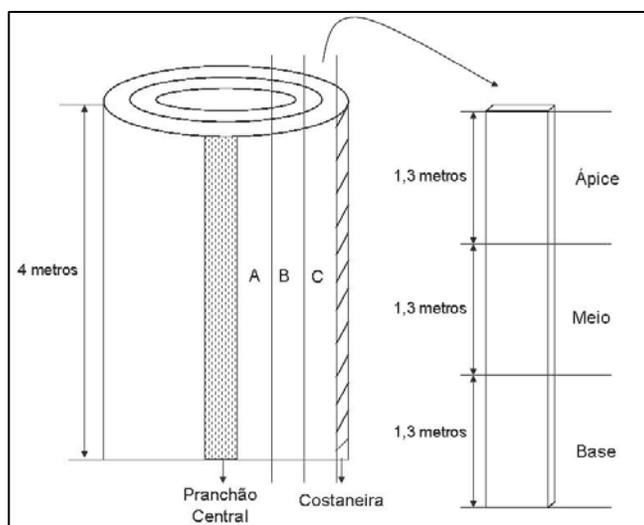


FIGURA 5 Esquema de obtenção das tábuas, em que “A” se refere à região próxima à medula; “B” à região intermediária e “C” à região próxima à casca

Das tábuas obtidas foram retiradas amostras de 20 cm nas extremidades que foram destinadas à caracterização anatômica e à análise do teor de extrativos totais da madeira.

4.3 Caracterização anatômica e determinação do teor de extrativos totais

Para confecção de lâminas permanentes, foram obtidos corpos-de-prova orientados nos planos transversal, longitudinal radial e tangencial, nas dimensões de 1x1x1 cm. Após o amolecimento em água, procedeu-se o

seccionamento em micrótomo de deslizamento modelo Jung SM 2000, com espessura variando de 14 a 16 micrômetros. As seções foram coradas com corante safranina (1% p/v), sendo posteriormente desidratadas em série alcoólicas ascendente, e embebidas gradativamente em acetato de butila (soluções de álcool: acetato de butila, 3: 1, 1:1, 1:3 e acetato de butila p.a.) e, após serem aparados, esses foram fixados em lâminas permanentes com o adesivo Entellan. A metodologia utilizada na confecção das lâminas permanentes foi aquela descrita por Burger & Richter (1991).

Para o preparo de lâminas provisórias, foi efetuado o desmembramento dos tecidos componentes da madeira através de uma solução macerante de peróxido de hidrogênio e ácido acético 1N, na proporção de 1: 1 (v/v). As lâminas foram preparadas com glicerina e o material histológico, corado com corante safranina, de acordo com o Método de Franklin (Franklin, 1945).

Foram mensurados o comprimento e a largura das fibras, espessura da parede, diâmetro e frequência dos vasos, altura, largura e frequência dos raios, de acordo com a norma International Association of Wood Anatomists – IAWA (1989); utilizando-se um software de análise de imagem (Wincell-Pro) do laboratório de Anatomia da Madeira do DCF/UFLA.

A determinação do teor de extrativos totais foi feita de acordo com a norma ABTCP M 3/69 (Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel – ABTCP, 1974). A serragem foi moída em moinho martelo, e classificadas em peneiras de 40 e 60 mesh, utilizando-se a serragem que ficou retida na peneira de 60 mesh. A umidade da serragem em base seca foi determinada para que pudesse ser utilizado o peso absolutamente seco da madeira, na determinação do teor de extrativos totais. Foram realizadas duas repetições por amostra, perfazendo um total de 36 amostras.

4.4 Confeção e avaliação das juntas coladas

As tábuas obtidas foram processadas na forma de sarrafos, nas dimensões de 0,5 x 10 x 30 cm (espessura x largura x comprimento), destinados à preparação das juntas coladas de acordo com a norma ASTM D 2339-98 (ASTM, 2000). Os sarrafos obtidos foram acondicionados em uma câmara de climatização a $25 \pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura a $60 \pm 2\%$ de umidade relativa, para posterior colagem, ficando os sarrafos com umidade média em torno de 12%.

O adesivo termoendurecedor utilizado foi o resorcinol - formaldeído (Cascofen-RS-216- cedido pela Alba Química) com teor de sólidos de 60%, viscosidade de 5500cP, pH de 7,1 e tempo de endurecimento de 8 horas aproximadamente. Adicionou-se endurecedor (preparado endurecedor FM), na proporção de uma para cinco partes de adesivo resorcinol-formaldeído.

A gramatura do adesivo utilizada foi de 250 g/m^2 aplicado em face dupla. O adesivo foi preparado previamente antes de seu emprego e espalhado sobre as superfícies com auxílio de um pincel. As juntas foram imediatamente fechadas e, assim, permaneceram por aproximadamente 15 minutos, sendo, então, prensadas a frio a 12 kgf/cm^2 durante 24 horas. Confeccionou-se 36 pares de juntas para cada árvore, resultado de um delineamento fatorial completo do tipo $3 \times 3 \times 3$, correspondentes às combinações entre posição radial, posição longitudinal e três repetições.

Após a colagem, as juntas foram novamente acondicionadas na câmara de climatização, nas mesmas condições já citadas, por aproximadamente 15 dias e então foram desdobradas em 12 corpos-de-prova cada uma. Foram realizados testes de resistência ao esforço ao cisalhamento nos corpos-de-prova em uma máquina pneumática de ensaio marca Contenco-Pavitest Cisalhamento na Colagem 1.01-0, modelo I 4230, instalada no no Laboratório de Adesão e Adesivos na Unidade Experimental de Produção de Painéis de Madeira DCF-UFLA, Lavras, MG. Após a ruptura, quatro pessoas da área de Ciência e

Tecnologia da Madeira inspecionaram todos os corpos-de-prova, com o auxílio de uma lâmina reticulada, a quantificação da percentagem de falha na madeira. As avaliações da percentagem de falhas na madeira foram julgadas pela ASTM D-3110 (ASTM, 1994).

4.5 Análise estatística dos dados

As análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o software SAEG 9.1. Foram avaliadas as correlações existentes entre as características anatômicas e teor de extrativos totais com a qualidade das juntas coladas (resistência ao esforço de cisalhamento e percentagem de falha na madeira) com o adesivo resorcinol-formaldeído. Utilizou-se o coeficiente de correlação de Pearson, a 1% de probabilidade pelo teste t de Student.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Características anatômicas, teor de extrativos totais, resistência ao cisalhamento e percentagem de falha na madeira nas diferentes posições da tora.

Na Tabela 8 estão apresentados os valores médios e o coeficiente de variação para as características anatômicas, teor de extrativos totais, resistência ao cisalhamento e percentagem de falha na madeira para a posição radial da tora da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden.

TABELA 8 Valores médios para as características anatômicas, teor de extrativos totais, resistência ao cisalhamento e percentagem de falha na madeira para a posição radial da tora da madeira de *Eucalyptus grandis*

Parâmetros	Medula		Intermediária		Casca	
	Média	CV(%)	Média	CV(%)	Média	CV(%)
Largura de fibra (μm)	16,30	19,50	16,10	18,09	17,04	20,47
Espessura de parede (μm)	4,47	25,52	4,43	24,86	5,23	23,74
Espessura do lume (μm)	7,36	31,52	7,24	33,63	6,58	37,16
Comprimento de Fibra (mm)	1,16	17,43	1,15	15,33	1,25	15,73
Frequência de Vasos (vasos/ mm^2)	2,08	33,16	1,63	26,77	1,50	28,31
Diâmetro do vaso (μm)	155,85	21,96	167,93	17,46	191,55	26,04
Altura do raio (mm)	0,21	31,12	0,21	31,24	0,20	34,60
Largura do raio (μm)	8,04	28,42	7,71	32,13	8,47	32,42
Frequência de raio (raios/mm)	1,89	15,73	1,83	18,06	1,76	14,88
Teor de extrativos totais (%)	6,10	11,45	6,62	5,91	8,84	6,49
Resistência ao cisalhamento (Mpa)	3,81	16,64	4,72	10,99	5,73	10,42
Percentagem de falha na madeira (%)	97,15	28,71	93,04	12,35	76,96	34,19

CV=coeficiente de variação

Na Tabela 9 estão apresentados os valores médios e o coeficiente de variação para as características anatômicas, teor de extrativos totais, resistência ao cisalhamento e percentagem de falha na madeira para a posição longitudinal da tora da madeira de *Eucalyptus grandis*.

TABELA 9 Valores médios para as características anatômicas, teor de extrativos totais, resistência ao cisalhamento e percentagem de falha na madeira para a posição longitudinal da tora da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Parâmetros	Base		Meio		Topo	
	Média	CV(%)	Média	CV(%)	Média	CV(%)
Largura de fibra (μm)	16,57	19,63	16,26	18,43	16,60	20,01
Espessura de parede (μm)	4,96	25,28	4,45	22,70	4,72	26,14
Espessura do lume (μm)	6,65	37,00	7,36	29,25	7,17	36,06
Comprimento de Fibra (mm)	1,19	15,70	1,16	16,61	1,21	16,17
Frequência de Vasos (vasos/ mm^2)	1,73	29,07	1,82	29,63	1,65	29,54
Diâmetro do vaso (μm)	170,31	21,47	167,24	26,99	177,77	17,00
Altura do raio (mm)	0,21	30,96	0,21	31,93	0,21	34,07
Largura do raio (μm)	8,35	33,84	8,05	31,08	7,84	28,06
Frequência de raio (raios/mm)	1,75	18,57	1,92	14,95	1,80	15,16
Teor de extrativos totais (%)	7,56	13,21	6,02	6,39	7,98	4,25
Resistência ao cisalhamento (Mpa)	4,82	13,96	4,78	11,58	4,67	12,52
Percentagem de falha na madeira (%)	84,22	37,79	90,09	14,51	92,84	22,96

CV=coeficiente de variação

A largura média das fibras no sentido radial foi maior casca (17,04 μm), e no sentido longitudinal foi menor na posição do meio (16,26 μm), sendo classificadas como estreitas. No sentido radial, a espessura média de parede das fibras foi maior na casca (5,23 μm) e no sentido longitudinal foi menor na posição do meio (4,45 μm), classificada como média. A espessura média do lume das fibras decresceu no sentido medula-casca variando de 7,36 a 6,58 μm e no sentido longitudinal foi menor na posição da base (6,65 μm). O comprimento médio das fibras no sentido radial foi maior na posição próxima à casca (1,25 mm) e no sentido longitudinal foi menor na posição do meio (1,16 μm), classificado como curtas. O diâmetro médio do vaso aumentou no sentido medula-casca variando de 155,85 a 191,55 μm e no sentido longitudinal foi menor na posição do meio (167,24 μm), classificado como médio. A frequência

de vaso decresceu no sentido medula-casca variando de 2,08 a 1,50 vasos/mm² e no sentido longitudinal foi menor na posição próxima ao ápice da tora (1,65 vasos/mm²), classificada como poucos. Não houve variação da altura dos raios nos sentidos radial e longitudinal sendo classificados como extremamente baixos. No sentido radial a largura do raio foi menor na posição intermediária (7,71 µm) e no sentido base-ápice houve decréscimo variando de 8,35 a 7,84 µm, classificados como extremamente fino. A frequência média do raio no sentido radial foi menor na posição próxima à casca (1,76 raios/mm) e no sentido longitudinal foi menor na posição próxima à base (1,75 raios/mm), classificada como pouco numerosos. Todas as classificações seguiram a norma International Association of Wood Anatomists – IAWA (1989).

Tomazello Filho (1985) estudando a estrutura anatômica de oito espécies de eucalipto encontrou para a espécie *Eucalyptus grandis* aos dez anos de idade, frequência de vaso de 7 vasos/mm², diâmetro tangencial do vaso igual a 111 µm, frequência de raios de 9 raios/mm, altura média do raio de 0,20 mm, largura média do raio igual a 14 µm, comprimento de fibras igual a 1,2mm, largura de fibra igual a 23 µm, a espessura da parede média igual a 5,4 µm e diâmetro do lúmen igual a 12,2 µm. Os valores encontrados por este autor, com exceção da altura do raio, foram diferentes dos encontrados neste trabalho, tal fato pode ter ocorrido devido a diferença de idade da espécie estudada e diferentes condições edafo-climáticas.

Em relação ao teor de extrativos totais, no sentido radial, houve um acréscimo no sentido medula-casca, variando de 6,10 a 8,84 % . E no sentido longitudinal o maior valor encontrado foi na posição próxima ao ápice da tora (7,98%). Os valores médios encontrados estão em conformidade com o normalmente relatado na literatura usual como em Trugilho et al. (2003) e Silva et al. (2005). Silva et al. (2005) estudando a influência da idade e da posição ao longo do tronco na composição química da madeira de *Eucalyptus grandis*,

encontrou que o teor de extrativos totais apresentou tendência de crescimento em relação à posição do disco ao longo do tronco, no sentido base–topo.

No sentido radial os valores médios da resistência ao cisalhamento aumentaram no sentido medula-casca variando de 3,81 a 5,73 Mpa. E no sentido longitudinal decresceu no sentido base-topo variando de 4,82 a 4,67 Mpa. Em relação à percentagem de falha na madeira esta foi menor na posição próxima à casca (76,96 %) e no sentido longitudinal houve aumento no sentido base-ápice da tora variando de 84,22 a 92,84%.

5.2 Relação das características anatômicas e o teor de extrativos totais da madeira com a qualidade da colagem

Na Tabela 10 apresentam-se as correlações obtidas pelo teste de Correlação de Pearson, entre as características anatômicas e teor de extrativos totais da madeira em estudo e a qualidade das juntas coladas com adesivo resorcinol-formaldeído quanto à resistência ao cisalhamento e percentagem de falha na madeira.

TABELA 10 Coeficiente de correlação de Pearson entre as características anatômicas e o teor de extrativos totais da madeira de *Eucalyptus grandis* com a qualidade das juntas coladas com adesivo resorcinol-formaldeído quanto à resistência ao cisalhamento e percentagem de falha na madeira.

Características da madeira	Resistência ao cisalhamento	Falha na madeira
Diâmetro do vaso	0,6867*	-0,683
Frequência de vaso	-0,5849	0,5306*
Altura do raio	-0,2333	0,096*
Largura do raio	0,1939*	-0,3379
Frequência de raio	-0,2959	0,2623*
Largura de fibra	0,5289*	-0,401
Largura da parede da fibra	0,5784*	-0,5337
Espessura do lume da fibra	-0,3162	0,3936*
Comprimento de fibra	0,4474*	-0,4692
Extrativos totais	0,5423*	-0,6129

e*.:Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t de Student.

Os parâmetros anatômicos que foram significativos segundo o coeficiente de Pearson para a correlação destes com a resistência ao cisalhamento são: diâmetro do vaso, largura da parede da fibra, largura e o comprimento da fibra e largura do raio. Estes parâmetros influenciaram positivamente a resistência ao ensaio de cisalhamento, ou seja, quanto maior foi o valor médio do parâmetro anatômico em questão, maior foi a resistência da junta colada ao esforço de cisalhamento.

A dimensão do diâmetro do vaso pode facilitar a entrada do adesivo na célula fazendo com que este interaja com a mesma e forme uma maior aderência entre os dois elos e conseqüentemente a ligação se torna mais forte e aumenta a resistência ao esforço de cisalhamento. Porém vasos com dimensões de diâmetro muito altas podem ocasionar linha cola faminta e conseqüentemente baixa resistência ao produto colado.

Em relação à largura e o comprimento da fibra, à largura da parede da fibra e à largura do raio estes se comportam da mesma maneira que o diâmetro do vaso, assim quanto maior a largura da fibra, da parede e do raio maior será a penetração do adesivo na célula e conseqüentemente maior será a adesão entre os dois substratos e maior a será a resistência da linha de cola ao esforço de cisalhamento.

Lima et al. (2007) estudaram a influência das características anatômicas sobre a qualidade de colagem de clones de eucalipto e encontrou que a frequência de vasos, frequência e largura dos raios influenciam na colagem da madeira em relação à resistência ao ensaio de cisalhamento. E em relação à percentagem de falha na madeira, o mesmo autor encontrou que o diâmetro do vaso influenciou tal variável.

Para a correlação dos parâmetros anatômicos e a porcentagem de falha na madeira foi significativa a frequência de vasos, a espessura do lume da fibra, a frequência e a altura do raio. Sendo que a correlação foi positiva entre os parâmetros anatômicos em questão e a porcentagem de falha na madeira.

A frequência de vasos está relacionada com a porosidade que se relaciona com a densidade, que influenciam na penetração dos adesivos na madeira (Iwakiri, 2005). De acordo com o coeficiente de Pearson (0,5306) para a correlação entre a frequência de vaso e percentagem de falha na madeira este indica que quanto maior for a quantidade de vaso presente na madeira maior será a percentagem de falha da madeira, este fato provavelmente ocorreu devido ao adesivo empregado, que é de alta resistência, formando uma linha de cola mais resistente que a própria madeira. O mesmo ocorreu para a correlação entre a frequência de raios e percentagem de falha na madeira, cujo coeficiente de Pearson foi de 0,2623.

Em relação à correlação entre a altura de raio e a percentagem de falha na madeira, o coeficiente de Pearson foi muito baixo (0,096) indicando que a altura do raio pouco interfere na percentagem de falha na madeira.

A espessura do lume da fibra influenciou a percentagem de falha na madeira segundo o coeficiente de Pearson que foi de 0,3936. À medida que aumenta a espessura do lume das fibras, maior é a penetração do adesivo nesta célula, o que pode provocar linha de cola faminta e conseqüentemente maior percentagem de falha na madeira.

Encontrou-se para o teor de extrativos totais o coeficiente de Pearson de 0,5423, indicando a influência do teor de extrativos sobre a qualidade de colagem em relação a resistência ao ensaio de cisalhamento. A correlação foi positiva, ou seja, quanto maior for a quantidade de extrativos totais presentes na madeira, maior será a qualidade de colagem em relação à resistência ao ensaio de cisalhamento. Como o processo de colagem da madeira foi feito a frio (temperatura ambiente) a migração dos extrativos para a superfície não pode ter ocorrido, fato este, segundo Marra (1992) faz com que ocorra a inativação da superfície prejudicando o contato adesivo-madeira. Mas como os extrativos estão presentes em toda a madeira, concentrando-se ou não em algum local, pode ter ocorrido uma reação entre o adesivo resorcinol-formaldeído e os extrativos e isso pode ter aumentado a resistência da linha de cola, podendo haver a interação entre os extrativos e o adesivo sintético melhorando assim a adesão propriamente dita.

6 CONCLUSÕES

- As fibras apresentaram comprimento curto, largura estreita e a espessura da parede média. Os vasos apresentaram diâmetro médio, sendo que estes foram

poucos. A altura média dos raios foi extremamente baixa e a largura extremamente fina. A frequência média do raio foi pouco numerosa.

- Os parâmetros anatômicos que influenciaram a resistência ao ensaio de cisalhamento foram: diâmetro do vaso, largura da parede da fibra, largura e o comprimento da fibra e largura do raio.

- Para a correlação dos parâmetros anatômicos e a porcentagem de falha na madeira foi significativa a frequência de vasos, a espessura do lume da fibra, a frequência e a altura do raio.

- O teor de extrativos totais influenciou a qualidade de colagem em relação a resistência ao ensaio de cisalhamento.

- No sentido medula-casca a largura e o comprimento das fibras, a espessura da parede das fibras, o diâmetro do vaso, largura do raio e teor de extrativos totais apresentaram acréscimo nos valores médios. Os valores médios da resistência ao cisalhamento seguiram a mesma tendência de aumento e porcentagem de falha na madeira apresentou o inverso. A frequência de vaso, altura do raio, frequência de raio e espessura do lume da fibra apresentaram decréscimo dos valores médios neste sentido.

- No sentido base-ápice da tora os valores médios de espessura do lume das fibras, comprimento das fibras, diâmetro dos vasos, frequência de raio, teor de extrativos totais e porcentagem de falha na madeira apresentaram aumento nos valores médios. Os demais parâmetros apresentaram tendência inversa.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of ASTM standards:** adhesives. Philadelphia, 1994. 600 p. D-3110 Standard specification for adhesives used in nonstructural glued lumber products.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of ASTM standards:** adhesives. Philadelphia, 2000. 600 p. D2339-98 Standard test method for strength properties of adhesives in two-ply wood construction in shear by tension loading.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF:** ano base 2008. Brasília: ABRAF, 2009. 120 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. **Métodos de ensaio.** São Paulo: ABTCP, 1974. 18 p.

BURGER, M. L.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira.** São Paulo: Nobel, 1991. 224 p.

DELLA LUCIA, R. M.; VITAL, B. R. Avaliação da qualidade de juntas coladas de madeira de três espécies de *Eucalyptus*. **Árvore**, Viçosa, MG, v. 5, n. 2, p. 172-180, 1981.

DELLA LUCIA, R. M.; VITAL, B. R. Ensaio de adesão das madeiras de *Eucalyptus gummifera*, *E. paniculata* e *E. resinifera*. **Árvore**, Viçosa, MG, v. 13, n. 1, p. 98-106, 1989.

FAMER, R. M. **Handbook of hardwoods.** London: Her Majesty's Stationery Office, 1972. 244 p.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook:** wood as an engineering material. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture - Forest Service - Forest Products Laboratory, 1999.

FRANKLIN, G. L. Preparation of thin sections of synthetic resins and wood-resin composites, and a new macerating method for wood. **Nature**, London, v. 155, n. 3924, p. 51, 1945.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMISTS. List of microscopic features for hardwood identification. **IAWA Bulletin**, Leiden, v. 10, n. 3, p. 219-332, 1989.

IWAKIRI, S. (Ed.). **Painéis de madeira reconstituída.** Curitiba: FUPEF, 2005. 247 p.

- LIMA, C. K. P.; MORI, F. A.; MENDES, L. M.; CARNEIRO, A. C. O. Características anatômicas e química da madeira de clones de *Eucalyptus* e sua influência na colagem. **Cerne**, Lavras, v. 13, n. 2, p. 123-129, 2007.
- LIMA, C. K. P.; MORI, F. A.; MENDES, L. M.; TRUGILHO, P. F.; MORI, C. L. S. O. Colagem da madeira de clones de *Eucalyptus* com três adesivos comerciais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 77, p. 73-77, mar. 2008.
- LOBÃO, M. S.; GOMES, A. Qualidade da adesão de madeira de eucalipto em corpos-de-prova colados em dois diferentes planos e densidades. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 194-200, abr./jun. 2006.
- MARRA, A. A. **Technology of wood bonding: principles and practice**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992. 453 p.
- NASCIMENTO, A. M.; DELLA LUCCIA, R. M.; VITAL, B. R. Colagem de emendas biseladas em madeiras de *Pinus* spp. e *Eucalyptus citriodora*. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 44-51, 2001.
- SERPA, P. N. **Avaliação da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, *Eucalyptus saligna* Smith e *Pinus elliottii* Engelm. para a produção de móveis**. 2001. 82 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- SILVA, J. C.; MATOS, J. L. M.; OLIVEIRA, J. T. S.; EVANGELISTA, W. V. Influência da idade e da posição ao longo do tronco na composição química da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. **Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 3, p. 455-460, 2005.
- SKEIST, I. **Handbook of adhesives**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 778 p.
- TOMAZELLO FILHO, M. Estrutura anatômica da madeira de oito espécies de eucalipto cultivadas no Brasil. **IPEF**, Piracicaba, v. 29, n. 29, p. 25-36, abr. 1985.
- TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MORI, F. A. Correlação canônica das características químicas e físicas da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, Lavras, v. 9, n. 1, p. 066-080, 2003.

VITAL, B. R.; MACIEL, A. S.; DELLA LUCIA, R. M. Qualidade de juntas coladas com lâminas de madeira oriundas de três regiões do tronco de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*. **Árvore**, Viçosa, MG, v. 30, n. 4, p. 637-644, 2006.

CAPÍTULO 4
ESTUDO DA INTERFACE MADEIRA-ADESIVO DE
JUNTAS COLADAS COM RESORCINOL-FORMALDEIDO
E MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden.

1 RESUMO

Compreender a interação da interface madeira-adesivo é de grande importância, uma vez que o conhecimento desta interação trará subsídios para confeccionar produtos de madeira de boa qualidade. O objetivo desse estudo foi visualizar a interface madeira-adesivo, mensurar a espessura da linha de cola e correlacionar essa variável com a resistência ao cisalhamento e percentagem de falha na madeira utilizando juntas coladas provenientes das posições radial e longitudinal da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. Prepararam-se as juntas coladas de acordo com a norma ASTM D 2339-98. Utilizou-se gramatura de 250 g/m², em face dupla. Para a visualização da interface madeira-adesivo retirou-se dois corpos-de-prova de cada região (radial e longitudinal) do tronco. De cada corpo-de-prova cortou-se um bloco central de 0,5 cm³ que foi amolecido em água e posteriormente procedeu-se o seccionamento em micrótomo de deslizamento, com espessura de 18 micrômetros. Verificou-se que foi possível visualizar a linha de cola produzida pela ligação entre o adesivo e a madeira. Houve penetração do adesivo nos vasos, nas fibras e nos raios. A espessura da linha de cola principal variou no sentido radial, sendo maior na região próxima à medula e menor próxima à casca e houve relação inversa com a tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento neste sentido. No sentido radial a percentagem de falha na madeira foi maior na região próxima à medula e menor na região próxima à casca. No sentido longitudinal, tanto a espessura da linha de cola quanto à tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento sofreram decréscimo no sentido base-ápice da tora. E a percentagem de falha na madeira sofreu acréscimo nesse sentido.

2 ABSTRACT

Understanding the interaction of wood-adhesive interface is of great importance, since knowledge of this interaction will bring benefits to manufacture products of good quality wood. The aim of this study was to see the wood-adhesive interface, measure the thickness of glue line and to correlate this variable with the shear strength and percentage of failure in bonded joints using wood from the radial and longitudinal positions of *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. Prepared glued joints according to ASTM D 2339-98. We used the weight of 250 g/m², double-sided. To visualize the wood-adhesive interface withdrew two bodies-specimens of each region (radial and longitudinal) of the trunk. Each body-of-cut evidence is a central block of 0.5 cm³ which was softened in water and then preceded to cutting into sliding microtome with a thickness of 18 micrometers. It was found that could see the glue line produced by the connection between the adhesive and wood. There was penetration of the adhesive in vessels, fibers and rays. The thickness of glue line main ranged in a radial direction, being higher in the region close to the spinal cord and lower next to the bark and was inversely related to the tensile shear test in this regard. In the radial direction the percentage of wood failure was greater in the region close to the bone and lowest in the region close to the bark. In the longitudinal direction, the thickness of glue line on the tensile strength of the test suffered a decrease in base-apex direction of the log. And the percentage of wood failure has increased accordingly.

3 INTRODUÇÃO

Com a crescente utilização de produtos à base de compostos de madeira torna-se importante compreender a interação da interface entre a madeira e o adesivo utilizado na confecção de produtos colados, principalmente em relação à madeira do gênero *Eucalyptus*, que apresenta rápido crescimento, boa produtividade e grande capacidade de adaptação, além de representar uma grande área no que se refere a florestas plantadas.

Os principais conceitos de uma ligação adesívica são: adesivo, adesão e aderentes. Comercialmente, os adesivos têm sido utilizados para produzir uma gama de produtos de madeira de alto valor, tais como vigas laminadas, compensados, OSB e aglomerados (Singh et al., 2008). A função de um adesivo, além de aderir dois substratos, é fluir e preencher espaços vazios entre as juntas a serem coladas, diminuindo assim, a distância entre elas, gerando interações entre o próprio adesivo e o substrato (Pizzi, 1994).

Sernek et al. (1999) definem penetração do adesivo como a distância espacial a partir da interface do substrato adjacente. A profundidade da penetração do adesivo determina o tamanho da região de interface, que Brady & Kamke (1988) definem como o volume que contém células de madeira e adesivo.

A adesão (fenômeno interfacial ou a energia de separação de dois substratos) entre a madeira e o adesivo depende de uma série de fatores como, as características inerentes à própria madeira (anatomia, química e física), características do adesivo (químicas e físicas) e do processo adotado durante a colagem propriamente dita.

Os mecanismos envolvidos no processo de adesão podem ser explicados pelas teorias mecânicas, difusão de polímeros e adesão química (Marra, 1992).

Segundo Schultz & Nardin (1994), a teoria da adesão mecânica parte de uma chave mecânica, ou ancoramento, do adesivo dentro de cavidades, poros e asperezas da superfície da madeira e o aumento da adesão pela ligação mecânica pode ser atribuído simplesmente ao aumento da área interfacial devido à rugosidade da superfície e no quanto as características do substrato irão permitir a penetração do adesivo nos poros e cavidades. A Teoria da difusão de polímeros admite que a adesão ocorra através da difusão de segmentos de cadeias de polímeros a nível molecular através da interface, que permite consequentemente uma absorção gradual. E a Teoria da adesão química admite que a adesão ocorra através de ligações primárias iônicas ou covalentes, e/ou por forças intermoleculares secundárias. A formação da ligação química irá depender da reatividade entre o adesivo e o substrato.

A adesão é um campo muito complexo além do alcance de qualquer modelo ou teoria. Na prática, diversos mecanismos de adesão podem ocorrer simultaneamente (Schultz & Nardin, 1994).

A influência da anatomia da madeira no processo de colagem está relacionada à sua estrutura no que se refere às diferenças de dimensões dos elementos celulares, tamanho, disposição e frequência das cavidades celulares que, por sua vez, estão relacionadas com a porosidade e permeabilidade da madeira, ou seja, essas características influenciam na mobilidade e penetrabilidade do adesivo (Marra, 1992; Pizzi, 1994).

A madeira laminada colada (MLC) é um produto utilizado na construção de pequenas passarelas, escadas, abrigos, cobertura, pontes e vigas estruturais. São peças reconstituídas a partir de lâminas de madeira (tábuas), que são de dimensões relativamente reduzidas se comparadas às dimensões da peça final assim constituída. Essas lâminas, que são unidas por colagem, ficam dispostas de tal maneira que as suas fibras fiquem paralelas entre si (Szucs et al., 2006).

Assim, na madeira laminada colada é possível ver a linha de cola em um plano transversal e em um plano longitudinal.

Um dos problemas encontrados na abertura do mercado para a MLC, além da aceitação pelo usuário quanto à sua qualidade, é o seu alto custo (Melotto, 2007), uma vez que se usa adesivo “cold-setting”, ou seja, termoendurecedor de cura fria, que possui custo elevado em relação aos outros adesivos sintéticos.

Os estudos que envolvem o conhecimento científico sobre a colagem da madeira de eucalipto são escassos, principalmente no que se refere a interação desta madeira com adesivos sintéticos existentes no mercado. Os estudos já realizados estão mais voltados para o comportamento da resistência das juntas coladas, mas não trazem informações de como essa resistência é formada, ou seja, como ocorreu a interação do adesivo com a madeira.

O objetivo desse estudo foi visualizar a interface madeira – adesivo, mensurar a espessura da linha de cola e relacionar essa variável com a resistência ao cisalhamento e percentagem de falha na madeira utilizando juntas coladas provenientes das posições radial e longitudinal da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material de estudo e caracterização da área

Utilizou-se madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, provenientes de duas árvores cultivadas no município de Lavras, MG. As árvores apresentavam 18 anos de idade e diâmetro médio de 23cm a 1,30m do solo.

A cidade de Lavras, no Sul de Minas, localiza-se nas coordenadas 21°14’S de latitude e longitude 45°00’W, à altitude média de 900 m. A

precipitação média anual está em torno de 1.400 mm e a temperatura média anual é de 19,4° C. A área de plantio possui relevo declivoso, com predominância de solo podzólico. O plantio foi feito em covas, com espaçamento de 2x2m. Na área realizaram-se desbastes sucessivos e corte seletivo.

4.2 Obtenção das tábuas

De cada árvore retirou-se uma tora com 4 metros de comprimento, sendo este obtido a partir da base da árvore. As toras foram processadas na forma de tábuas com espessuras médias de 25 mm conforme mostrado na figura 2. Foram obtidas amostras próximo à medula (A), próximo à casca (C) e à região intermediária (B). Tais amostras foram secas ao ar livre e após a secagem foram cortadas em três posições adjacentes considerando-se o sentido longitudinal da tora, a partir das quais obteve-se tábuas que foram consideradas como base da tora (região próxima à base da árvore, com 1,3 metros de comprimento), meio da tora (1,3 metros de comprimento) e ápice da tora (1,3 metros de comprimento).

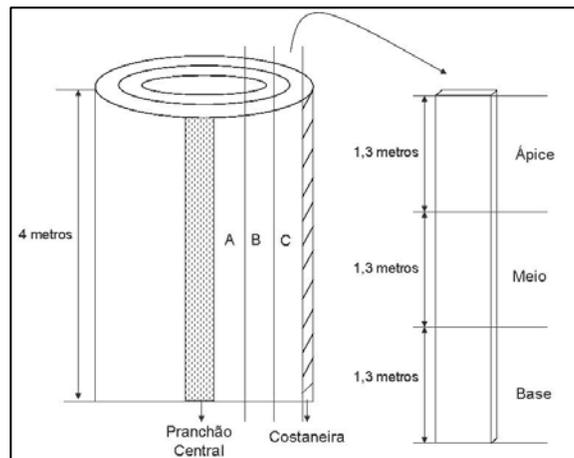


FIGURA 6 Esquema de obtenção das tábuas, em que “A” se refere à região próxima à medula; “B” à região intermediária e “C” à região próxima à casca

4.3 Confeção das juntas coladas e avaliação da colagem nas diferentes posições da tora

As tábuas obtidas foram processadas na forma de sarrafos, nas dimensões de 0,5 x 10 x 30 cm (espessura x largura x comprimento), destinados à preparação das juntas coladas de acordo com a norma ASTM D 2339-98 (ASTM, 2000). Os sarrafos obtidos foram acondicionados em uma câmara de climatização a $25 \pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura a $60 \pm 2\%$ de umidade relativa, para posterior colagem, ficando os sarrafos com umidade média em torno de 12%.

O adesivo utilizado foi o resorcinol - formaldeído (Cascophen-RS-216) com adição de endurecedor (FM), na proporção de uma para cinco partes de adesivo.

A gramatura do adesivo utilizada foi de 250 g/m^2 aplicado em face dupla. O adesivo foi preparado previamente antes de seu emprego e espalhado sobre as superfícies com auxílio de um pincel. As juntas foram imediatamente fechadas e, assim, permaneceram por aproximadamente 15 minutos, sendo, então, prensadas a frio a 12 kgf/cm^2 durante 24 horas. Foram confeccionados 36 pares de juntas para cada árvore, resultado de um delineamento fatorial completo do tipo $3 \times 3 \times 3$, correspondentes às combinações entre posição radial, posição longitudinal e três repetições.

Após a colagem, as juntas foram novamente acondicionadas na câmara de climatização, nas mesmas condições já citadas, por aproximadamente 15 dias e então foram desdobradas em 12 corpos-de-prova cada uma. Foram realizados testes de resistência ao esforço ao cisalhamento em todos os corpos-de-prova, em uma máquina pneumática de ensaio, marca Contenco-Pavitest Cisalhamento na Colagem 1.01-0, modelo I 4230, instalada no no Laboratório de Adesão e Adesivos na Unidade Experimental de Produção de Painéis de Madeira DCF-UFLA, Lavras, MG. Após a ruptura, quatro pessoas da área de Ciência e Tecnologia da Madeira inspecionaram todos os corpos-de-prova, com o auxílio

de uma lâmina reticulada, a quantificação da percentagem de falha na madeira. As avaliações da percentagem de falhas na madeira foram julgadas pela ASTM D-3110 (ASTM, 1994).

4.4 Visualização da interface madeira-adesivo

Para a visualização da interface madeira-adesivo foram retirados dois corpos-de-prova de cada região (radial e longitudinal) do tronco. Em cada corpo-de-prova foi cortado um bloco central de 0,5 x 0,5x 0,5 cm (largura, altura e comprimento), conforme figura 7. Os blocos ficaram em um dessecador com água durante duas semanas para amolecimento, posteriormente procedeu-se o seccionamento em micrótomo de deslizamento modelo Jung SM 2000, com espessura de 18 micrômetros, utilizando-se navalha específica para madeira tipo C. Os cortes da face transversal e da face longitudinal foram fixados em lâminas permanentes com o adesivo Entellan. Foram feitas duas lâminas de cada bloco contendo cortes da face transversal e da face longitudinal. Realizou-se 40 medições, sendo que estas foram medidas ao longo da linha de cola principal (indicadas pelas setas no esquema da figura 8), utilizando um software de análise de imagem (Wincell Pro) de concepção canadense, do Laboratorio de Anatomia da Madeira do DCF - UFLA. As fotomicrografias foram feitas usando câmera digital Olympus BX51 e programa Image Pro-Plus 5.1.

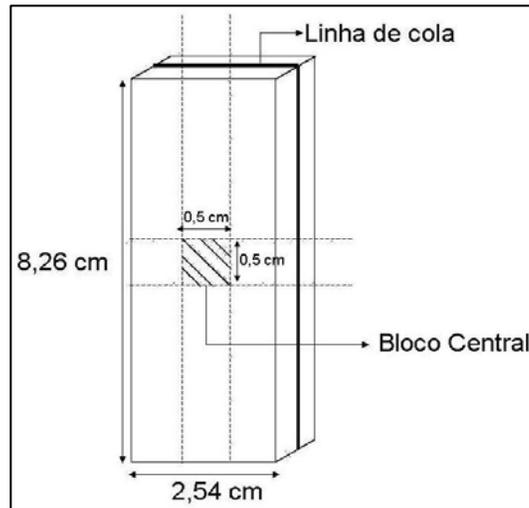


FIGURA 7 Esquema de corte do bloco central.

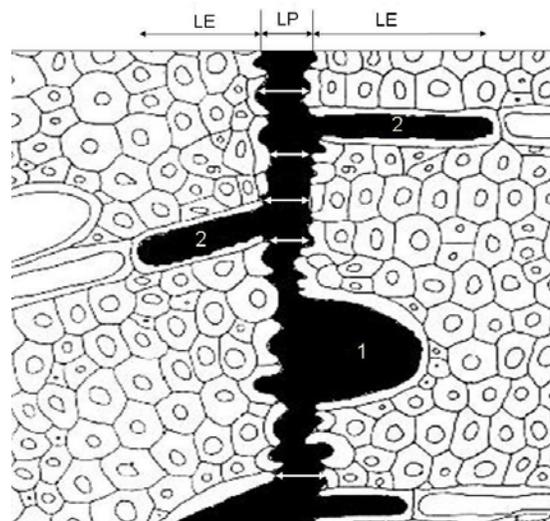
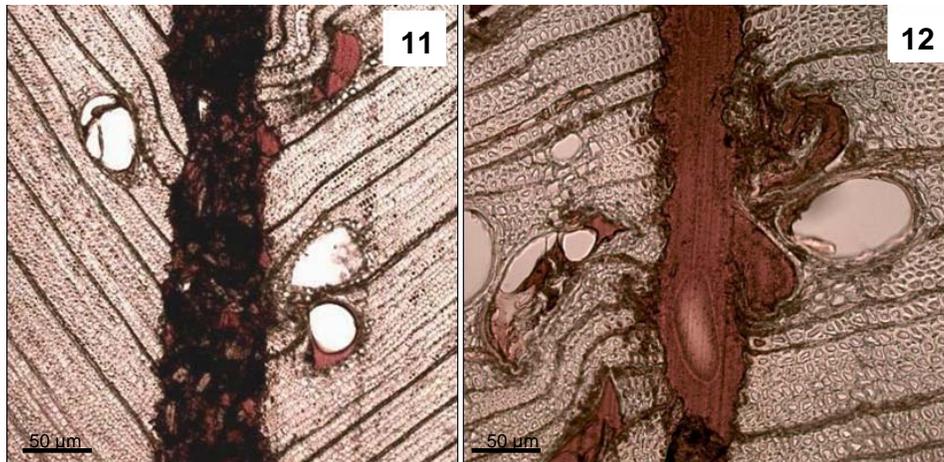
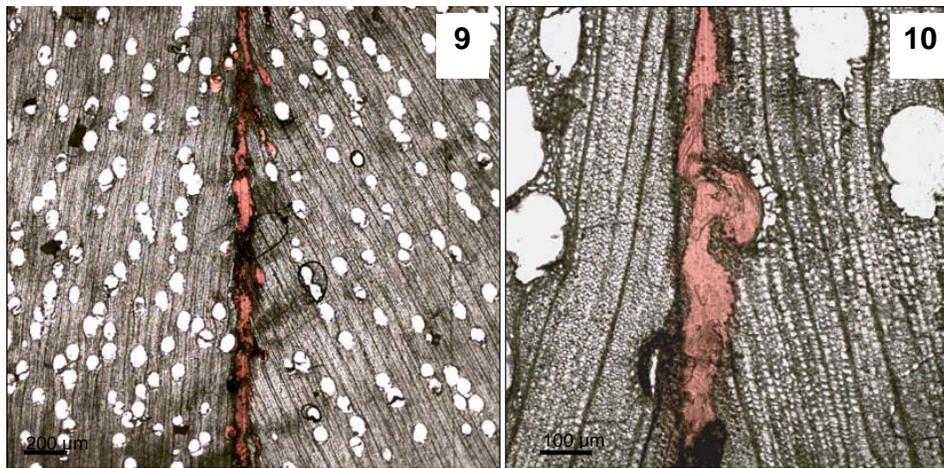


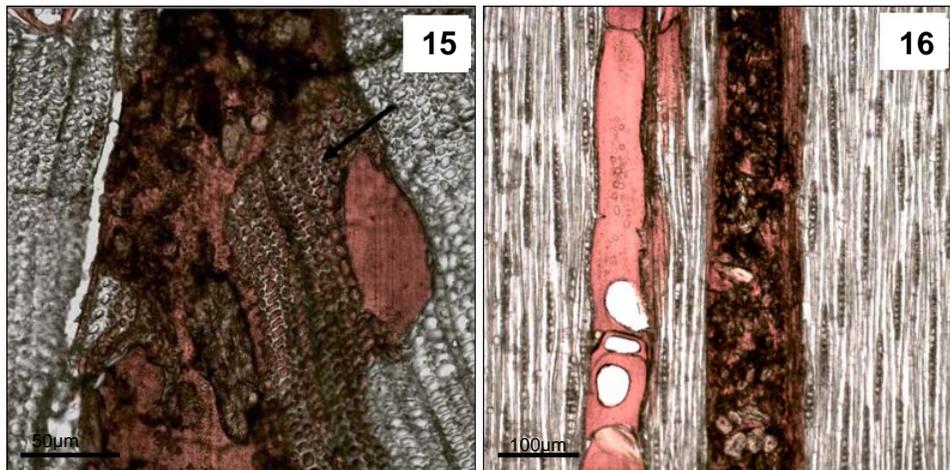
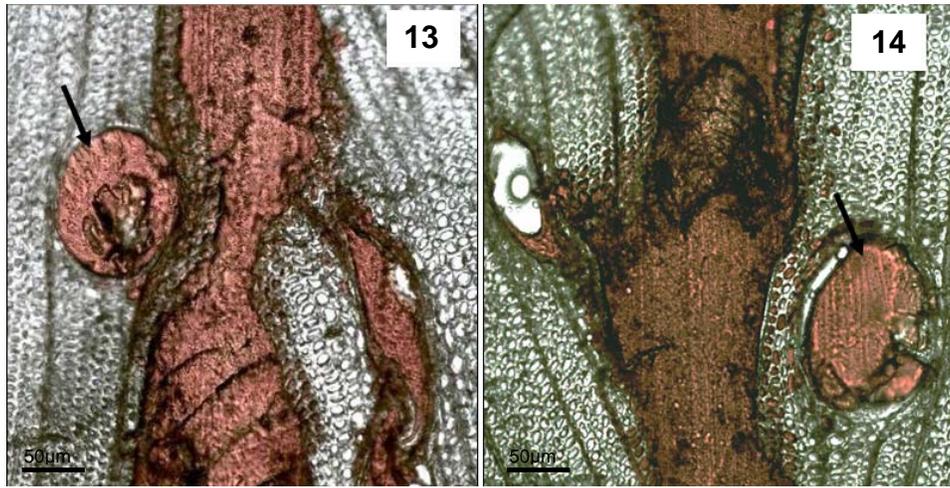
FIGURA 8 Esquema da mensuração da espessura da linha de cola. LP: linha de cola principal; LE: linha de cola estendida; 1: vasos preenchidos com adesivo; 2: raios preenchidos com adesivo. Adaptado de Tsoumis (1991).

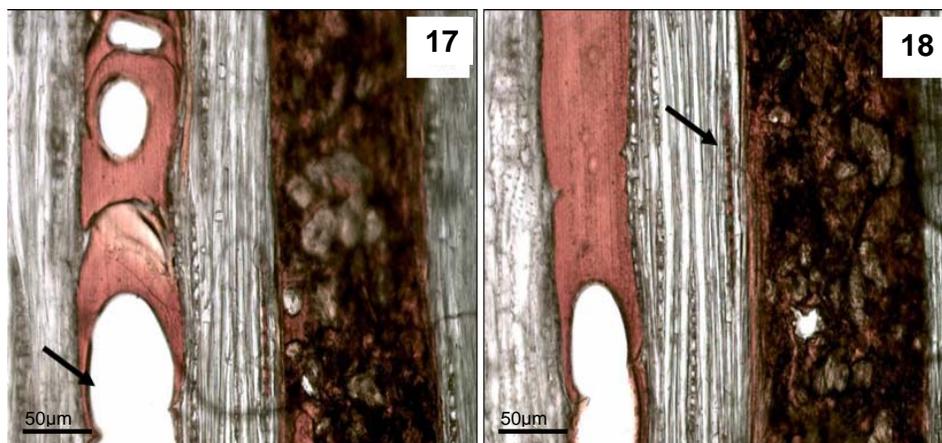
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Interface madeira-adesivo

As figuras de 9 a 18 mostram a interface madeira - adesivo nas faces longitudinais e transversais das juntas coladas com adesivo resorcinol-formaldeído da madeira de *Eucalyptus grandis*.







FIGURAS 9-18 Fotomicrografias da interface madeira - adesivo, nas faces transversais (9 a 15) e longitudinais (16 a 18) das juntas coladas da madeira de *Eucalyptus grandis* com adesivo resorcinol-formaldeído

Por meio das fotomicrografias foi possível distinguir o adesivo (de coloração avermelhada) na estrutura anatômica da madeira desta espécie de eucalipto. A linha de cola vista nas imagens tanto da face transversal (figura 8) como da face longitudinal (figura 15) se apresenta de maneira desuniforme, ou seja, ela não possui a mesma espessura ao longo da interface. Segundo Tsoumis (1991) linha de cola pouco espessa e uniforme melhora a resistência mecânica da junta colada.

Pôde-se observar a penetrabilidade do adesivo na estrutura anatômica da madeira. Chandler et al. (2005) mencionam que a penetração do adesivo na estrutura da madeira só é possível quando há boas condições de molhabilidade e que a criação de um vínculo entre o adesivo e a madeira requer uma quantidade de adesivo suficiente para penetrar na estrutura da madeira e estabelecer a ligação entre esses dois componentes. Sendo assim, pode-se dizer que a superfície da madeira apresentava boas condições para a ligação e que a quantidade de adesivo utilizada foi suficiente.

Houve a penetração do adesivo nos elementos de vasos (indicado pelas setas das figuras 12 e 13), no lume das fibras (indicado pela seta na figura 14) e ao longo dos raios (indicado pela seta na figura 17). Na figura 16, pode-se notar que a placa de perfuração (seta) não foi preenchida pelo adesivo. Autores como Tsoumis (1991) e Marra (1992) relatam a penetração do adesivo nos componentes anatômicos da madeira.

Os elementos de vaso são células com perfurações em suas paredes terminais e/ou laterais e estas células comunicam entre si através dessas perfurações, que são regiões completamente abertas, desprovidas de paredes primárias e secundárias. A dimensão dos elementos de vaso quando comparada às fibras é muito maior. Essas características podem ter contribuído para a entrada do adesivo nesta estrutura e assim formado um ancoramento entre o mesmo e o elemento de vaso. Como os elementos de vaso se dispõem um sobre o outro em séries longitudinais (figura 15), formando longos tubos, de comprimento variado, o adesivo pôde fluir de um vaso para outro.

A parte perfurada da parede do elemento de vaso é chamada placa de perfuração, que é uma região desprovida de parede primária e secundária. Uma placa de perfuração pode apresentar uma única perfuração, constituindo uma placa perfurada simples, como é o caso da madeira de *Eucalyptus grandis*, ou pode apresentar várias perfurações, formando uma placa perfurada múltipla. Como essa estrutura não apresenta parede, não foi possível haver o ancoramento do adesivo na mesma e assim ocorrer a ligação entre esses dois elementos (figura 16-seta).

As fibras são células alongadas, imperfuradas, com pontuações areoladas nas suas paredes que são responsáveis pela resistência mecânica da madeira. Em seu interior encontra-se o lume, canal central circundado pela parede celular da fibra. Provavelmente foi por este canal que houve a penetração do adesivo na estrutura da fibra, formando assim a ligação entre o adesivo e a madeira.

Os raios são faixas horizontais de comprimento indeterminado, formado por células parenquimáticas, dispostas radialmente no tronco. Uma das funções dos raios é a de transporte e esta função é possível devido às células parenquimáticas que possuem parede celular com células de transferência que são modificadas para permitir o transporte, que em geral é de curta distância. A penetração do adesivo nas células de raio pode ter ocorrido através das células de transferência.

Além do preenchimento das células próximas à linha de cola principal, houve também o preenchimento das cavidades celulares adjacentes a ela, aumentando assim a profundidade da ligação melhorando assim a adesão entre o adesivo e madeira.

5.2 Relação entre espessura da linha de cola principal e a qualidade de colagem, para as posições radial e longitudinal.

Nas tabelas 11 e 12 estão inseridos os valores médios e o coeficiente de variação para a espessura da linha de cola, densidade básica da madeira, tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento e percentagem de falha na madeira para as juntas coladas com adesivo resorcinol-formaldeído para a posição radial e longitudinal, respectivamente.

TABELA 11 Variação da espessura da linha de cola (μm), densidade básica da madeira, tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento (Mpa) e percentagem de falha na madeira (%) do adesivo resorcinol-formaldeído para a posição radial.

Parâmetros	Posição		Medula		Intermediária		Casca	
	Média	CV (%)	Média	CV (%)	Média	CV (%)	Média	CV (%)
Espessura da linha de cola (μm)	164,00	10,61	129,00	15,38	109,00	17,60		
Densidade (g/cm^3)	0,55	15,37	0,55	6,94	0,64	4,22		
Tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento (Mpa)	3,81	16,64	4,72	10,99	5,73	10,42		
Porcentagem de falha na madeira (%)	97,15	28,71	93,04	12,35	76,96	34,19		

CV: Coeficiente de variação

TABELA 12 Variação da espessura da linha de cola (μm), densidade básica da madeira, tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento (Mpa) e percentagem de falha na madeira (%) do adesivo resorcinol-formaldeído para a posição longitudinal.

Parâmetros	Posição		Base		Meio		Ápice	
	Média	CV (%)	Média	CV (%)	Média	CV (%)	Média	CV (%)
Espessura da linha de cola (μm)	141,00	13,36	143,00	13,11	118,00	17,12		
Densidade (g/cm^3)	0,58	8,80	0,58	6,16	0,58	11,57		
Tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento (Mpa)	4,82	13,96	4,78	11,58	4,67	12,52		
Porcentagem de falha na madeira (%)	84,22	37,79	90,09	14,51	92,84	22,96		

CV: Coeficiente de variação

No sentido radial é possível perceber que a espessura da linha de cola principal variou, sendo maior na região próxima à medula e menor na região próxima à casca. Quanto à densidade básica da madeira e a tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento estas foram maiores na região próxima à casca e menor na região próxima à medula. E a percentagem de falha na madeira foi maior na região próxima à medula e menor na região próxima à casca.

No sentido longitudinal, tanto a espessura da linha de cola quanto à tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento sofreram decréscimo no sentido base-ápice. E a percentagem de falha na madeira sofreu acréscimo nesse sentido. Quanto à densidade básica da madeira esta teve o mesmo comportamento nas três posições do sentido longitudinal.

A região próxima à casca é uma região de alburno que possui células fisiologicamente ativas e conseqüentemente mais permeável. Este fato pode ter contribuído para a entrada do adesivo na região adjacente à linha de cola principal, fazendo com que esta apresentasse uma espessura menor. Porém com uma maior profundidade do adesivo na madeira, pode ter ocorrido uma forte ligação e contribuído para a maior resistência nesta região.

A região próxima à medula é uma região que possui baixa densidade, o que pode ocasionar um elo mais fraco e conseqüentemente baixa resistência ao cisalhamento.

No ápice da tora pode ter ocorrido obstrução de algumas células por tiloses, o que impede a entrada do adesivo na madeira fazendo com que o elo entre madeira e adesivo se torne mais fraco, ocasionado menor resistência na junta colada.

A base de uma árvore possui células com maiores comprimentos e constituídas com paredes mais espessas, tanto nas fibras como nos vasos. Devido a isso a densidade da madeira aumenta, assim como os diâmetros dos vasos. Estas características podem contribuir para a formação de uma linha de cola mais resistente. Por esta região ter uma resistência natural maior, a consequência é ter uma baixa percentagem de falha na madeira.

Segundo Tsoumis (1991) quanto maior a espessura da linha de cola menor será a resistência da junta colada. Tal fato ocorreu no sentido radial do tronco, quando se teve uma linha de cola com espessura menor a tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento foi maior. Porém no sentido longitudinal este

fato não ocorreu, sendo que na base observou-se uma linha de cola com espessura maior e a resistência ao cisalhamento nesta região também foi maior.

6 CONCLUSÕES

- Foi possível visualizar a linha de cola produzida pela ligação entre o adesivo resorcinol-formaldeído e a madeira de *Eucalyptus grandis* distinguindo o adesivo na estrutura anatômica da madeira.
- Houve penetração do adesivo nos vasos, nas fibras e nos raios, sendo que nas placas de perfuração não houve penetração do adesivo.
- O adesivo foi além da interface madeira – adesivo, preenchendo as cavidades celulares adjacentes a linha de cola principal.
- A espessura da linha de cola principal variou no sentido radial, sendo maior na região próxima à medula e menor na região próxima à casca e houve relação inversa com a tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento neste sentido. A maior porcentagem de falha na madeira foi na posição intermediária.
- A densidade básica da madeira e a tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento estas foram maiores na região próxima à casca e menores na região próxima à medula.
- No sentido radial a porcentagem de falha na madeira foi maior na região próxima à medula e menor na região próxima à casca.
- No sentido longitudinal, tanto a espessura da linha de cola quanto à tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento sofreram decréscimo no sentido base-topo. E a porcentagem de falha na madeira sofreu acréscimo nesse sentido.
- No sentido longitudinal não houve variação para a densidade básica da madeira.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of ASTM standards:** adhesives. Philadelphia, 1994. 600 p. D-3110 Standard specification for adhesives used in nonstructural glued lumber products.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of ASTM standards.** Philadelphia, 2000. 600 p. D2339-98 Standard test method for strength properties of adhesives in two-ply wood construction in shear by tension loading.

BRADY, D. A.; KAMKE, F. A. Effects of hot-pressing parameters on resin penetration. **Forest Products Journal**, Madison, v. 38, n. 11/12, p. 63-68, 1988.

CHANDLER, J. G.; BRANDON, R. L.; FRIHART, C. R. **Examination of adhesive penetration in modified wood using fluorescence microscopy.** Bethesda, Md.: Adhesive and Sealant Council, 2005. 10 p. ASC Spring Convention and Exposition.

MARRA, A. A. **Technology of wood bonding:** principles and practice. Nova York: Van Nostrand Reinhold, 1992. 454 p.

MELLOTO, M. A. **Estudo do tempo de adesão, da temperatura e da pressão de colagem na tensão limite de cisalhamento de uniões de madeira de *Eucalyptus grandis* coladas com adesivo sem solvente.** 2007. 124 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

PIZZI, A. **Advanced wood adhesives technology.** New York: M. Dekker, 1994. 289 p.

SCHULTZ, J.; NARDIN, M. Theories and mechanisms of adhesion. In: PIZZI, A.; MITTAL, K. L. (Ed.). **Handbook of adhesive technology.** New York: M. Dekker, 1994. p. 19-32.

SERNEK, M.; RESNIK, J.; KAMKE, F. A. Penetration of liquid urea-formaldehyde adhesive into beech wood. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 31, n. 1, p. 41-48, 1999.

SINGH, A. P.; DAWSON, B.; RICKARD, C.; BOND, J.; SINGH, A. Light, confocal and scanning electron microscopy of wood-adhesive interface. **Microscopy and Analysis**, Surrey, v. 22, n. 3, p. 5-8, 2008.

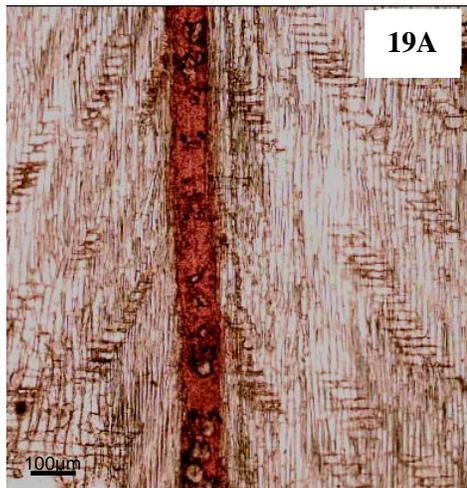
SZUCS, C. A.; TEREZO, R. F.; VALLE, Â.; MORAES, P. D. **Estruturas de madeira**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2006. 186 p. Apostila. Disponível em: <<http://www.ecv.ufsc.br/secdepto/graduacao/planoensino/AEstruturaMadeiras.pdf>>. Acesso em: 05 ago. 2009.

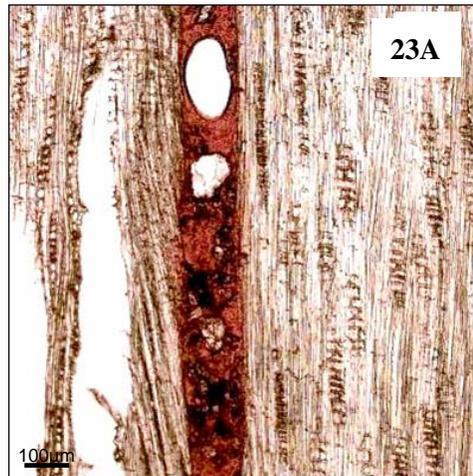
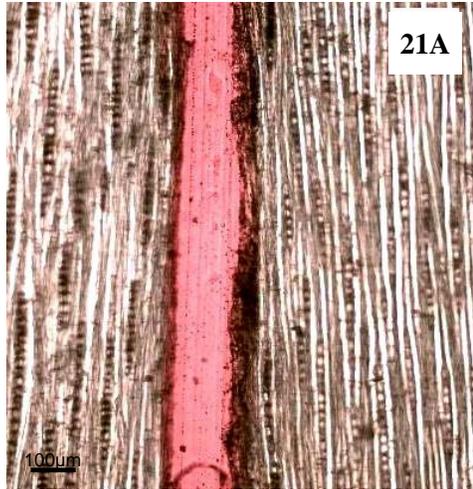
TSOUMIS, G. **Science and technology of wood**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991. chap. 21, p. 327-338. Adhesion and adhesives.

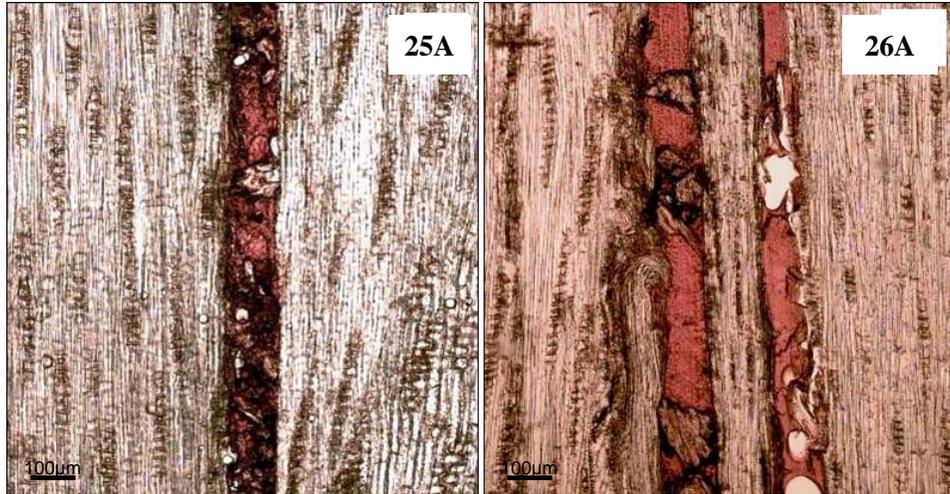
ANEXOS

ANEXO A

FIGURA 19A	Seção longitudinal da junta colada da posição da base próxima à casca.....	85
FIGURA 20A	Seção longitudinal da junta colada da posição da base entre casca e medula.....	85
FIGURA 21A	Seção longitudinal da junta colada da posição da base próxima à medula.....	86
FIGURA 22A	Seção longitudinal da junta colada da posição do meio próxima à casca.....	86
FIGURA 23A	Seção longitudinal da junta colada da posição do meio entre casca e medula.....	86
FIGURA 24A	Seção longitudinal da junta colada da posição do meio próxima à medula.....	86
FIGURA 25A	Seção longitudinal da junta colada da posição do topo próxima à casca.....	87
FIGURA 26A	Seção longitudinal da junta colada da posição do topo entre casca e medula.....	87
FIGURA 27A	Seção longitudinal da junta colada da posição do topo próxima à medula.....	87







ANEXO B

TABELA 13B Valores médios por posição da tora para as características da madeira de *Eucalyptus grandis*..... 88

Largura da Fibra (μm)									
	Base			Meio			Ápice		
	Casca	Intermediária	Medula	Casca	Intermediária	Medula	Casca	Intermediária	Medula
Média	17,28	16,06	16,37	16,46	15,62	16,69	17,36	16,61	15,84
CV	18,70	18,38	21,80	21,29	17,12	16,88	21,41	18,73	19,88
Espessura da parede da fibra (μm)									
	Base			Meio			Ápice		
	Casca	Intermediária	Medula	Casca	Intermediária	Medula	Casca	Intermediária	Medula
Média	5,68	4,42	4,78	4,85	4,22	4,28	5,15	4,65	4,35
CV	20,53	29,75	25,55	23,72	21,44	22,95	26,96	23,39	28,07
Espessura do lume (μm)									
	Base			Meio			Ápice		
	Casca	Intermediária	Medula	Casca	Intermediária	Medula	Casca	Intermediária	Medula
Média	5,92	7,22	6,81	6,76	7,17	8,13	7,06	7,31	7,14
CV	37,92	43,63	29,46	37,15	24,79	25,82	36,41	32,48	39,30
Comprimento de fibra (mm)									
	Base			Meio			Ápice		
	Casca	Intermediária	Medula	Casca	Intermediária	Medula	Casca	Intermediária	Medula
Média	1,23	1,17	1,19	1,23	1,09	1,14	1,28	1,19	1,16
CV	16,06	15,31	15,73	15,50	15,37	18,97	15,62	15,31	17,59
Frequência de vasos (vasos/mm²)									
	Base			Meio			Ápice		
	Casca	Intermediária	Medula	Casca	Intermediária	Medula	Casca	Intermediária	Medula
Média	1,52	1,56	2,11	1,55	1,70	2,22	1,42	1,62	1,92
CV	32,29	24,56	30,37	26,78	29,05	33,06	25,86	26,71	36,04
Diâmetro do vaso (μm)									
	Base			Meio			Ápice		
	Casca	Intermediária	Medula	Casca	Intermediária	Medula	Casca	Intermediária	Medula
Média	183,29	169,62	158,04	195,74	153,67	152,31	195,62	180,50	157,20
CV	17,12	19,08	28,21	46,15	17,17	17,66	14,84	16,14	20,02
Altura do raio (mm)									
	Base			Meio			Ápice		
	Casca	Intermediária	Medula	Casca	Intermediária	Medula	Casca	Intermediária	Medula
Média	0,21	0,21	0,21	0,21	0,20	0,22	0,19	0,22	0,21
CV	28,97	32,76	31,14	31,95	31,05	32,81	42,87	29,91	29,41

Largura do raio (μm)									
	Base			Meio			Ápice		
	Casca	Intermediária	Medula	Casca	Intermediária	Medula	Casca	Intermediária	Medula
Média	8,50	7,59	8,95	8,06	8,44	7,64	8,86	7,11	7,53
CV	37,87	30,40	33,24	30,73	36,87	25,64	28,66	29,13	26,39

Frequência de raio (raios/mm)									
	Base			Meio			Ápice		
	Casca	Intermediária	Medula	Casca	Intermediária	Medula	Casca	Intermediária	Medula
Média	1,86	1,59	1,82	1,79	1,97	2,01	1,63	1,93	1,84
CV	12,33	21,89	21,49	16,48	14,97	13,40	15,84	17,32	12,31

Teor de extrativos (%)									
	Base			Meio			Ápice		
	Casca	Intermediária	Medula	Casca	Intermediária	Medula	Casca	Intermediária	Medula
Média	8,52	8,17	6,00	10,89	2,55	4,64	7,10	9,15	7,68
CV	15,57	6,44	17,62	3,69	2,72	12,76	0,21	8,57	3,98

Densidade (g/cm^3)									
	Base			Meio			Ápice		
	Casca	Intermediária	Medula	Casca	Intermediária	Medula	Casca	Intermediária	Medula
Média	0,63	0,57	0,54	0,65	0,55	0,53	0,63	0,54	0,57
CV	7,98	8,13	10,29	3,30	3,71	11,45	1,39	8,96	24,37

Tensão de ruptura ao ensaio de cisalhamento (Mpa)									
	Base			Meio			Ápice		
	Casca	Intermediária	Medula	Casca	Intermediária	Medula	Casca	Intermediária	Medula
Média	5,83	4,64	3,93	5,93	4,47	4,13	5,49	5,05	3,42
CV	9,38	13,10	19,38	11,16	9,20	14,38	10,72	10,67	16,16

Percentagem de falha na madeira (%)									
	Base			Meio			Ápice		
	Casca	Intermediária	Medula	Casca	Intermediária	Medula	Casca	Intermediária	Medula
Média	68,76	89,31	94,58	75,06	97,17	98,06	87,07	92,64	98,81
CV	40,77	16,18	56,42	27,98	5,87	9,68	33,84	15,01	20,03