

**Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Resistência e elasticidade da madeira e de juntas coladas de *Eucalyptus grandis* W. Hill  
ex-Maiden e seus impactos na mecânica de vigas laminadas coladas**

**Luisa Julieth Parra Serrano**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em  
Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em:  
Tecnologia de Produtos Florestais

**Piracicaba  
2013**

Luisa Julieth Parra Serrano  
Engenheira Florestal

**Resistência e elasticidade da madeira e de juntas coladas de *Eucalyptus grandis* W. Hill  
ex-Maiden e seus impactos na mecânica de vigas laminadas coladas**

Orientador:  
Prof. Dr. **JOSÉ NIVALDO GARCIA**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em  
Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em:  
Tecnologia de Produtos Florestais

**Piracicaba  
2013**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP**

Parra Serrano, Luisa Julieth

Resistência e elasticidade da madeira e de juntas coladas de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex-Maiden e seus impactos na mecânica de vigas laminadas coladas / Luisa Julieth Parra Serrano. - Piracicaba, 2013.

100 p: il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.

1. Madeira laminada colada 2. Resistência adesiva 3. *Eucalyptus* 4. Adesivos  
5. Cisalhamento 6. Flexão I. Título

CDD 674.8  
P258e

**“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”**

*À memória de meus pais Maria Luisa Serrano e José Genaro Parra.  
A minha irmã Zuly.  
A minha Família.  
Dedico*



## AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente ao meu orientador Prof. Dr. José Nivaldo Garcia, pela importante transmissão de conhecimentos, dedicação, amizade, compreensão e paciência.

À Profa. Dra. Maristela Gava, pelo constante apoio, colaboração e a valiosa amizade.

A Alfredo Napoli pelas ideias, sugestões, colaboração e paciência.

Ao Prof. Dr. Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves, pelas sugestões, colaboração.

Ao Prof. Dr. Paulo Fernando Trujillo pela colaboração.

Ao Programa de Estudantes - Convênio de Pós-Graduação (PEC-PG) e à CAPES pela concessão do suporte financeiro.

À Jowat AG pelo fornecimento do adesivo Jowapur 686.60.

À Momentive Specialty Chemicals Inc. pelo fornecimento do adesivo Cascophen RS 216 M.

Ao técnico do Laboratório de Maquinas e Engenharia da Madeira LCF- ESALQ, Luis Eduardo Facco pela amizade, disposição e constante colaboração nas diferentes fases da realização dos ensaios.

À Maria Aparecida Rizzato, técnica do Laboratório de Anatomia LCF- ESALQ e a Juliano Rodrigo de Brito, técnico do Laboratório de Usinagem e Automação UNESP-Itapeva pela colaboração na preparação das amostras.

Aos amigos e colegas do Laboratório Aline, Bruno, Claudia, Marcia, Marisa, Mônica, Susi pelo apoio constante e momentos compartilhados.

Às instituições que apoiaram o desenvolvimento da pesquisa nas suas diferentes etapas: à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” ESALQ- USP; à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” UNESP – Campus Experimental de Itapeva; à Universidade Federal de Lavras UFLA



“O que sabemos é uma gota; o que ignoramos é um oceano”.  
Isaac Newton





## SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT.....	13
1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Objetivos.....	16
1.1.1 Objetivo geral .....	16
1.1.2 Objetivos específicos .....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA .....	19
2.1 Madeira Laminada Colada .....	19
2.2 Adesão na madeira.....	21
2.3 <i>Eucalyptus grandis</i> W. Hill ex Maiden.....	24
2.4 Adesivo.....	26
2.5 Mecanismos de adesão .....	27
2.6 Qualidade das superfícies .....	29
2.6.1 Quantificação da Rugosidade.....	32
2.6.2 Critérios para avaliação da Rugosidade.....	33
2.7 Pressão de Colagem.....	35
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	37
3.1 Matéria prima.....	37
3.2 Adesivos.....	37
3.2.1 Resorcinol-formaldeído.....	37
3.2.2 Poliuretano.....	38
3.3 Equipamentos .....	38
3.4 Caracterização da adesão .....	39
3.4.1 Avaliação do tamanho e forma dos corpos de prova para resistência ao cisalhamento.....	46
3.4.2 Degradação da linha de cola .....	48
3.4.3 Influência do tempo de espera entre o acabamento da superfície e a efetiva colagem.....	48
3.5 Ensaio de flexão .....	49
3.5.1 Correlação entre a resistência ao cisalhamento no plano de cola com a resistência à flexão.....	49

3.5.2 Determinação da influência do esforço cortante.....	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
4.1 Caracterização da adesão.....	55
4.1.1 Medição da Rugosidade.....	55
4.1.2 Eficiência adesiva .....	62
4.1.3 Avaliação qualitativa da linha de cola .....	69
4.1.4 Avaliação do tamanho e forma dos corpos de prova para resistência ao cisalhamento.....	75
4.1.5 Degradação da linha de cola.....	77
4.1.6 Influência do tempo de espera entre o acabamento da superfície e a efetiva colagem.....	78
4.2 Ensaio de Flexão.....	79
4.2.1 Correlação entre resistência da linha de cola no cisalhamento com a resistência à flexão.....	79
4.2.2 Módulo de elasticidade à flexão .....	81
4.2.3 Resistência à flexão ( $f_M$ ) .....	85
4.2.4 Índice de influência do esforço cortante (IFC) .....	86
5 CONCLUSÕES/CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	91
REFERÊNCIAS.....	95

## RESUMO

### **Resistência e elasticidade da madeira e de juntas coladas de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex-Maiden e seus impactos na mecânica de vigas laminadas coladas**

A presente pesquisa teve como objetivo geral a otimização dos parâmetros de colagem para a fabricação de madeira laminada colada de *Eucalyptus grandis*, enfatizado na interação madeira-adesivo. Foi avaliada a influência da rugosidade, pressão de colagem, tipo de adesivo e tempo de armazenamento da madeira após a preparação das superfícies a serem coladas. Essas variáveis que afetam a qualidade da adesão foram analisadas a partir da resistência apresentada pelas uniões submetidas ao esforço de cisalhamento. Para complementar a compreensão da mecânica das juntas coladas, efetuou-se a caracterização qualitativa da linha de cola mediante análises microscópicas e imagens de raios-X. Estudaram-se as correlações existentes entre os pares possíveis das variáveis massa específica, resistência ao cisalhamento, rugosidade, profundidade de penetração e porcentagem de falha na madeira. A resistência do plano de cola em situação crítica de cisalhamento foi avaliada também em ensaios de flexão de vigas laminadas coladas. A eficiência adesiva, que é a relação entre a resistência da madeira maciça e a resistência da madeira laminada colada, não variou significativamente entre adesivo, pressão de colagem e acabamento de superfície. A eficiência adesiva das juntas coladas de madeira de *Eucalyptus grandis* com adesivos Cascophen e Jowapur foi satisfatória por ter estado sempre no intervalo de 90,9 a 127,8%. Observaram-se correlações muito fracas entre a espessura da linha de cola e as variáveis massa específica, resistência ao cisalhamento, eficiência adesiva e porcentagem de falha na madeira. As vigas solidarizadas com o adesivo Jowapur apresentaram um baixo módulo de elasticidade quando comparado ao da madeira maciça, sem apresentar diferenças significativa na resistência à flexão. Os processos de fabricação adotados garantiram uma qualidade ótima às juntas coladas, inferida pela observação das falhas que ocorreram tanto nos ensaios de cisalhamento quanto nos ensaios de flexão, nos quais as rupturas se deram ao longo da madeira maciça sem afetar o plano de cola.

Palavras-chave: Madeira laminada colada; Resistência adesiva; *Eucalyptus*; adesivos; cisalhamento; flexão



## ABSTRACT

### **Strength and elasticity of wood and glued joints of *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden and their impacts on the mechanic of glued laminated beams**

The objective of the present study was to optimize the parameters of glue to manufacture laminated wood of *E. grandis*, emphasized the interaction wood-adhesive. The influence of the roughness, bonding pressure, adhesive type and time of storage of the timber after preparing the surfaces to be bonded were evaluated. These variables that affect the quality of adherence were analyzed from the resistance presented by the joints subjected to shear stress. To complement the understanding of the mechanics of bonded joints, we performed a qualitative characterization of the glue line by microscopy and X-ray imaging. Were studied correlations between possible pairs of variables: density, shear strength, roughness, depth of penetration, percentage of wood failure. The resistance of the bonding surface in critical shear was also measured using bending tests of glued laminated beams. The adhesive efficiency, which is the ratio between the resistance of the wood and the glued laminated wood resistance, did not vary significantly between adhesive, pressure bonding and surface finish. The adhesive efficiency of the bonded joints of *Eucalyptus grandis* with Cascophen and Jowapur was satisfactory falling always in the range from 90.9 to 127.8%. Very weak correlations were observed between the variables glue line thickness, density, shear strength, adhesive efficiency and percentage of wood failure. The beams glued with the adhesive Jowapur showed a low modulus of elasticity compared to solid wood, without showing significant differences in flexural strength. The manufacturing processes adopted ensured the optimal quality of bonded joints. This was inferred by observing the failures that occurred in both shear tests as in bending tests. Ruptures occurred within the wood without affecting the bonding surface.

Keywords: Glulam; Bond strength; *Eucalyptus*; adhesives; shear; bending



## 1 INTRODUÇÃO

A madeira maciça apresenta um bom comportamento estrutural porém, existem fatores que limitam seu uso, tais como a presença de defeitos anatômicos e a escassez de peças com grandes dimensões. Todas essas limitantes são supridas com a fabricação da Madeira Laminada Colada (MLC), a qual facilita novos usos da madeira exaltando sua beleza, elevando as propriedades físico-mecânicas, permitindo a produção de madeira estrutural em ampla variedade de tamanhos e formas.

No Brasil tem-se efetuado uma série de estudos com o objetivo de ampliar os conhecimentos e melhorar a qualidade da MLC produzida com espécies exóticas dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*. Tais espécies apresentam uma expectativa de mercado bastante ampla, devido ao alto custo e à baixa disponibilidade da madeira maciça de grandes dimensões requeridas para fins estruturais. A espécie *Eucalyptus grandis* dadas suas características silviculturais e propriedades físico-mecânicas, constitui uma excelente opção para a fabricação de produtos com alto valor agregado. Sua utilização plena implica na necessidade do desenvolvimento de pesquisas que permitam estabelecer características ideais no processo de fabricação elevando dessa forma as potencialidades técnicas da MLC produzida para fins estruturais.

Na MLC o adesivo cumpre o papel principal, transferindo tensões de um substrato a outro. A união adesiva deve ter suficiente resistência e durabilidade para manter os substratos juntos sob um grupo de condições. O processo de adesão na madeira é considerado de grande complexidade devido às suas características químicas e morfológicas. Para a compreensão da adesão na madeira é necessário entender os princípios de interligação mecânica em superfícies rugosas, assim como as interações químicas.

Com o interesse pelo conhecimento das condições ótimas no processo de colagem para a obtenção de uniões eficientes, efetuou-se a caracterização da adesão na madeira de *Eucalyptus grandis*; enfatizando a relação adesivo-madeira apresentada nas uniões obtidas com a aplicação dos adesivos à base resorcinol formaldeído e poliuretano, conhecidos comercialmente como Cascophen e Jowapur. Avaliou-se a influência das variáveis, massa específica, acabamento da superfície, tipo de adesivo, pressão de colagem, tempo de espera e área de cisalhamento na eficiência da adesão, analisada a partir da resistência adesiva apresentada pelas uniões submetidas a esforços de cisalhamento. Uma caracterização



qualitativa das uniões obtidas foi feita mediante análises microscópicas para complementar a compreensão da mecânica das ligações coladas.

Verificaram-se as correlações existentes entre pares possíveis das variáveis, resistência ao cisalhamento, rugosidade, profundidade de penetração, porcentagem de falha na madeira e tipo de falha na união. Efetuaram-se ensaios de flexão em vigas laminadas coladas, compostas por duas laminas, avaliando a resistência da linha de cola em situação crítica de cisalhamento.

Assim trabalhando sob a hipótese de que *a resistência ao cisalhamento da união adesiva deve ser refletida na resistência da viga laminada colada à flexão*, espera-se contribuir para o avanço da produção de conjuntos laminados de maior resistência possível e, por fim, com o desenvolvimento da indústria da MLC.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Otimização dos parâmetros de colagem para a fabricação de Madeira Laminada Colada de *Eucalyptus grandis* visando compreender-se o fenômeno da adesão enfatizado na interação madeira-adesivo.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Determinar a influência dos fatores: acabamento da superfície, tipo de adesivo e pressão de colagem na resistência das uniões coladas;
- Estudar a influência da velocidade de avanço na qualidade das superfícies usinadas mediante fresamento periférico discordante, a partir da medição de rugosidade;
- Determinar a eficiência das uniões coladas em relação à resistência ao cisalhamento e flexão da madeira maciça;
- Efetuar uma avaliação qualitativa da adesão da madeira de *Eucalyptus grandis*, através da caracterização da linha de cola;
- Estabelecer a correlação entre os parâmetros resistência adesiva, rugosidade e profundidade de penetração; assim como a interação com a porcentagem e modo de falha;
- Estabelecer o tamanho do corpo de prova mais indicado para a determinação da resistência ao cisalhamento, a partir de ensaios comparativos de corpos de prova das dimensões estabelecidas pelas Normas ASTM-D-905-08 e NBR 7190/97;

- Determinar a influência do tempo entre o processo de usinagem da superfície e a colagem na resistência adesiva;
- Avaliar a correlação existente entre a resistência ao cisalhamento e a resistência exibida pelo conjunto laminado na flexão.



## **2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA**

### **2.1 Madeira Laminada Colada**

A MLC é o mais antigo dos produtos engenheirados, a qual permite um melhor aproveitamento das árvores, já que é empregada uma menor ou a mesma quantidade de madeira, para a geração de produtos com melhor funcionamento.

Segundo a Norma Brasileira para o Projeto de Estruturas de Madeira NBR7190/97 entende-se como MLC para fins estruturais, peças de madeira reconstituída em processo industrializado de fabricação, composta por tábuas de dimensões relativamente reduzidas se comparadas às dimensões da peça final, coladas umas às outras e dispostas com as fibras paralelas ao eixo longitudinal do conjunto laminado. Para a produção das lâminas, as tábuas são unidas longitudinalmente por ligação das extremidades, até atingir o comprimento necessário. As lâminas são sobrepostas até alcançar a seção transversal determinada.

A fabricação da MLC consiste na produção de elementos de grandes dimensões com resistência incrementada, compostos por tábuas de espessura e comprimento reduzido, coladas de forma que o trabalho de cada uma delas não possa ser individualizado (FREAS & SELBO, 1954; DEMKOFF, 2003; APA, 2008). A união longitudinal das laminas efetua-se mediante emendas, as quais são consideradas como regiões potencialmente fracas (STRICKLER, 1980). A emenda dentada foi desenhada com o objetivo de alcançar uma capacidade estrutural ótima sem remover um volume de madeira significativo (JOKERST, 1981). Porém existem vários fatores que influenciam na resistência da união, dentre os quais se encontram as características físicas, anatômicas e químicas da madeira, os processos de usinagem, o processo de colagem e a geometria do dente, sendo a última considerada a de maior influência na resistência da emenda dentada (HERNANDEZ, 1998; BUSTOS, 2003).

A MLC como é conhecida atualmente, foi usada pela primeira vez na Suíça, em 1893, para a construção de um auditório em Basel, tendo sido patenteada com o nome de “Sistema Hetzer” (MOODY e HERNANDEZ, 1997). O Alemão Friedrich Otto Hetzer recebeu a primeira patente Suíça para este método de construção o qual se referia a várias lâminas de madeira unidas entre si com o adesivo caseína. O uso desse adesivo não resistente à água limitou seu uso a ambientes internos ou lugares secos. Em 1906 Hetzer patenteou na Alemanha a construção de peças curvas com madeira laminada, iniciando o desenvolvimento dos arcos em madeira. A Suíça foi o primeiro país onde o sistema Hetzer teve amplo sucesso,

existindo em 1920, mais de 200 prédios construído com vigas ou arcos tipo Hetzer. Nos Estados Unidos a tecnologia da MLC foi implementada a partir da construção do Laboratório de Produtos Florestais em 1934, projetado e construído pelo alemão Max Hanisch o qual incluiu vigas e arcos laminados (RHUDE, 1996).

Segundo Moody, Hernandez e Liu (1999) a MLC ao ser comparada com a madeira serrada e outros materiais estruturais apresenta diversas vantagens, entre elas:

- A MLC pode ser composta por várias lâminas de madeira, com dimensões variadas. Grandes estruturas podem ser dimensionadas, utilizando peças com dimensões comerciais para a confecção de MLC, com a possibilidade de produzir grandes vãos.

- Liberdade arquitetônica, a possibilidade de criar arcos e peças curvas é um dos grandes diferenciais da MLC. Com isso, a gama de efeitos estruturais que podem ser compostos, garante uma diversidade arquitetônica aos projetistas, arquitetos e engenheiros. A taxa de curvatura é controlada pela espessura das lâminas de madeira. Os elementos estruturais podem ser projetados com sua seção transversal variando ao longo do comprimento em função da resistência solicitada.

- Diminuição da presença de defeitos oriundos da secagem da madeira, como rachaduras e empenamentos, comuns em peças de madeira de grandes dimensões.

- Possibilidade da utilização de madeira menos resistente nas regiões onde ocorrem menores solicitações e de maior resistência nas bordas das vigas, podendo assim, aumentar o número e combinações da montagem da MLC e homogeneizar o comportamento das peças.

- Boa resistência quanto à ação do fogo, em função de sua seção transversal robusta e alta resistência ao contato com agentes corrosivos.

- A MLC pode ser considerada como um produto ambientalmente amigável. Várias análises mostram que a renovabilidade da madeira, a sua exigência relativamente baixa de energia durante o processamento, a capacidade de armazenamento de carbono, e a sua oferta potencial de reciclagem ambiental a longo prazo constituem vantagens sobre outros materiais. Embora a estética e as considerações econômicas em geral são os principais fatores que influenciam a seleção de materiais, essas vantagens ambientais podem influenciar cada vez mais na seleção do material. A utilização de peças de madeira de qualidade inferior, de diferentes dimensões e espécies variadas, diminui a pressão de seleção que ocorre com poucas espécies comerciais, gerando alternativas para o uso da madeira serrada.

A resistência da MLC está estreitamente relacionada com à qualidade da adesão entre as laminas. Para garantir esta qualidade é necessária uma série de equipamentos e mão de obra especializada.

A qualidade das uniões pode ser avaliada em termos de proporção relativa de destruição do adesivo e da madeira próxima à linha de cola, ou em termos da pressão necessária para causar a falha sob algum tipo de carga mecânica. O ensaio de cisalhamento tem sido usado para determinar a qualidade da união na madeira laminada avaliando visualmente a proporção de madeira e cola exposta na face fraturada.

## **2.2 Adesão na madeira**

Em uma escala maior a madeira é um composto biológico de grande complexidade e diversidade física e química, poroso, permeável, higroscópico e anisotrópico. Características que variam entre espécies, entre árvores e dentro de árvores. E é devido a essas características que a penetração dos adesivos apresenta qualidades específicas. Os tipos e tamanhos das células são amplamente diferentes entre madeiras densas e madeiras leves. As células de madeira com paredes finas são mais fáceis de enlaçar devido ao lúme mais acessível. A madeira jovem em compressão e tensão distorce a estrutura celular dos enlaces debilitando a região da interface adesiva da madeira. Assim a qualidade da superfície é considerada uma das propriedades mais importantes que influenciam nos processos de finalização e na resistência da junta adesiva.

Pré-tratamentos inadequados da superfície dos substratos com efeitos como rugosidade e contaminação química dentre outros, podem impedir o funcionamento correto das uniões adesivas, gerando falhas interfaciais, as quais ocorrem por cargas muito menores do que as suportadas por uniões devidamente ligadas (BALDAN, 2004).

Compreender as interações celulares da madeira-adesivo é difícil devido à enorme variabilidade de tipos de células da madeira. Embora vários autores já tenham abordado a questão da penetração do adesivo na madeira, o efeito do tipo de adesivo e das espécies de madeira sobre esse fator, ainda não é bem compreendido, já que componentes como traqueídes, parênquima, fibras, vasos, canais de resina, e células de raios (as quais variam em composição e estrutura, no alburno, lenho tardio, lenho inicial, e cerne dominante) apresentam uma enorme variedade de superfícies de ligação de modo que, cada um deles pode interagir de forma diferente com os adesivos (FRIHART, 2005).

Burdurlu et al (2007) consideram que o funcionamento dos produtos à base de madeira nos quais o adesivo é usado, varia de acordo com os seguintes fatores:

- 1) Composição do adesivo (viscosidade, resistência, durabilidade, solventes, diluentes, recheios, extensores e componentes sólidos); características estruturais da madeira (espécies, densidade, cerne, permeabilidade, pH, extrativos, anisotropia, etc.);

2) Características da superfície (mecanismos de corte, lisura, plano de corte, ângulo da grã, teor de umidade, distribuição do teor de umidade, pó, deformação, temperatura);

3) Condições de aplicação do adesivo (armazenamento, método de aplicação, tempo de montagem, pressão e temperatura de prensagem);

4) Características geométricas (espessura, largura, e comprimento dos elementos, paralelos ou opostos à grã, número de lâminas, alinhamento o aleatoriedade);

5) Condições ambientais do lugar do uso do produto (externos ou internos, controláveis o incontrolláveis, efeitos ambientais, tais como o calor, umidade, organismos, radiação).

A Tabela 1 apresenta as variáveis que influenciam na adesão da madeira de acordo com River, Vick e Gillespie (1991).

Tabela 1 – Variáveis que influenciam na adesão das uniões da madeira

Adesivo	Madeira	Processos	Uso
Tipo	Espécie	Método de aplicação e	Resistência
Viscosidade	Densidade	distribuição do adesivo	Módulo de cisalhamento
Aderência	Teor de umidade	Umidade relativa	Módulo de elasticidade
Proporção de reagentes	Plano de corte: radial,	Temperatura	Deformação
Extensores	tangencial, transversal,	Tempo aberto	Porcentagem de falha na
Sólidos totais	misto	Tempo fechado	madeira
Distribuição da massa molecular	Madeira dura vs branda	Pressão	Tipo de falha
Sistema de solventes	Madeira juvenil vs madura	Tempo de prensagem	Penetração do adesivo
Idade	Inclinação da grã	Pré-tratamentos	Seco vs úmido
pH	Porosidade	Pós-tratamentos	Temperatura
Tampão	Rugosidade da superfície	Temperatura do aderente	Acabamento
Taxa de cura	Danos na secagem		Resistência ao calor
Catalisadores	Danos no maquinado		Resistência à hidrólises
Mistura	Contaminantes químicos na superfície		Resistência à inchamento- contração
	Poeira		Resistência à ação ultravioleta
	Extrativos		Resistência ao ataque de agentes biológicos
	pH		
	Poder tampão		

O estudo dos processos de colagem e descolagem podem ser divididos em avaliações nas escalas espaciais milimétricas, micrométricas e nanométricas; para a compreensão da interação madeira-adesivo. A escala milimétrica é usada para avaliações típicas e a escala micrométrica desempenha um importante papel, pois refere-se ao tamanho transversal de células que são as unidades básicas estruturais da madeira. A escala do nanômetro é importante porque mostra a interação do adesivo com a madeira na escala de fibrilas de celulose e os domínios hemicelulose e lignina (FRIHART, 2004).

O fenômeno de adesão é relevante em áreas científicas e tecnológicas, tendo se tornado nos anos recentes, um importantíssimo campo de estudo. A técnica de união com adesivos substituiu, pelo menos parcialmente, as tradicionais técnicas de união, sendo considerada

como a principal concorrente já que permite poupar peso e garante uma melhor distribuição de forças, oferecendo uma estética melhor com uma linha de cola simples praticamente invisível (PIZZI e MITTAL, 2003).

Segundo Frihart (2004) os termos adesão e resistência adesiva são frequentemente confundidos. A **adesão** é a interação do adesivo com a superfície do substrato, influenciada principalmente pela umectação termodinâmica e pelas propriedades reológicas sendo fundamental para a formação do enlace. A **resistência adesiva** é a capacidade do conjunto ligado de permanecer intacto numa série de condições que testam a viscoelasticidade, assim como a capacidade de dissipar energia e resistir à degradação química.

A adesão mantém dois objetos juntos pelo contato não magnético entre as superfícies. A maioria das teorias da adesão podem ser expressas em termos de atração elétrica. Determinados locais das superfícies possuem ou adquirem cargas elétricas negativas ou positivas, as quais se alinham se estiverem adjacentes aos locais com cargas opostas na outra superfície, esta atração elétrica resulta na adesão das superfícies (SCHNEBERGER, 1983).

Segundo Iwakiri (2005) a adesão é um fenômeno físico-químico que provê um mecanismo de interação entre superfícies sólidas e uma segunda fase, que consiste em partículas individuais, pequenas gotas ou uma película contínua, líquida ou sólida.

Alta resistência da união e a durabilidade dependem do desenvolvimento da excelente interação madeira-adesivo e boa dissipação de forças internas e externas em condições de uso final (FRIHART, 2005).

O processo de colagem de madeiras se inicia com o “derramamento” do adesivo sobre a superfície do substrato, continua com a fase de “movimentação” do adesivo e finaliza com a “solidificação”, formando “ganchos” ou pontos de “ancoragem” entre as duas peças coladas. As interações que ocorrem na região entre duas peças de madeira e o ambiente ali criado, no qual, o adesivo realiza seu trabalho, abrangem vários princípios e podem ser caracterizados por nove elos numa cadeia (Figura 1), na qual, cada elo é responsável por uma ação particular do adesivo (MARRA, 1992 apud IWAKIRI, 2005). O grau de adesão depende da intensidade adesiva em cada elo da ligação, ou seja, dos aderentes, do adesivo e das interfaces (IWAKIRI, 2005).



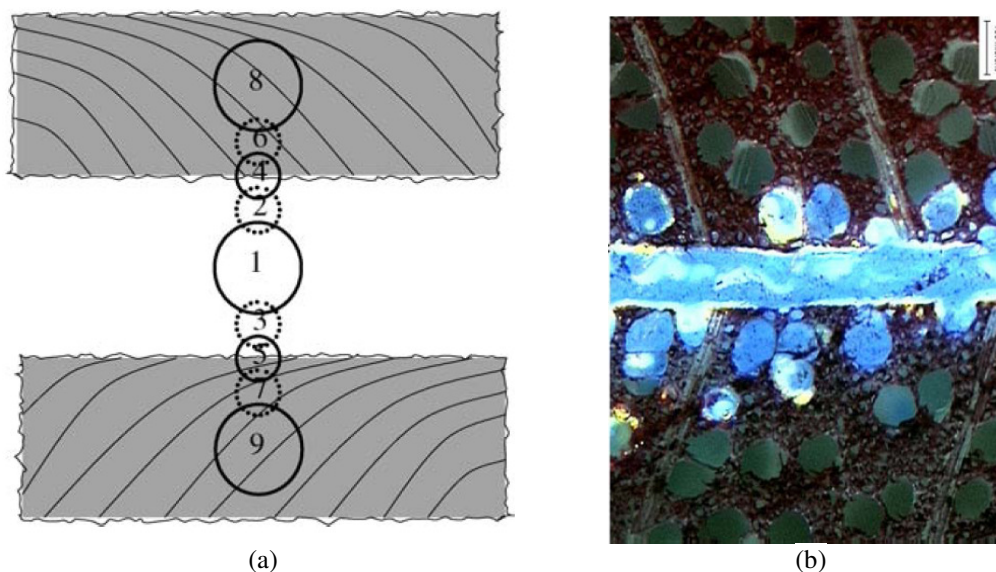


Figura 1 – Zonas de encaixe da união de acordo com o Modelo Marra Elo 1 – Adesivo, Elos 2 e 3 – Interface adesiva, Elos 4 e 5 - Interface adesivo-madeira, Elos 6 e 7 – Interface madeira e Elos 8 e 9 – Madeira (a) (Fonte: FRIHART, 2009), linha de cola de adesivo epóxi imagem obtida em microscópio fluorescente (b) (Fonte: FRIHART, 2006)

### 2.3 *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden

O gênero *Eucalyptus* pertence à família Myrtaceae, compreendendo 70 gêneros e 3000 espécies de arbustos e árvores. O gênero é representado por árvores com alta taxa de crescimento, plasticidade, fuste de forma retilínea, desrama natural e madeira com variações nas propriedades tecnológicas, adaptadas às mais variadas condições de uso (OLIVEIRA, 1999).

Segundo Angyalossy-Alfonso (1987) a madeira apresenta cerne e alburno distintos pela cor, cerne castanho-rosado-claro, alburno bege-rosado, com pouco brilho; cheiro e gosto imperceptíveis, densidade baixa a média; macia ao corte; grã direita; textura fina a média. Parênquima axial indistinto mesmo sob lente, paratraqueal vasicêntrico escasso. Raios visíveis apenas sob lente, homogêneos unisseriados; com conteúdo de substâncias taníferas. Vasos visíveis a olho nu; seção ovalada a circular; distribuição difusa; arranjo diagonal; de tamanho médio ( $128\mu\text{m}$ ); numerosos ( $15 \text{ poros}/\text{mm}^2$ ); obstruídos por tilas. Elementos vasculares predominantemente longos ( $670\mu\text{m}$ ); com placa de perfuração simples; pontoações intervasculares alternas, circulares e ovaladas, de abertura horizontal a oblíqua, lenticular e guarnecida; pontoações raio-vasculares pequenas ( $6\mu\text{m}$ ), arredondadas, simples. Fibrotraqueídeos com variação de  $670$  a  $1460 \mu\text{m}$ ; estreitos e médios com de  $14$  a  $25 \mu\text{m}$ ; lume de  $6$  a  $15 \mu\text{m}$  de largura; paredes com variação de  $2$  a  $7 \mu\text{m}$  de espessura. Traqueídeos vasicêntrico presentes.

Os valores de retratibilidade para a espécie segundo Oliveira e Hellmeister (1998) são: radial 5%; tangencial 10,1%; axial 0,4% e volumétrica 2,1% e o fator anisotrópico corresponde a 2,1 o que evidencia uma baixa estabilidade dimensional, em madeira com uma densidade aparente de  $550 \text{ kg/m}^3$ . A Tabela 2 apresenta os valores das propriedades físicas e mecânicas segundo a NBR 7190/97.

Tabela 2 - Valores médios de propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus grandis*

Nome científico	$\rho_{\text{ap}(12\%)}$ kg/m <sup>3</sup>	$f_{c0}$ MPa	$f_{t0}$ MPa	$f_{t90}$ MPa	$f_v$ MPa	$E_{c0}$ MPa
<i>Eucalyptus grandis</i>	640	40,3	70,2	2,6	7,0	12813

Fonte: NBR 7190/97

$\rho_{\text{ap}(12\%)}$ : massa específica aparente a 12% de umidade;

$f_{c0}$ : resistência à compressão paralela às fibras;

$f_{t0}$ : resistência à tração paralela às fibras;

$f_{t90}$ : resistência à tração normal às fibras;

$f_v$ : resistência ao cisalhamento;

$E_{c0}$ : Módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela.

A madeira de *E. grandis* é destinada principalmente para indústrias de celulose e energéticas e, em menor quantidade, para painéis e postes, sendo baixa a proporção encaminhada para transformação mecânica. Pode-se dizer que é uma madeira pouco conhecida no mercado mundial, no que se refere à madeira serrada. São poucos os países produtores e dentre eles podem ser citados o Brasil, África do sul, Austrália, Zimbábue, Uruguai e Argentina (INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA - INTA, 2003).

De acordo com Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF, 2010) a área de florestas com eucalipto encontra-se em expansão na maioria dos estados brasileiros com tradição na silvicultura de Pinus e Eucalipto. Entre os anos 2004-2009, verificou-se uma expansão de mais de 1 milhão de hectares na área plantada, com um crescimento acumulado de 41,1% no período. A expansão na área plantada de eucalipto é resultado de um conjunto de fatores que vem favorecendo o plantio em larga escala desse gênero. Entre os fatores mais relevantes estão o rápido crescimento em ciclo de curta rotação, a alta produtividade florestal e os investimentos por parte de empresas que utilizam sua madeira como matéria prima em processos industriais.

A espécie vem sendo cultivada intensivamente no Brasil com o objetivo principal de atender as demandas do setor de celulose e papel, chapas duras, painéis aglomerados e o setor de carvão vegetal para uso siderúrgico e metalúrgico. Atualmente é considerada como uma

das espécies mais promissoras para o setor florestal, devido à sua maior área plantada em relação a outras espécies comerciais, com disponibilidade imediata de florestas em idade de corte (SILVA, 2005).

As empresas florestais têm buscado alternativas para agregar maior valor à madeira que continua sendo a matéria prima principal de um grande número de produtos. Por isso é necessária a adequação de espécies de rápido crescimento para suprir a demanda que recai sobre as florestas nativas. O *E. grandis* apresenta-se como uma excelente opção de matéria prima para uso em produtos de maior valor agregado, via madeira serrada, móveis, decoração de interiores, pisos, lambris, decks, formas, cimbramento, embalagens, reforços, palets, lâminas para vigas compostas e estruturas.

## 2.4 Adesivo

O adesivo é definido como uma substância capaz de unir materiais através do contato entre suas superfícies. As condições físicas e químicas das superfícies durante a adesão são extremamente importantes para a obtenção de uma ligação com um desempenho satisfatório uma vez que o adesivo líquido tem que umedecer e espalhar-se livremente nas superfícies para que se estabeleça um contato íntimo entre elas (ASTM D 907-06).

Para Pizzi (1994) uma das funções dos adesivos é fluir e preencher espaços vazios entre as juntas a serem coladas, diminuindo, dessa forma, a distância entre elas, gerando interações entre o próprio adesivo e o substrato.

Comyn (1997) define adesivo como o material que quando aplicado na superfície dos materiais pode mantê-los juntos e resistentes à separação. Basicamente o adesivo tem que umedecer as superfícies, espalhar-se e estabelecer um ângulo de contato próximo de zero. É requerido um contato íntimo entre as moléculas do adesivo e as moléculas da superfície. Quando o adesivo é aplicado em estado líquido, com uma viscosidade relativamente baixa, endurece e gera uma sólida e forte coesão, que é gerada pela perda de água ou solvente, devido às reações químicas ou pelo resfriamento no caso de adesivos do tipo hot melt.

O adesivo é simplesmente o material aplicado como líquido que permite o estabelecimento de uma carga de atração contrária a qual se solidifica fornecendo uma união com significativa resistência interna (SCHNEBERGER, 1983).

Para que os adesivos formem uniões fortes, devem umedecer o substrato o suficiente para aumentar a profundidade de penetração para que atuem, tanto as forças químicas quanto as mecânicas na união (QUEVEDO, 2008). O adesivo age como aglomerante, cuja função é

realizar uma ligação mecânica o mais próxima possível da ligação naturalmente existente. Quimicamente os grupos oxidrilas livres das cadeias de celulose da madeira se unem por pontes de hidrogênio com os grupos oxidrilas livres do adesivo. O mesmo princípio acontece na união entre cadeias de celulose da madeira, onde as oxidrilas livres de cadeias de celulose adjacentes se unem diretamente umas às outras por pontes de hidrogênio (RIVER, et al. 1991).

As qualidades que determinam um bom desempenho da união são a distribuição uniforme dos esforços em toda a área de contato e a redução da concentração de esforços sobre os extremos da linha do adesivo (HOUWINK e SALOMON, 1973).

Os adesivos apresentam propriedades que promovem o processo de polimerização. De acordo com Pizzi (1994) as propriedades que caracterizam o processo de colagem, é o desempenho de ações de:

- Fluidez, que influencia no tempo de expansão na superfície. O fluxo não depende somente do ângulo de contato, mas também da viscosidade do adesivo. Assim, com uma viscosidade menor o adesivo flui melhor e molha mais a superfície;
- Transferência, capacidade de se transferir de uma superfície para outra;
- Penetração, o adesivo se movimenta nos vazios da superfície do substrato. Para lograr um enlace forte o adesivo deve penetrar em todas as porosidades do substrato em uma microescala;
- Umedecimento, recobrimento da estrutura submicroscópica do substrato, adquirindo maior contato e proximidade em nível molecular;
- Endurecimento ou cura do adesivo.

## **2.5 Mecanismos de adesão**

Um adesivo pode aderir-se a um substrato pelas forças intermoleculares e interanatómicas dos dois materiais. Essa é a teoria mais aceita e aplicável das teorias da adesão (PIZZI e MITTAL, 2003).

A adesão faz com que ocorra a adsorção sobre uma superfície ou dentro da camada superficial. É atribuída à atuação de forças moleculares eletrostáticas, forças de Van der Waals e ligações químicas covalentes também conhecidas como adsorção química ou ativada (IWAKIRI, 2005). Segundo Baldan (2004) essa teoria envolve atrações entre dipolos permanentes e induzidos e podem ser de três tipos.

1) Interação dipolo-dipolo, na qual a eletronegatividade dos átomos que constituem uma molécula pode fazer com que essa apresente cargas virtuais (dipolos) em função da distribuição não uniforme dos elétrons. Um caso particular desse tipo de interação é o que mantém o hidrogênio ligado a elementos eletronegativos como F, O, N, e Cl. A energia dessas ligações pode variar de 2 a 10 kcal/mol, energia essa bem maior do que as obtidas por interações de Van der Waals. O tamanho do hidrogênio é o fator que diferencia as interações por pontes de hidrogênio das interações dipolo-dipolo normais.

2) A interação dipolo-dipolo induzido é dada pela polarização de moléculas com distribuição uniforme da nuvem eletrônica.

3) A força de dispersão refere-se a uma força comum encontrada praticamente em todos os materiais. Surge da formação de dipolos instantâneos, provocando a formação de dipolos induzidos instantâneos, quando átomos e moléculas com distribuição uniforme se aproximam.

O modelo de interligação mecânica foi proposto por MacBain e Hopkins em 1925 que concebeu o mecanismo de ancoragem mecânico e interligação do adesivo dentro das cavidades, poros e rugosidades da superfície do sólido, sendo o maior efeito determinante da resistência adesiva (PIZZI e MITTAL 2003). O mecanismo de ancoragem tem um desempenho importante na colagem de madeiras, tecidos e papéis, pois estes possuem poros naturais (VIEIRA, 2005).

De acordo teoria da difusão de polímeros a adesão ocorre através da difusão de segmentos de cadeias de polímeros em nível molecular (IWAKIRI, 2005). A adesão intrínseca da resina ao substrato polimérico é ocasionada pela difusão mútua das moléculas de polímeros através da interface removendo-a eventualmente. As macromoléculas da união de adesivo e substrato; ou os segmentos das cadeias destes, devem possuir suficiente mobilidade e compatibilidade (COMYN, 1997). Esses requerimentos podem ser expressos pela condição de que os polímeros do adesivo e do substrato possuam parâmetros de solubilidade similares, sendo esta uma classificação de compatibilidade dos dois materiais (MARRA, 1992 apud VIEIRA, 2005).

A teoria da adesão química envolve a formação de enlaces covalentes, iônicos de hidrogênio através da interface. Isto evidencia que os enlaces covalentes são formados com agentes silanos ( $\text{SiH}_4$ ) de acoplamento. É possível que com adesivos que contêm grupos isocianato reajam com átomos de hidrogeno ativo como com grupos de oxidril presentes na estrutura química da celulose da madeira (COMYN, 1997). A adesão ocorre através de ligações primárias, iônicas ou covalentes e/ou por forças intermoleculares secundárias (IWAKIRI, 2005).

## 2.6 Qualidade das superfícies

A superfície de um sólido é a interface entre a massa e a atmosfera que o rodeia. Corresponde ao limite produzido pelas ferramentas mecânicas ou reações químicas, as quais podem ser observadas mediante o tato, a simples vista, ópticamente por meio de microscópio, ou por às análises com instrumentos.

Na madeira a rugosidade da superfície tem a qualidade direcional dada pela estrutura anatômica e pela preparação mecânica. Dependendo da direção da preparação relativa (avanço da ferramenta), direção da grã e dimensões, as superfícies apresentam diferentes rugosidades (HOUWINK, R. e SALOMON, 1973). Os diferentes elementos anatômicos são cortados pela ferramenta durante o maquinado e é criada uma superfície muito mais complexa. A anisotropia, a densidade, o teor de umidade, junto com a cinemática do processo de corte e condições de maquinado aumentam a complexidade da superfície da madeira (SANDAK e NEGRI, 2005).

De acordo com Marian, Stumbo e Maxey (1958) citados por River (1991) existem três níveis de rugosidade. O primeiro é baseado na porosidade ou no tamanho e distribuição dos vários tipos de células características de uma determinada espécie. O segundo é devido às marcas de usinagem em função das características de um determinado processo, tais como corte de facas ou de serras. O terceiro refere-se às marcas de usinagem acidentais ou variações causadas pela vibração do elemento cortante da máquina ou vibração da própria madeira, cortadores posicionados além da altura normal de corte e variações na velocidade de alimentação ou orientação da fibra em relação ao sentido de corte da faca. Adicionalmente devem ser considerados três níveis de textura independentes do maquinado, a estrutura da parede celular, diâmetro de células e espessura da parede e os anéis de crescimento.

Segundo a Norma DIN 4760/1982 no perfil real podem ser encontrados seis tipos diferentes de desvios de forma, gerados em função de causas específicas dentro do processo de confecção da superfície (SILVA, 2002), classificados por ordens conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Ondulações e rugosidades na superfície da madeira, classificação dos desvios de forma em função da ordem e suas causas

Ordem e Tipo de desvio	Causas geradoras dos desvios de forma
1ª (Forma) Planicidade, cilindridade, retilinidade	Defeitos nas guias das máquinas, deformações por flexão da peça, fixação errada da peça, desgaste nas guias da peça
2ª (Ondulação) Onda	Fixação excêntrica ou defeito de forma da fresa, fixação excêntrica da peça, vibrações da máquina, da ferramenta ou da peça, deflexão da peça durante a usinagem
3ª (Rugosidade) Ranhuras ou raias	Forma da ferramenta, incluindo gumes e raio de quina, avanço ou profundidade de corte
4ª (Rugosidade) Estrias, escamas, protuberâncias	Processo de formação do cavaco (cavaco arrancado, cavaco de cisalhamento, gume postiço), deformação do material
5ª (Rugosidade) Microestrutura do material	Processo de cristalização, modificação da superfície por ataque químico e corrosão
6ª Reticulado cristalino do material	Processo físico e químico da estrutura da matéria, tensões de deslizamento na estrutura reticular do material

Fonte: Silva, 2002 Adaptação da Norma DIN 4760/1982

A madeira apresenta uma estrutura celular que varia entre espécies, dentro de uma mesma espécie e em uma mesma árvore. Seu efeito sobre o acabamento superficial da madeira ainda não foi suficientemente investigado, de modo que não foi identificado, até o presente momento, um método considerado eficaz para analisar a rugosidade da madeira. A principal razão é a dificuldade para distinguir entre as irregularidades superficiais causadas pela usinagem e a rugosidade devida às variações anatómicas da madeira (Hendarto et al, 2006).

Segundo Bonduelle (2002) apud Silva (2002) a quantificação da qualidade da superfície usinada em madeira e derivados deve ser mais profunda do que aquela encontrada para metais, pois a estrutura anatômica promove o aparecimento de grandezas relacionadas aos desvios de 6ª ordem. Nesse sentido, os vasos, lumes das fibras e outras células, falhas na estrutura, trincas de compressão figuram como elementos complicadores deste procedimento,

uma vez que requerem instrumentos de medição com alta precisão ( $\mu\text{m}$ ) e grandes amplitudes na escala (1 a 2 mm).

A **rugosidade** da superfície é considerada um dos mais importantes fatores no processo de adesão, já que influencia na penetração dos adesivos, na formação e no funcionamento das uniões. Lumes expostos permitem uma grande interligação mecânica, ficando disponíveis mais enlaces químicos para uniões típicas de superfícies. Os adesivos interagem em camadas mais profundas da superfície da madeira exposta já que o adesivo flui dentro dos lumes das células e nas pontoações que conectam estes lumes. Em alguns casos os adesivos se difundem dentro das paredes celulares (FRIHART et al, 2007).

Quando a madeira é usinada, o que acontece no nível molecular é o rompimento das uniões entre componentes da madeira. As moléculas que estiveram ligadas são agora locais de ligação com fortes forças atrativas. Quanto maior o número de locais de ligação disponíveis maior é a atração total. Essa atração facilita à madeira recém usinada a molhabilidade pelo adesivo (CUSTÓDIO et al, 2009).

Uma nova superfície é criada pelo corte da madeira pela ferramenta, dependendo dos parâmetros aplicados no processo. As superfícies obtidas nos diferentes processos de maquinado apresentam diferentes formas, contornos, comprimentos de onda e altura. Essas características dependem da geometria das ferramentas, direção de corte, velocidade de corte e de alimentação (SANDAK e NEGRI, 2005). Em superfícies aplainadas as características da madeira maciça estão relacionada com a marca das facas por centímetro e não só pela velocidade da ferramenta. No processo de lixamento as marcas são parâmetros importantes que influenciam a qualidade da superfície em função da granulometria (KILIC et al, 2005).

O fresamento periférico, também chamado de aplainamento, envolve a remoção de excesso de madeira da peça de usinagem em forma de cavacos, os quais são formados pelo contato intermitente da peça com a ferramenta de uma o mais facas que giram no porta-ferramentas. No fresamento convencional ou discordante as ferramentas movem-se contrariamente ao movimento da peça, classificação válida para as operações de fresamento cilíndrico tangencial, amplamente empregadas no beneficiamento de madeiras (GONÇALVES, 2000).

O processo de fresamento periférico é um dos métodos mais comuns no acabamento da superfície da madeira. Ao analisar seu efeito na superfície da madeira e na resistência das uniões coladas concluiu-se que ao empregar facas recém-afiadas na preparação na superfície da madeira a falha no cisalhamento ocorre a uma distância considerável da linha de cola. O contrário acontece ao processar-se a madeira com facas desgastadas (CUSTÓDIO et al,



2009). Segundo Marra (1992) apud Burdurlu et al (2007) madeiras com superfícies lisas produzem uniões mais resistentes do que madeira com superfícies rugosas. Já que a excessiva rugosidade facilita a captura de bolhas de ar nas capas de adesivo, causando sua descontinuidade. Isso resulta na concentração de tensões na vizinhança podendo ocasionar uma falha prematura da união quando trabalham expostas à tensão.

Houwink e Salomon, 1973 consideram que a rugosidade devido à preparação mecânica pode, em alguns casos, aumentar a resistência das uniões quando submetidas a esforços cortantes, devido ao entrecruzamento das fibras. Contudo o aumento da rugosidade gera, inevitavelmente, uniões com uma maior espessura efetiva de colagem com consequentes concentrações de tensões, o que reduz a resistência da união. Burdurlu et al (2007) concluiu que a rugosidade da superfície da madeira limita a penetração de adesivo nas cavidades das células da madeira expostas durante o maquinado e impede a eliminação de água do adesivo.

### **2.6.1 Quantificação da Rugosidade**

Na usinagem a rugosidade consiste em marcas regulares deixadas pelo perfil da ferramenta combinadas com outras irregularidades dadas em função do processo e do material. Vazios intermoleculares, vibrações entre ponta da ferramenta e a peça devido a inclusões duras na matriz do material (CARPINETTI, et al 1996).

Os métodos tradicionais para medir a rugosidade e qualidade da superfície incluem aproximações visuais e tácteis. No entanto, com esses métodos só é possível uma comparação bruta e, informações específicas sobre a superfície não são quantificáveis (HENDARTO et al, 2006). A rugosidade da superfície também chamada de erro micro geométrico é quantificada através de parâmetros como altura (amplitude), e largura (espaçamento) das irregularidades (NOVASKI, 1994).

Existem dois tipos de instrumentos de medição da rugosidade os quais são desenvolvidos principalmente para a medição de materiais de engenharia, tais como plástico e metal. que podem ser divididos em:

- Aparelhos de leitura de parâmetros: sistemas eletrônicos que contêm uma agulha de diamante que entra em contato com a superfície da peça;
- Aparelhos que fornecem leituras e gráficos conjuntos formados pelos aparelhos eletrônicos com unidades de registro gráfico, que fornecem a curva de rugosidade ou o perfil efetivo.

Contudo, não há nenhum dispositivo comercialmente disponível desenvolvido especificamente para medição de superfície de madeira.

O rugosímetro mostra o perfil da peça composto da rugosidade e das ondulações. Através de uma filtragem adequada separam-se os desvios de forma do perfil da rugosidade. Fundamenta-se na medida da profundidade (NOVASKI, 1994).

### 2.6.2 Critérios para avaliação da Rugosidade

De acordo com a NBR 6405/1988, para a condução de medições de rugosidade superficial devem ser tomados em conta os seguintes conceitos:

Zonas de medida: como o perfil efetivo apresenta rugosidade e ondulação, o comprimento de amostragem filtra a ondulação. É recomendado pela norma ISO que os rugosímetros meçam 5 comprimentos de amostragem perfazendo o comprimento de medição, indicando o valor médio desse trecho (Figura 2). Os comprimentos mínimos de amostragem estão apresentados na Tabela 4.

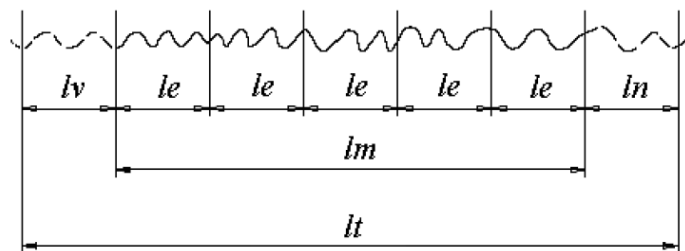


Figura 2 - Comprimentos para avaliação de rugosidade (NBR 6405/1988)

**Le:** Comprimento de amostragem (Cut-off);

**lm:** comprimento do percurso de medição - extensão do trecho útil do perfil de rugosidade utilizado diretamente na avaliação, projetado sobre a linha média;

**lt:** comprimento total de medição;

**lv:** comprimento para atingir a velocidade de medição e

**ln:** comprimento para parada do apalpador - extensão da primeira e última parte do trecho apalpado não utilizado na avaliação, com a finalidade de permitir o amortecimento das oscilações mecânicas e elétricas do sistema e ajuste de centro do perfil de rugosidade.

Tabela 4 - Comprimento de amostragem segundo a NBR 6405/1988

Rugosidade <b>Ra</b> ( $\mu\text{m}$ )	Mínimo comprimento de amostragem <b>Le</b> (Cut off) (mm)
De 0 até 0,1	0,25
Maior que 0,1 até 2,0	0,8
Maior que 2,0 até 10,0	2,5
Maior que 10,0	8

**Rugosidade Média (Ra):** matematicamente definida como a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento ( $y_i$ ), dos pontos de perfil de rugosidade em relação à

linha média, dentro do percurso de medição ( $l_m$ ). Essa grandeza pode corresponder à altura de um retângulo, cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média, tendo por comprimento o percurso de medição ( $l_m$ ) (Eq.1). A Figura 3 mostra este parâmetro de avaliação da rugosidade.

$$Ra = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n}{n} \quad (1)$$

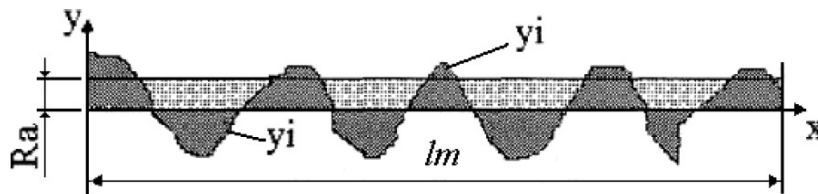


Figura 3 - Rugosidade média (Ra), Norma NBR 6405/88

Um limitante para a utilização do Ra é o fato de ser um valor médio das amplitudes do perfil independente da forma geral das ondulações. O parâmetro não faz distinção entre picos e vales.

*Rugosidade Média quadrática* (Rq) indica a amplitude média da superfície (Eq.2). Sendo mais sensível a picos e vales, ou seja, amplitudes maiores, quando elevados ao quadrado tem um peso maior no cálculo da média das amplitudes.

$$Rq = \frac{[y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + \dots + y_n^2]^{\frac{1}{2}}}{n^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

Assim para um mesmo segmento de uma superfície, a comparação entre valores de Ra e Rq pode acrescentar alguma informação sobre o formato das irregularidades.

*Altura de picos e vales* (R<sub>máx</sub>, R<sub>z</sub>, R<sub>p</sub>): O **R<sub>máx</sub>** corresponde a distância vertical entre os pontos mais baixos e mais altos do perfil dentro do comprimento de medição.

**R<sub>z</sub>** é a média dos cinco maiores picos e cinco maiores vales ao longo do comprimento de medição expresso pela equação 3.

$$R_z = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_5 - (V_1 + V_2 + \dots + V_5)}{10} \quad (3)$$

**R<sub>p</sub>** é a máxima altura do perfil acima da linha de referência dentro de um comprimento amostral.

## 2.7 Pressão de Colagem

A **pressão** aplicada na colagem é o único fator externo ao adesivo e à madeira sendo usado para lograr a união. A pressão é necessária para proporcionar um contato o mais próximo possível entre as superfícies a serem coladas, com uma distribuição uniforme do adesivo, bem como sua penetração na estrutura da madeira facilitando a interligação mecânica (VICK, 1999). A pressão deve permanecer durante grande parte da cura. O excesso de adesivo e de ar deve sair pelas bordas da linha de cola para produzir-se uma linha de união fina e de igual espessura em toda a superfície unida e com adesivo nas células da madeira.

Segundo a pesquisa desenvolvida por Burdurlu et al (2006), uma maior pressão de colagem gera uma maior resistência já que incrementa a entrada do adesivo nas cavidades da madeira. No entanto, o sucesso da união é dado pela aplicação de pressão até o ponto onde não se deteriore a resistência estrutural da madeira.

Uma pressão excessiva pode ocasionar uma sobrepenetração do adesivo gerando uniões pobres com pouca resistência. Ligações mais fortes são produzidas quando a consistência do adesivo permite o uso de pressões moderadamente altas, compatíveis com a pressão recomendada para a densidade da madeira. Pressões baixas, perto de 0,7 MPa, são recomendáveis para madeiras de baixa densidade. Madeiras de alta densidade requerem pressões acima de 1,7 MPa. As uniões devem ser mantidas sob pressão até que alcancem a força suficiente para suportar a manipulação que tende a separar os pedaços de madeira (VICK, 1999).

Ao avaliar o efeito do incremento de pressão na qualidade de juntas colada para a madeira de *Eucalyptus grandis* na ordem de 0,3 a 1,5 MPa, Petrausky e Della Lucia (1998) observaram que uma pressão de 0,7 MPa apresentou resultados de falha na madeira equivalentes às pressões mais elevadas.

Segundo o assinalado por Vick (1999), linhas de cola de adesivos estruturais apresentam uma maior resistência a cargas mecânicas e mudanças dimensionais quando a espessura encontra-se dentro do intervalo de 76-152  $\mu\text{m}$ . Linhas de cola demasiado finas abaixo desse intervalo, são incapazes de transferir tensões entre as partes da união, especialmente aquelas tensões geradas por alterações dimensionais. Linhas de cola com espessura acima dessa faixa tornam-se progressivamente mais fracas com o aumento da espessura, devido à fragilidade dos adesivos estruturais.



## 3 MATERIAL E MÉTODOS

### 3.1 Matéria prima

A pesquisa foi desenvolvida com madeira da espécie *Eucalyptus grandis* W.Hill ex-Maiden, por ser considerada, pelas suas boas propriedades mecânicas, uma espécie com ampla expectativa no mercado de MLC, sendo preciso aprofundar no conhecimento e aperfeiçoamento do processo de produção dos conjuntos laminados.

Foram empregadas semi-toras de *E. grandis* de 21 anos de idade, com massa específica aparente ao 12% de  $0,68 \text{ g/cm}^3$ , procedentes de uma população experimental localizada no município de Lençóis Paulista/SP, remanescentes da pesquisa desenvolvida por Lima (2005).

### 3.2 Adesivos

#### 3.2.1 Resorcinol-formaldeído

Adesivo líquido sintético em solução aquoso-alcoólica de cura à temperatura ambiente. Comercializado com o nome de Cascophen RS-216-M. Apresenta dois componentes sendo um a resina de cor marrom avermelhada e o outro o endurecedor na forma de pó bege. Os dois componentes, depois de misturados, resultam em um adesivo de alto desempenho, à prova d'água fria ou fervente, resistente a diversos solventes orgânicos, fungos e intempéries (MOMENTIVE, 2011).

O resorcinol e o formaldeído reagem letamente para a formação da resina por condensação (PIZZI,1994). Apresenta uma linha de cola de cor escura, o que pode ser considerada como uma desvantagem do ponto de vista estético. Outra desvantagem é a liberação de gases de formaldeído presentes no endurecedor.

O Cascophen RS-216-M é indicado para colagens de materiais para trabalhos navais, aeronáuticos, hidráulicos e outros que poderão ser expostos à ação da água e intempéries. Também é indicado para colagens de madeiras tratadas com preventivos contra fogo, laminados plásticos, chapas duras e outros materiais semelhantes. A mistura tem uma vida útil aproximada de 2 horas a  $20^\circ\text{C}$  e de aproximadamente 1 hora a  $30^\circ\text{C}$ . A aplicação do adesivo pode ser feita com pincel ou escova para pequenos serviços e para grandes é recomendado o uso de passadeiras de cola. Após a aplicação do adesivo as superfícies da madeira devem ser juntadas de forma imediata, para prevenir sua excessiva exposição ao ar. A adição de até 5%

de álcool é recomendada apenas quando a cola estiver grossa por evaporação do solvente ou quando seja necessário melhorar a penetração da cola em algumas madeiras duras. Deve-se manter a pressão das peças coladas até a cura do adesivo. O tempo mínimo de prensagem varia em função da temperatura ambiente sendo de 6 horas (32°C) a 14 horas (20°C). O tempo necessário para que a colagem atinja sua resistência máxima é de 8 dias (MOMENTIVE, 2011).

### 3.2.2 Poliuretano

Adesivo poliuretano mono-componente reforçado com fibras é indicado para a fabricação de MLC e em emendas dentadas, comercializado com o nome de Jowapur 686.60. Dentre suas características, destacam-se o fato de ser livre de formaldeído, ter cor neutra e apresentar linha de cola elástica e altamente resistente à umidade e intempéries (JOWAT AG, 2005). A cura do adesivo ocorre pela reação dos grupos isocianatos em contato com a água presente na madeira. O tempo de prensagem para madeiras com teor de umidade entre 9% e 12% depende da temperatura no plano de cola variando de 1 ½ a 3 horas (JOWAT AG, 2010).

### 3.3 Equipamentos

O mecânico necessário para a manufatura dos diferentes corpos de prova empregados no desenvolvimento da pesquisa foi efetuado com o uso de um ou de combinações dos seguintes equipamentos:

- Serra circular;
- Serra de fita;
- Serra esquadrejadeira;
- Plaina desengrossadeira;
- Plaina desempenadeira;
- Prensas;
- Tacômetro ótico.

A medição da rugosidade das superfícies foi efetuada com o uso do rugosímetro TAYLOR HOBSON Surtronic 2.5+.

Os testes mecânicos destrutivos e não destrutivos foram feitos em uma máquina universal de ensaios e os ensaios de flexão não destrutivos foram efetuados com o uso do *Beam Identification by Non-destructive Grading (BING)* desenvolvido pelo *Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement - CIRAD*.

As observações microscópicas foram feitas em Microscópio Ótico (MO) e Microscópio Estereoscópico Zeiss Stemi SV 11. As imagens de raio-X foram obtidas com o uso do aparelho Faxitron DX v1.00.

### 3.4 Caracterização da adesão

Para as análises da influência do acabamento da superfície, tipo de adesivo e pressão de colagem na resistência das juntas coladas elaboradas com a madeira de *E. grandis* foram efetuados ensaios de cisalhamento no plano de cola, num total de 18 tratamentos.

- 3 acabamentos de superfície, obtidos por fresamento periférico discordante 2 adesivos: Resorcinol-formaldeído (Cascofen) e Poliuretano (Jowapur);
- 3 pressões de colagem: 0,8; 1,2 e 1,5 (MPa).

Na etapa de caracterização da qualidade da superfície, mediante a medição da rugosidade foram avaliadas as variáveis rugosidade média (Ra) e a média de 5 picos e vales (Rz).

#### *Confecção dos corpos de prova*

Semi-toras de *Eucalyptus grandis* com teor de umidade média de 12% obtido em secagem natural, foram serradas para a obtenção de peças orientadas tangencialmente, com dimensões (25x50,8x800)mm, as quais foram avaliadas visualmente, e selecionadas aquelas livres de defeitos como nós e rachaduras (Figura 4).



Figura 4 – Peças de *Eucalyptus grandis* usadas para o desenvolvimento dos ensaios

#### *Acabamento de superfícies*

O acabamento das superfícies foi efetuado mediante fresamento periférico discordante em plaina desempenadeira (Figura 5 e Tabela 5), empregando-se 3 velocidades de avanço (Vf) 3,7; 6 e 12 m/min., sendo a primeira obtida por alimentação manual, e as duas restantes



reguladas pelo alimentador de avanço automático. Os acabamentos produzidos com as diferentes velocidades foram nomeados como tratamentos (I, II e III) respectivamente.

A velocidade de avanço manual foi aferida empregando-se o tacômetro ótico DYNAPAR HT 100, o qual registra a velocidade de deslocamento da peça mediante um sensor colado nessa. Usinaram-se 12 peças em cada uma das velocidades.

Tabela 5- Especificações técnicas da plaina desempenadeira

Marca	ROCCO PMS 350
Número de Facas	3
Diâmetro do cabeçote	90 mm
Diâmetro da polia do cabeçote	77 mm
Diâmetro da polia do motor	105 mm
Rotação nominal	3465 RPM
Potencia do motor	3 cv
Altura de aplainamento	1 mm



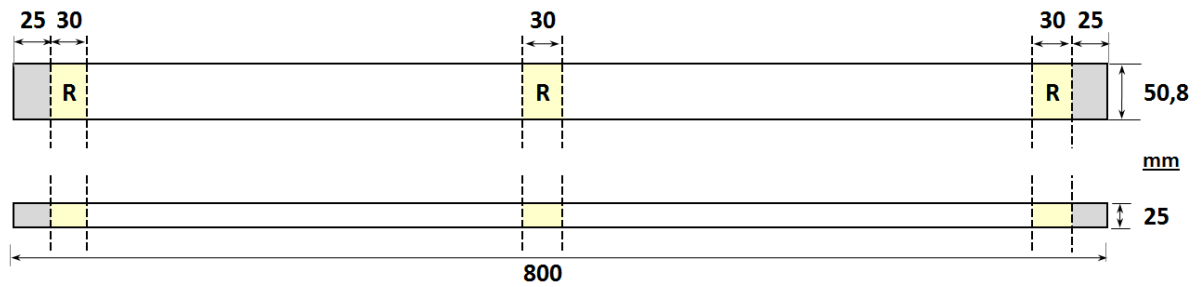
(a)



(b)

Figura 5 – Plaina desempenadeira com alimentador de avanço (a), nivelamento da altura de corte (b)

Uma vez efetuado o acabamento das superfícies, as peças foram seccionadas transversalmente de forma a produzirem-se 7 partes (Figura 6); sendo rejeitada 1 peça com 25mm de cada extremidade, para evitar superfícies com marcas ocasionadas na entrada e saída do processo 3 partes com dimensões (25x50,8x30) mm correspondentes aos corpos de prova para medição da rugosidade, e 2 de (25x50,8x320) mm para posterior manufatura de corpos de prova de cisalhamento.



(a)



(b)

Figura 6– Seccionamento transversal das peças, para obtenção de corpos de prova empregados na medição de rugosidade (R) e peças para produção de corpos de prova de ensaios de cisalhamento (a), seccionamento em serra esquadrejadeira (b)

Foram produzidos 108 corpos de prova para medição da rugosidade, sendo 36 por tipo de acabamento de superfície e 72 peças para a elaboração dos corpos de prova de cisalhamento.

### ***Medição da Rugosidade***

A medição da rugosidade foi efetuada com campo de medição de  $300\mu$  (Figura 7). Na importação dos dados foi empregado o software MOUNTAINS, o qual permitiu o registro dos parâmetros de acordo com os métodos de filtragem Gaussiano Robusto e Gaussiano.

Adotando os critérios da norma NBR 6405/88 sobre a condução de medições da rugosidade superficial, foram efetuadas 6 medições em cada um dos 3 corpos de prova seccionados de cada peça usinada, de modo que o valor médio dos parâmetros avaliados foi resultante de 18 medições.



Figura 7 – Rugosímetro fazendo a leitura da rugosidade na superfície preparada de *E. grandis*

As medições em cada corpo de prova foram distribuídas uniformemente ao longo da largura da superfície como mostra a Figura 8, com comprimento de amostragem (cut-off) de 2,5 mm, percurso de medição ( $l_m$ ) de 12,5 mm e comprimento total ( $l_t$ ) de 17,5 mm.

O comprimento de amostragem adotado, corresponde ao valor sugerido de acordo com o  $R_a$  esperado, indicado para uma faixa de rugosidade entre  $2,0 < R_a < 10,0$ . O percurso de medição ( $l_m$ ) para cut-off 2,5 mm é de 12,5 mm, resultando na média de 5 valores adquiridos por medição.

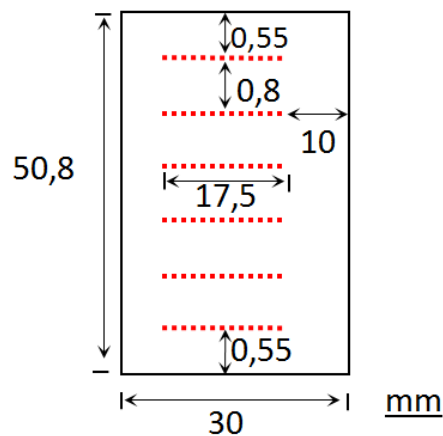


Figura 8 – Distribuição dos percursos de medição da rugosidade no corpo de prova

O parâmetro adotado foi a Rugosidade média ( $R_a$ ) o qual é considerado como aquela melhor se ajusta aos estudos de acabamento superficial de madeiras. Adicionalmente foi registrado o valor do  $R_z$  correspondente à média de 5 picos e vales.

### ***Procedimento de Colagem***

O conjunto de peças com dimensões (25 x 50,8 x 320) mm empregados na fabricação dos corpos de prova de cisalhamento, foi mantido em condições ambientes controladas garantindo

um teor de umidade aproximado de 12% indicado pelos fabricantes dos adesivos para a obtenção de uma colagem de qualidade.

Os adesivos foram aplicados nas duas faces a serem coladas, sendo espalhados com pincel, numa dosagem de  $300 \text{ g/m}^2$  no caso do Cascophen e  $250 \text{ g/m}^2$  para o Jowapur. A montagem das partes componentes foi feita imediatamente após a aplicação do adesivo atendendo as especificações técnicas.

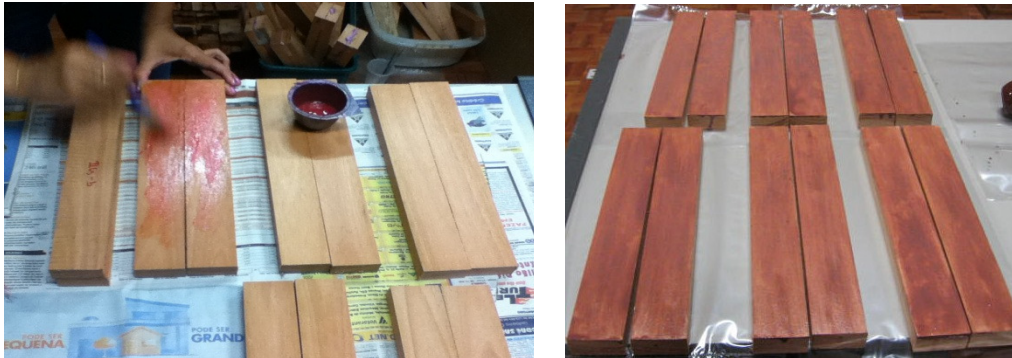


Figura 9 – Aplicação do adesivo em ambas as superfícies a serem unidas

### ***Procedimento de prensagem***

A pressão de colagem foi aplicada e mantida constante com a máquina universal de ensaios. Os 6 conjuntos de peças coladas em cada uma das secções foram dispostos e alinhados mediante contenção lateral (Figura 10).

As pressões de colagem aplicadas (0,8; 1,2 e 1,5 MPa) mantiveram-se constantes por um período de 10 horas, em cada uma das 6 seções de colagem efetuadas sob temperatura e umidade relativa controladas de  $21^\circ\text{C}$  e 69%, respectivamente.



Figura 10 –Pilha de pares de barras coladas prensadas simultaneamente pela mesma pressão

As peças coladas foram seccionadas conforme o esquema da Figura 11 (a), para a obtenção dos corpos de prova com as dimensões e forma mostradas na Figura 11 (b), segundo a Norma ASTM-905-08.

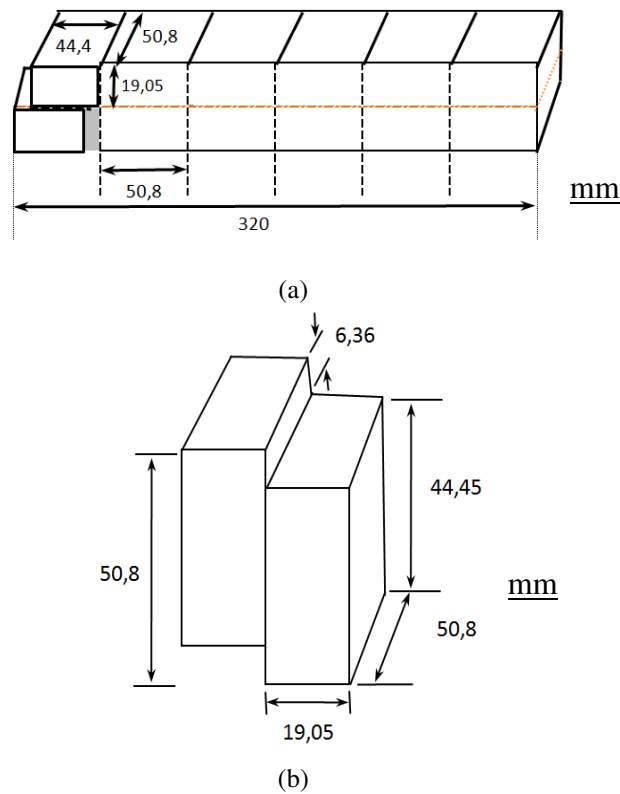


Figura 11 – Peças bi-laminadas como elemento base de múltiplos corpos de prova Norma ASTM D-905-08 (a), corpo de prova para ensaios de cisalhamento de acordo com a ASTM D-905-08 (b)

A escolha desse tipo de corpo de prova, fundamentou-se em ensaios de cisalhamento desenvolvidos previamente usando os corpos de prova recomendados pela Norma NBR719097; nos quais observou-se o esmagamento na base dos corpos de prova, fato que se considerou de influência negativa na determinação da resistência ao cisalhamento.

Os corpos de prova foram mantidos em câmara climatizada, até a finalização dos ensaios mecânicos.

### ***Ensaio de cisalhamento***

Os ensaios de cisalhamento foram efetuados conforme os procedimentos citados pela norma ASTM D-905-08. A resistência ao cisalhamento no plano de cola ( $f_{gv0}$ ) é dada pela máxima tensão de cisalhamento que pode atuar na seção crítica do corpo de prova (eq.3). O carregamento é monotônico crescente correspondente a 2,5 MPa por minuto.

$$f_{gvo} = \frac{F_{gvo,máx}}{A_{gvo}} \quad (3)$$

Para a determinação da eficiência adesiva (eq.4) calculada em relação à resistência ao cisalhamento da madeira maciça foram efetuados ensaios nas partes que conformavam o corpo de prova colado (Figura 12).

$$Eficiência = \frac{f_{gvo}}{f_{vo}} \cdot 100 \quad (4)$$

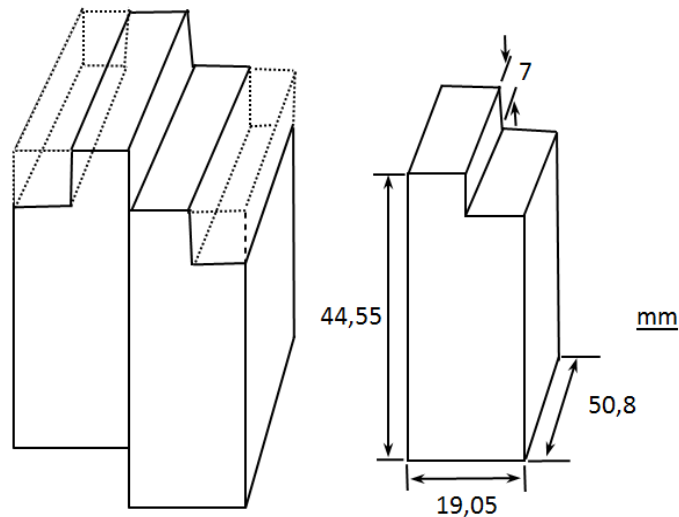


Figura 12 – Corpo de prova para o ensaio de cisalhamento na madeira maciça tirado das partes componentes do corpo de cisalhamento no plano de cola

A ruptura apresentada foi caracterizada determinando-se o tipo de falha apresentado, através da estimativa da porcentagem de falha de acordo com a ASTM D 5266-05.

#### Delineamento estatístico

Adotou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado, em esquema fatorial 3x2x3; considerando os fatores acabamento da superfície, adesivo e pressão de colagem. O esquema da análise da variância está mostrado na Tabela 6 considerando q foram tomadas 10 repetições em cada um dos tratamentos analisados.

Tabela 6 - Esquema da análise de variância para a eficiência adesiva ( $f_{gv0}/f_{v0}$ ) de *E. grandis* com diferentes acabamentos de superfície, pressão de colagem e tipo de adesivo

<b>Causas de variação</b>	<b>Graus de liberdade</b>
Acabamento da superfície	2
Adesivos	1
Pressão de colagem	2
Acabamento x Adesivo	2
Acabamento x Pressão	4
Adesivo x Pressão	2
Acabamento x Adesivo x Pressão (Tratamentos)	4 (17)
Resíduo	162
Total	179

As análises estatísticas foram efetuadas com o pacote estatístico SAS.

### **Análises da linha de cola**

Efetuuou-se a avaliação qualitativa da linha de cola mediante técnicas de microscopia ótica e processamento de imagens de raio-x dos diferentes tratamentos estudados.

Os corpos de prova foram confeccionados de maneira conjunta com os corpos de prova do ensaio de cisalhamento, e deles foram retirados cortes micrométricos nas seções transversal e longitudinal especificamente na zona do plano de cola.

As medições da espessura da linha de cola gerada em cada um dos tratamentos avaliados foi determinada mediante imagens obtidas em testes de raio-X, pela exposição dos corpos de prova à radiação do aparelho Faxitron Dx v1.00, de intensidade de 30 kv durante 7 s. Os raios-X foram colimados através do corpo de prova e a radiação absorvida em diferentes intensidades gerou imagens que permitiram a delimitação da zona da linha de cola.

Avaliou-se a relação existente entre a espessura da linha de cola e a resistência ao cisalhamento; assim como a relação entre a espessura e a uniformidade da linha de cola com as diferentes variáveis avaliadas.

#### **3.4.1 Avaliação do tamanho e forma dos corpos de prova para resistência ao cisalhamento**

Efetuaram-se ensaios comparativos usando corpos de prova com as dimensões estabelecidas pelas Normas ASTM D-905-08 e NBR 7190/97 (Figura 13), com o objetivo de definir-se o tamanho do corpo de prova mais indicado para a determinação da resistência ao cisalhamento no plano de cola paralelo às fibras.

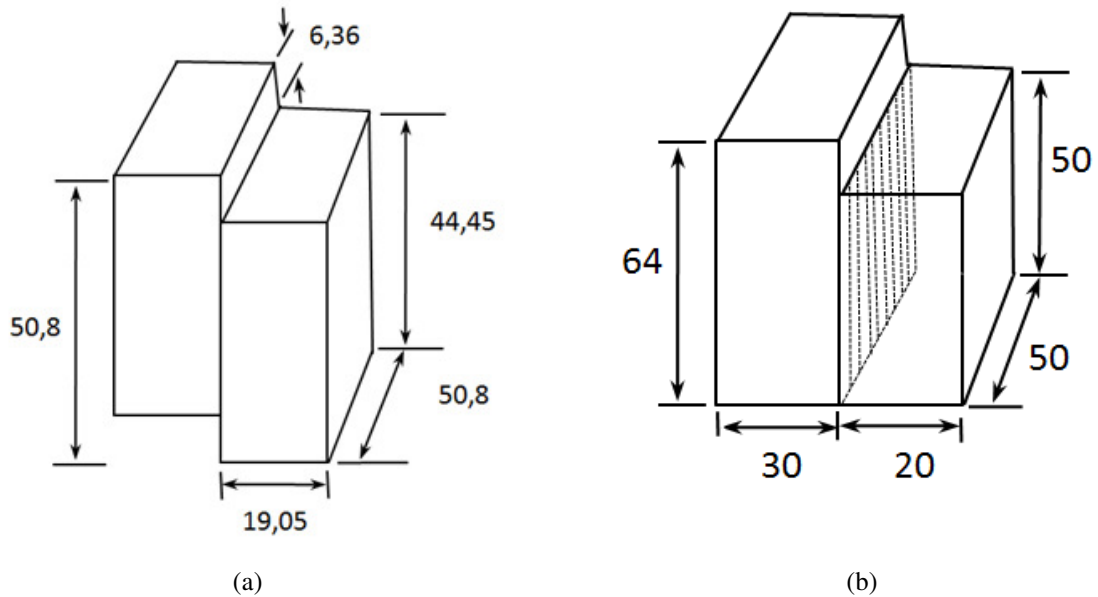


Figura 13 – Corpos de prova cisalhamento segundo ASTM D-905-08(a), NBR 7190/97(b)

Os corpos de prova foram confeccionados de maneira conjunta empregando madeira selecionada, com teor de umidade de 12% e livre de defeitos.

As peças, orientadas no sentido paralelo às fibras, foram maquinadas garantindo homogeneidade das superfícies a serem coladas em todos os tratamentos.

Os adesivos Cascophen e Jowapur foram aplicados manualmente nas superfícies, numa dosagem de 300 e 250 g/m<sup>2</sup>, respectivamente; atendendo às diferentes indicações técnicas de cada um dos adesivos. A pressão de colagem empregada foi de 1,2 MPa, já que exibiu um comportamento satisfatórios nos ensaios prévios.

Os ensaios de cisalhamento foram conduzidos com uma velocidade de carregamento de 2,5MPa/min, até a ruptura do corpo de prova. A ruptura produzida foi caracterizada determinando o tipo de falha apresentado e estimando a porcentagem de falha de acordo com a norma ASTM D 5266-05.

#### Delineamento estatístico

O arranjo estatístico para o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras foi um fatorial 2 x 2, sendo considerados dois tamanhos de corpos de prova (ASTM-D-905-08 e NBR 7190/97) e dois adesivos (Cascophen e Jowapur). Para cada um dos 4 tratamentos foram efetuadas 10 repetições. Na Tabela 7 está mostrado o esquema da análise da variância para a eficiência adesiva.



Tabela 7- Esquema da análise de variância para a eficiência adesiva ( $f_{gv0}/f_{v0}$ ) de *E. grandis* com diferente tamanho de corpo de prova e tipo de adesivo

<b>Causas de Variação</b>	<b>Graus de Liberdade</b>
Tamanho do corpo de prova	2
Adesivo	1
Tamanho x Adesivo	2
Tratamento	(5)
Resíduo	34
<b>Total</b>	<b>39</b>

### 3.4.2 Degradação da linha de cola

Foram produzidos 40 corpos de prova colados, segundo a forma e dimensões dadas pela ASTM-905-08, sendo 20 deles colados com Cascophen e 20 com o Jowapur de acordo com a metodologia de colagem anteriormente descrita.

Metade de cada lote foi submetida a um processo artificial, simples e acelerado de envelhecimento para avaliar-se o grau de degradação da cola e das implicações no fenômeno da adesão. Os corpos de prova foram mantidos submersos em água fervente durante 4 horas, submersos em água fria por 1 hora secos em estufa à temperatura de  $70^{\circ} \pm 3^{\circ} \text{C}$  por 18 horas e novamente submersos em água fervente por mais 4 horas. Efetuou-se a secagem natural dos corpos até estes alcançarem um teor de umidade de 12%. Uma vez finalizado o tratamento, os corpos de prova foram conservados em condições ambientais controladas durante uma semana até a finalização dos ensaios.

Os 20 corpos de prova restantes de cada lote foram usados como controle e ensaiados ao cisalhamento para efeito de comparação, sem receber nenhum tratamento complementar.

### 3.4.3 Influência do tempo de espera entre a usinagem da superfície e a efetiva colagem

Essa influência foi avaliada através da resistência ao cisalhamento de corpos de prova colados depois de 24, 48 e 360 h de preparo das superfícies a serem unidas pela cola.

A confecção dos corpos de prova nesta etapa seguiu a sequência adotada nas etapas prévias sendo adotado o corpo de prova da ASTM D-905-08 com 1 acabamento superficial, o Jowapur e pressão de 1,2 MPa.

Os ensaios de cisalhamento foram conduzidos como citado nas etapas anteriores; ensaiando-se 10 corpos de prova para cada tratamento. O esquema da análise de variância está mostrado na Tabela 8.

Tabela 8 - Esquema da análise de variância para eficiência adesiva ( $f_{gv0}/f_{v0}$ ) com diferentes tempos de espera entre a usinagem da superfície e a efetiva colagem

Causas de Variação	Graus de Liberdade
Tempo de espera	2
Resíduo	27
<b>Total</b>	<b>29</b>

### 3.5 Ensaios de flexão

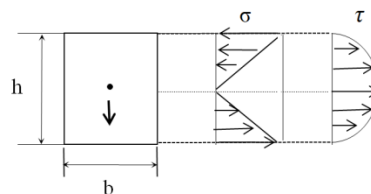
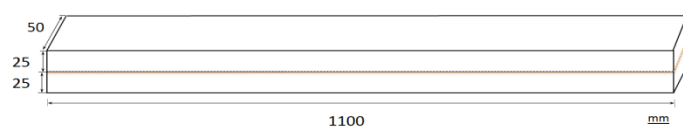
#### 3.5.1 Correlação entre a resistência ao cisalhamento no plano de cola e a resistência à flexão

Com o intuito de avaliar a correlação existente entre a resistência ao cisalhamento no plano de cola, com a resistência exibida nos ensaios de flexão fabricaram-se 6 vigas laminadas coladas e 6 vigas laminadas não solidarizadas, compostas por duas lâminas com dimensões (25x50x1100) mm.

As vigas laminadas coladas foram solidarizadas com o adesivo Jowapur numa dosagem de  $250 \text{ g/m}^2$  e uma pressão de colagem de  $1,2 \text{ MPa}$  (Figura 14). Terminado o processo de prensagem as vigas laminadas coladas foram mantidas em condições ambientais controladas, com temperatura média de  $21^\circ\text{C}$  e umidade relativa do ar de 69%.



(a)



(b)

Figura 14 – Esquema de prensagem de vigas laminadas coladas (a), viga laminada colada para ensaios de flexão com a linha de cola na posição crítica para tensões cisalhantes (b)

Efetuarão-se ensaios não destrutivos e destrutivos nas peças componentes e nas vigas laminadas (Tabela 9). As peças usadas para a fabricação das vigas assim como as vigas

laminadas foram submetidas a ensaios de flexão não destrutivos para a determinação do módulo de elasticidade ( $E_{m0}$ ) mediante os métodos de flexão estática a três pontos e ensaio de vibração transversal com o uso do sistema *Beam Identification by Non-destructive Grading* (BING).

Tabela 9 - Ensaios não destrutivos e destrutivos de flexão em madeira maciça, vigas não solidarizadas e vigas laminadas solidarizadas

<b>Ensaios não destrutivos</b>	
<i>Flexão estática a três pontos</i>	- 24 peças de (25x50x1100) mm
	- 12 vigas não solidarizadas com peças sobrepostas (50x50x1100)mm
	- 12 vigas não solidarizadas com peças dispostas lateralmente (50x100x1100) mm
	- 6 vigas laminadas solidarizadas (50x50x1100) mm
<i>Ensaio de vibração transversal</i>	-12 peças de (25x50x110)
<i>Beam Identification by Non-destructive Grading</i>	- 6 vigas laminadas solidarizadas (50x50x1100) mm
<b>Ensaios destrutivos</b>	
<i>Flexão estática a três pontos</i>	- 6 vigas laminadas solidarizadas (50x50x1100) mm
	- 6 vigas laminadas não solidarizadas (50x50x1100) mm

Na Figura 15 está mostrado o arranjo do ensaio não destrutivo de vibração transversal para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico na flexão ( $E_{m0}$ ) e módulo de cisalhamento ( $G$ ) em peças de madeira maciça e em vigas laminadas coladas. O corpo de prova é impactado numa das extremidades e o sinal é captado por um microfone localizado no extremo oposto ao impacto. Os dados adquiridos foram transformados e processados pelo software BING.

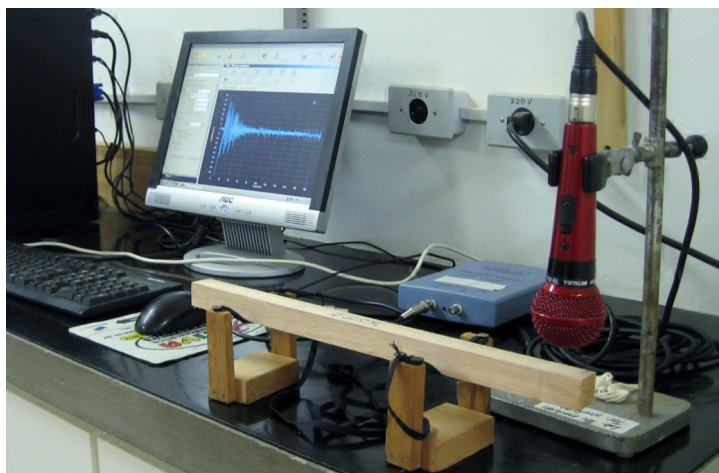


Figura 15 - Sistema de ensaio de vibração transversal Beam Identification by Non-destructive Grading (BING)

Os ensaios destrutivos de flexão a três pontos foram efetuados seguindo os procedimentos dados pela NBR 7190/97 (Figura 16). O carregamento foi aplicado à velocidade de 10 MPa/min., até a ruptura do corpo avaliando-se o módulo de elasticidade e o módulo de ruptura.

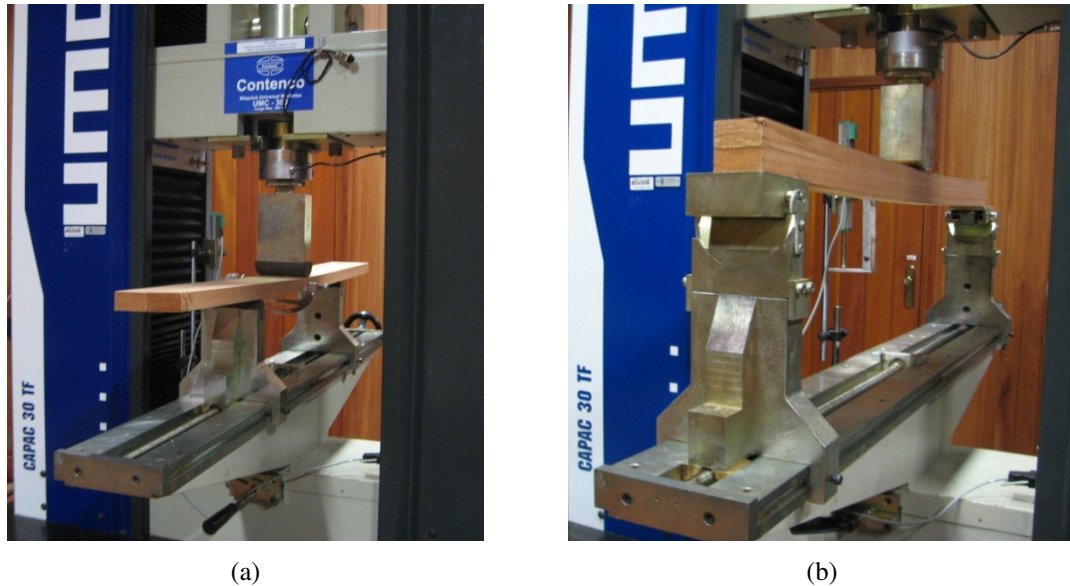


Figura 16 - Arranjo dos ensaios não destrutivos de flexão a três pontos em peças não solidarizadas dispostas lateralmente (a) e sobrepostas (b)

O módulo de elasticidade no ensaio de flexão estática foi calculado (eq. 5) segundo o procedimento descrito por Aprilanti, 2010 mediante o coeficiente angular (B) da reta  $P=Bf+A$ , obtido ao ajustar a reta no trecho elástico do diagrama carga-deslocamento (Figura 17). O cálculo do módulo de elasticidade com esta metodologia permite efetuar os ensaios de flexão dispensando os ciclos de carregamento citados na norma NBR7190-97, por considerar um grande número de leituras e tornar minimizado o erro que pode ser gerado pela acomodação das fibras.

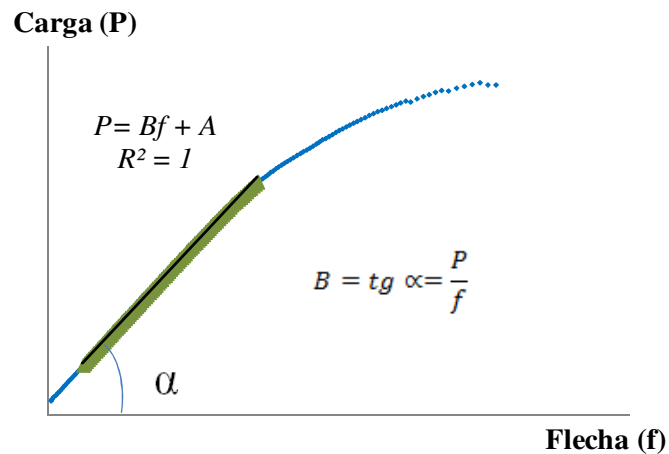


Figura 17– Diagrama carga-deslocamento no ensaio de flexão com indicação da reta ajustada ao trecho elástico

$$f = \frac{PL^3}{48E_{m0}I} \rightarrow E_{m0} = \frac{PL^3}{f48I} \quad (5a)$$

$$E_{m0} = \frac{BL^3}{48I} \quad (5b)$$

$E_{m0}$ : módulo de elasticidade à flexão

B: coeficiente angular;

I: momento de inércia da seção transversal  $I = bh^3/12$ ;

O diagrama do momento fletor está ilustrado na Figura 18. O módulo de Ruptura ( $f_M$ ) foi calculado de acordo com a equação 6.

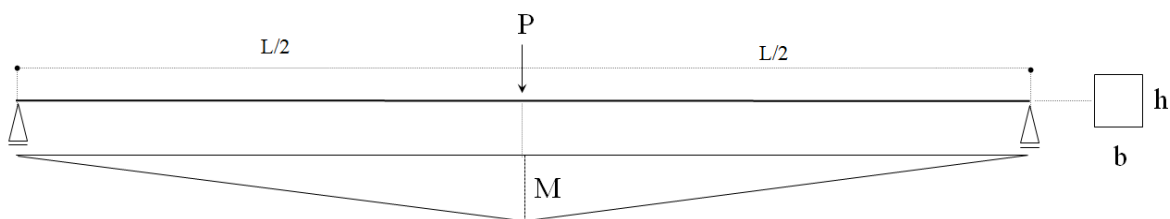


Figura 18 – Diagrama de momento fletor devido a carregamento real

$$f_M = \frac{M}{I} \cdot y \quad (6)$$

M: momento fletor máximo aplicado ao corpo de prova  $M = PL/4$ ;

I: momento de inércia da seção transversal;  $I = bh^3/12$ ;  
 Y: distância da linha neutra à borda;  $y = h/2$

### 3.5.2 Determinação da influência do esforço cortante

Com o objetivo de quantificar teoricamente e avaliar na prática, a real influência do esforço cortante na flecha obtida no ensaio de flexão com carga aplicada no meio do vão (L) de um corpo de prova de seção transversal b x h, foi criado o Índice de Influência do esforço Cortante (**IFC**). O IFC foi obtido através do princípio dos trabalhos virtuais deduzindo as equações que fornecem as componentes da flecha total em um dado ponto do comprimento da viga, devidas ao momento fletor (**f $\sigma$** ) e ao esforço cortante (**f $\tau$** ).

Foram feitos ensaios destrutivos em 10 peças de madeira maciça com dimensões (6 x 6 x 150) cm à flexão a três pontos empregando-se as relações L/h =21 e 16 (Figura 19).

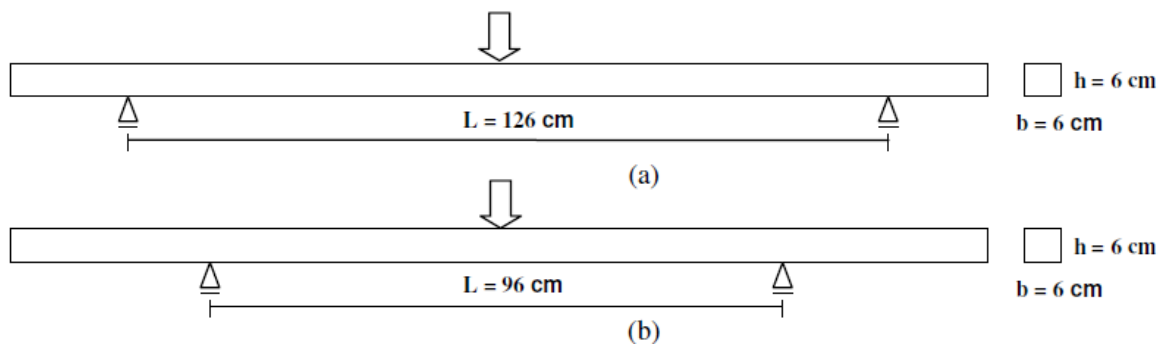


Figura 19 – Esquema dos ensaios destrutivos de flexão em vigas de madeira maciça com L/h=21 (a) e L/h=16 (b)

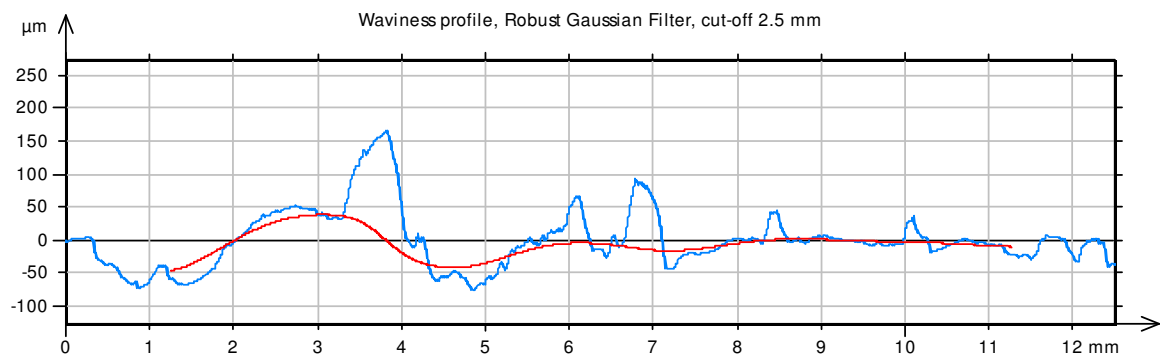


## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

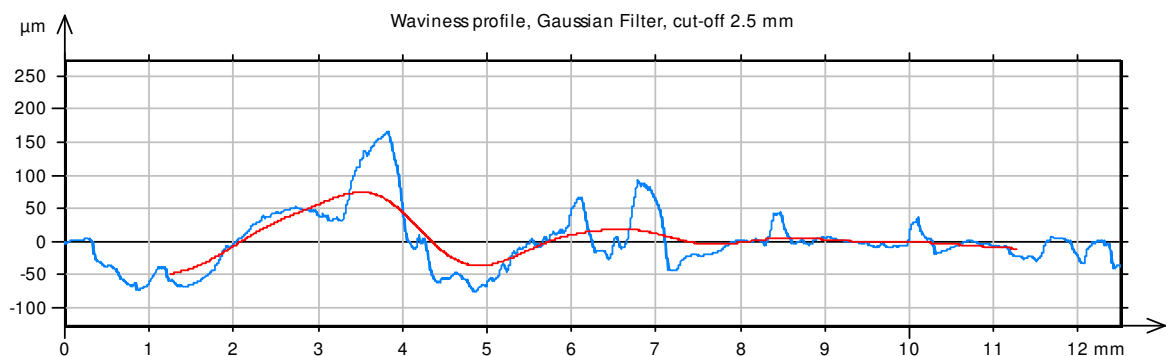
### 4.1 Caracterização da adesão

#### 4.1.1 Medição da Rugosidade

A qualidade das superfícies obtidas mediante fresamento periférico discordante com três velocidades de avanço 3,7m/min; 6m/min e 12 m/min correspondentes aos denominados acabamentos I, II e III foi avaliada considerando os parâmetros rugosidade média ( $R_a$ ) e a média de 5 picos e vales ( $R_z$ ). A Figura 20 exemplifica o conjunto de dados obtidos em um percurso de medição, mostrando em azul o conjunto original registrado e em vermelho o filtro da linha média, usado para ajustar os perfis de cada um dos métodos de filtragem empregados Gaussiano Robusto (GR) e Gaussiano (G) .



(a)



(b)

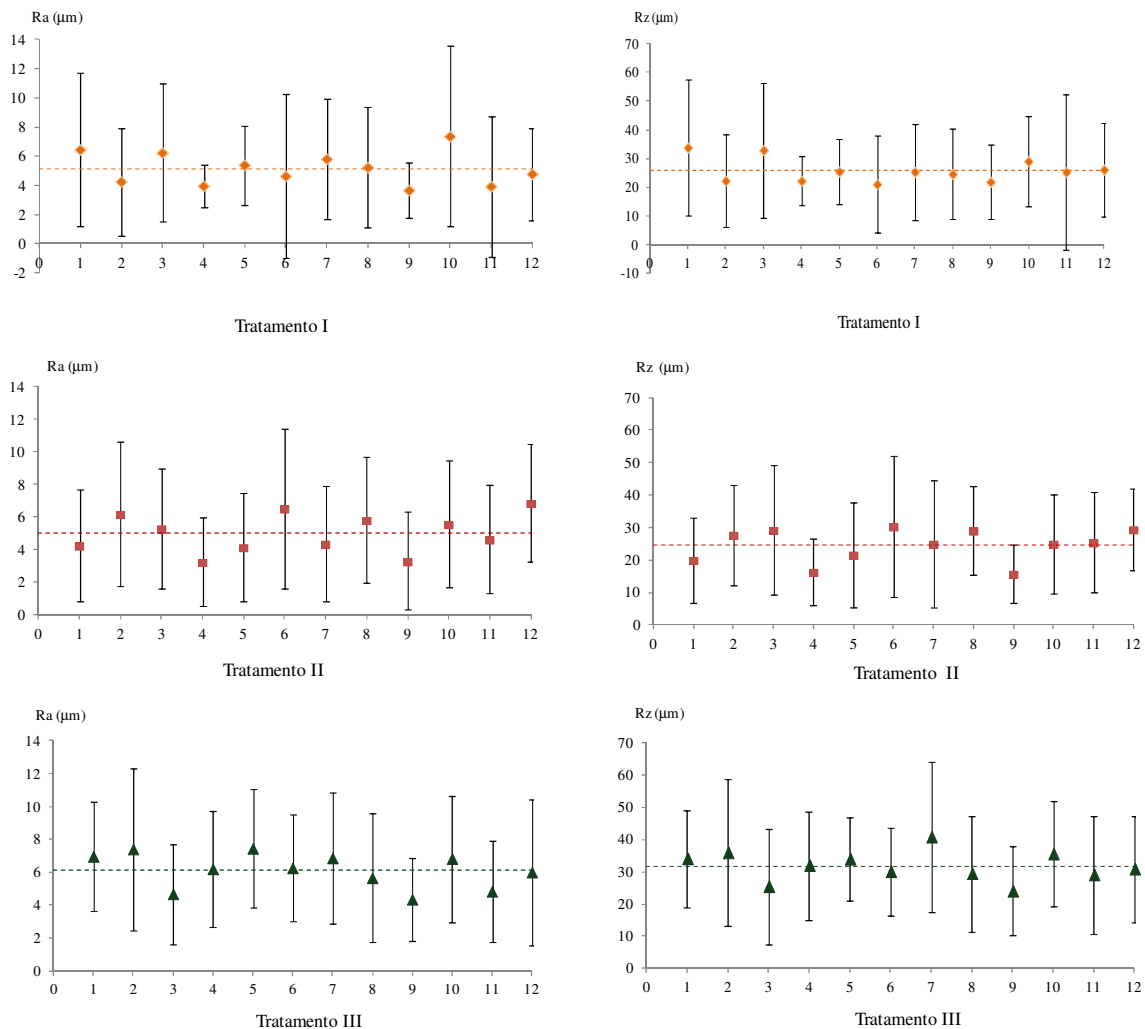
Figura 20 – Perfis de rugosidade filtrados pelo Método Gaussiano Robusto (a) e Gaussiano (b)

Os valores registrados para cada um dos parâmetros avaliados foram sempre superiores ao empregar o método de filtragem Gaussiano robusto. Este efeito encontra-se associado ao fato de que o perfil filtrado é obtido subtraindo-se o filtro da linha média do perfil primário, no caso do método Gaussiano quando a linha média é subtraída o vale é levantado reduzindo



sua profundidade. Esse efeito é considerado indesejável; enquanto, o método Gaussiano robusto não é tão influenciado pela presença de picos e vales, o que o torna particularmente útil na análise da superfície da madeira já que os pontos de dados de rugosidade da superfície da madeira são causados pelas asperezas devido à anatomia ou a qualquer elevação do perfil.

Na Figura 21 estão apresentados os parâmetros Rugosidade média (Ra) e média de 5 picos e vales (Rz). A média aritmética e o desvio padrão para cada uma das 12 peças usinadas por tratamento foram obtidos a partir de 18 percursos de medição. As linhas tracejadas correspondem aos valores médios calculados para cada tratamento e são apresentados de acordo com os métodos de filtragem, Gaussiano Robusto e Gaussiano.



(a)

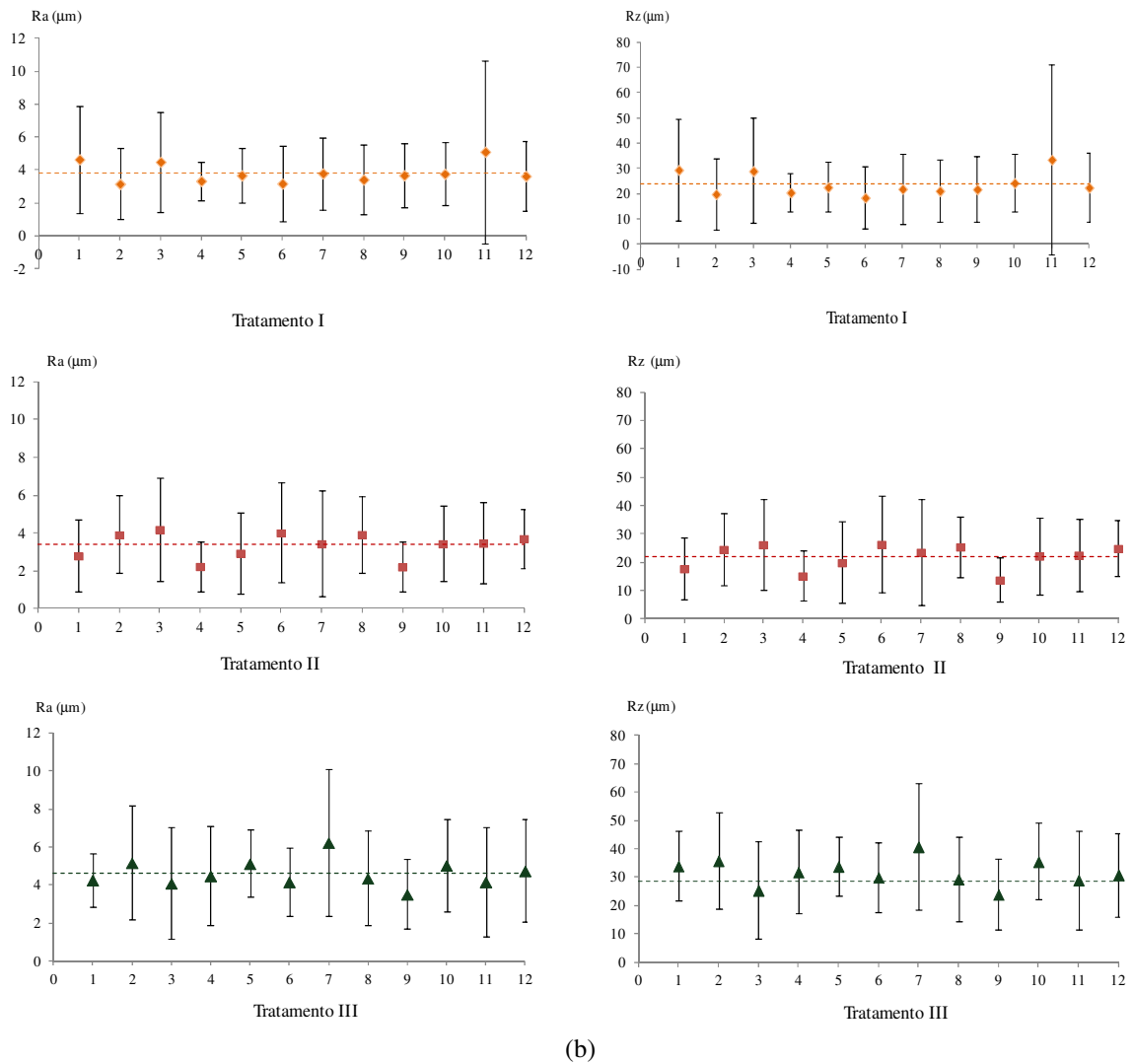


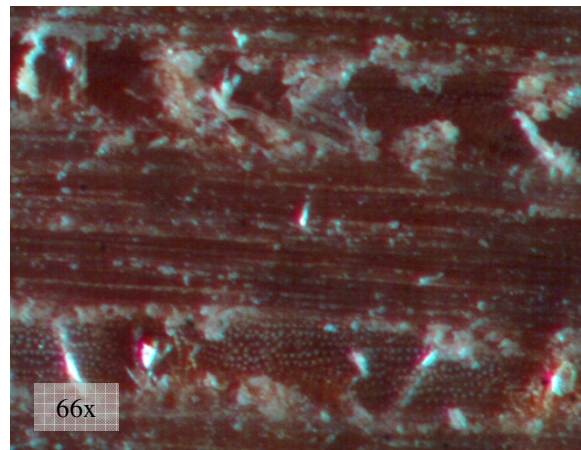
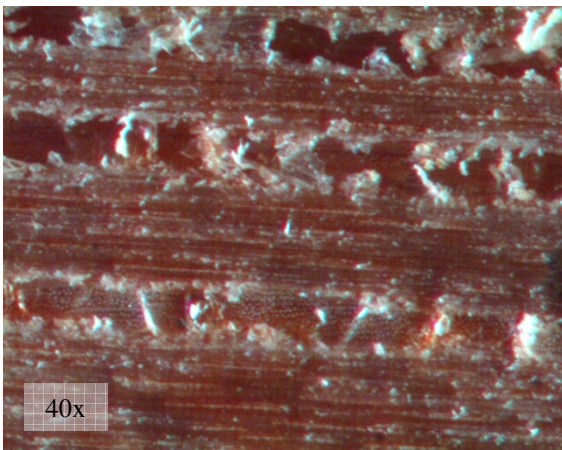
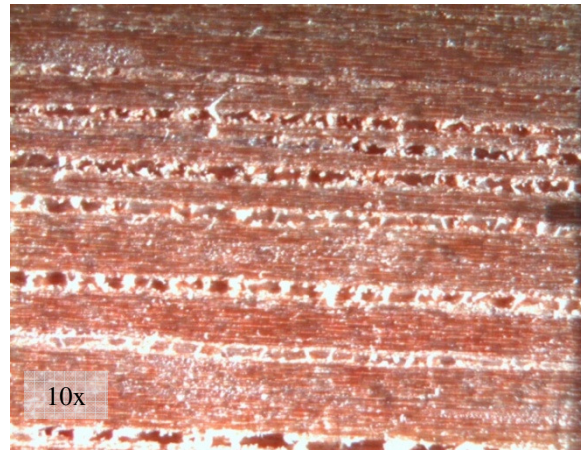
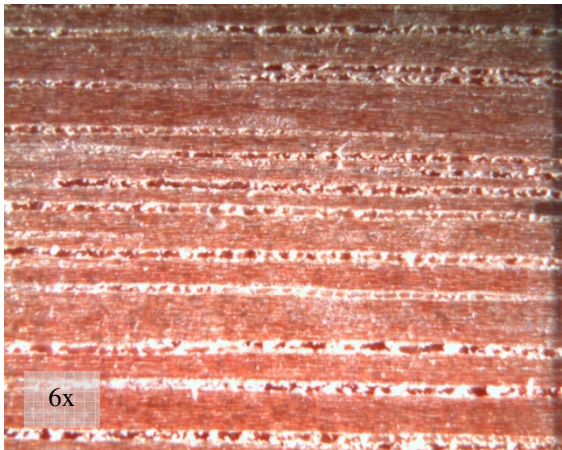
Figura 21– Parâmetros de Rugosidade  $Ra$  ( $\mu\text{m}$ ) e  $Rz$  ( $\mu\text{m}$ ) das peças usinadas por fresamento periférico, ajustados pelos métodos de filtragem Gaussiano Robusto (a) e Gaussiano (b)

Foi observada uma alta variabilidade dos parâmetros de rugosidade entre as medições efetuadas dentro de um mesmo corpo de prova. Essa variabilidade corresponde ao contraste causado no percurso de medição pelos elementos vasculares e fibras. Nas imagens ampliadas das superfícies (Figura 22), observa-se que a espécie exibe uma alta frequência de vasos abertos de tamanho considerável, facilitando que o sensor de medição se desloque para dentro e para fora deles. A irregularidade dos vasos faz com que apresentem maiores valores de rugosidade, enquanto que as fibras exibem superfícies mais homogêneas com menor rugosidade. Isso permite afirmar que a medição da rugosidade depende muito mais da anatomia da espécie, do que do processo de usinagem. Segundo Fujiwara et al. (2003), as irregularidades causadas pelas estruturas celulares podem ter um efeito significativo na qualidade do acabamento das superfícies. No perfil de rugosidade os vales profundos correspondentes a estruturas celulares como vasos de grande diâmetro geram picos artificiais,

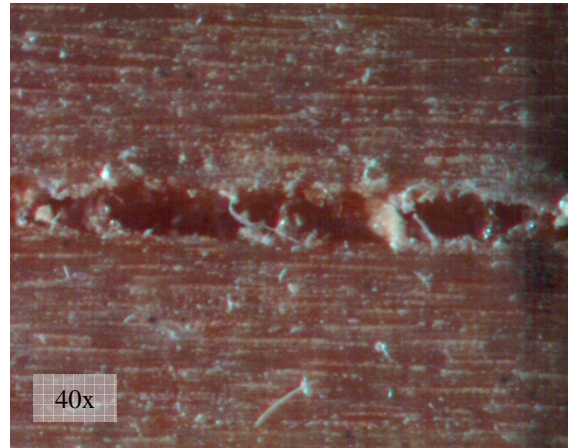
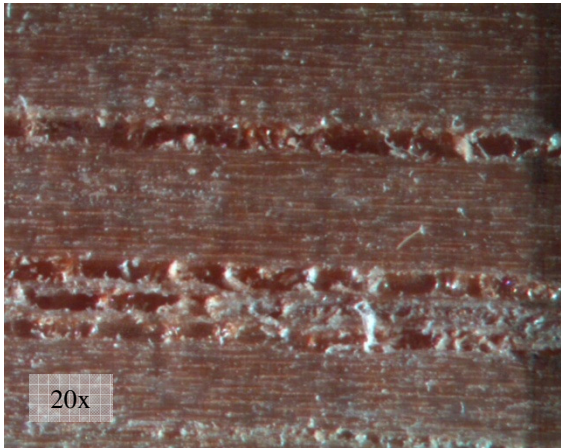
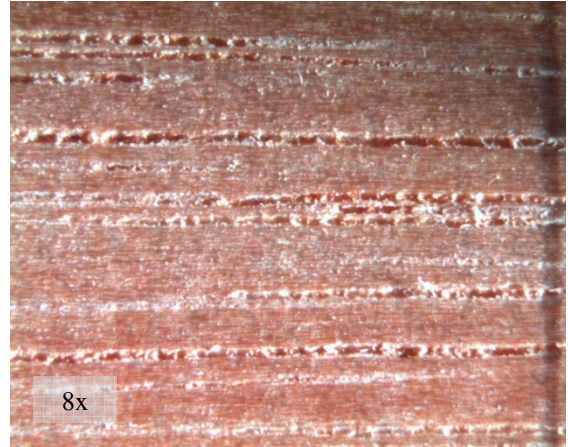
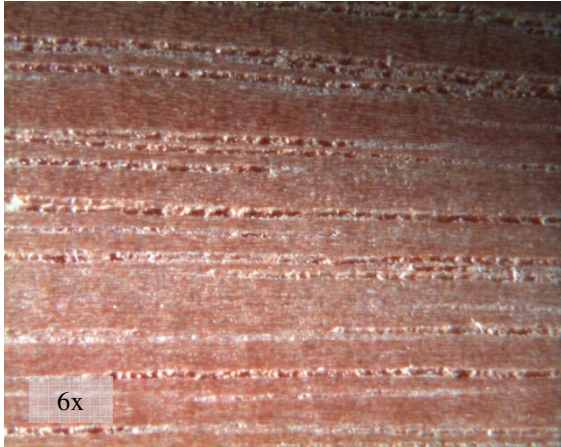
ocasionando o incremento na rugosidade pela variação natural da superfície e, portanto, não refletem o efeito real do processo de usinagem.

A Figura 22 apresenta imagens ampliadas de corpos de prova de *E. grandis* em cada um dos tratamentos de acabamento de superfície avaliados. Algumas das superfícies exibiram defeitos gerados no processo de usinagem, nos quais não foi possível a medição da rugosidade, já que a amplitude foi superior aos limites do rugosímetro (Figura 23). Estes defeitos segundo o relatado por Silva (2002) encontram-se associados a madeiras com baixa massa específica que apresentam tecidos frágeis resultando em superfícies com baixa qualidade de acabamento; as células são arrancadas durante a usinagem originando as denominadas superfícies aveludadas.

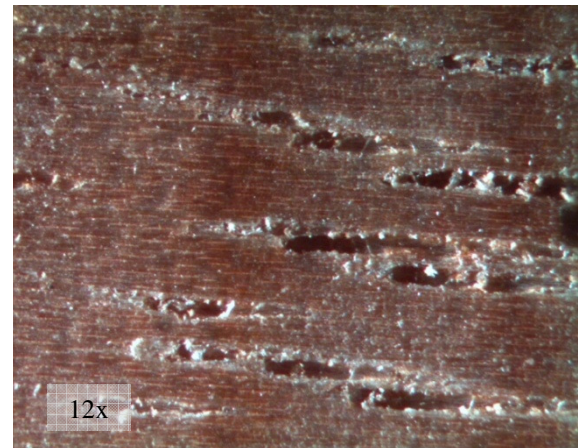
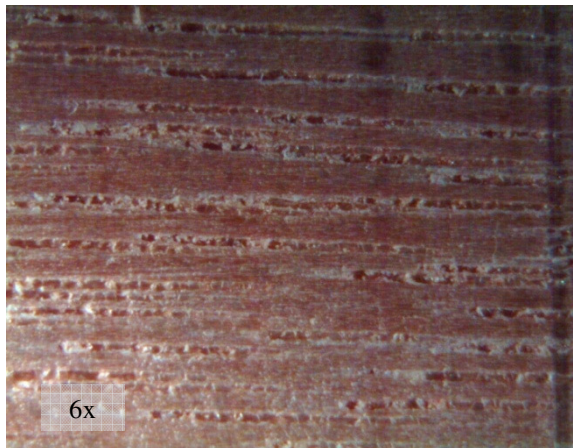
Tratamento I: 3,7m/min.



Tratamento II: 6 m/min



Tratamento III: 12 m/min.



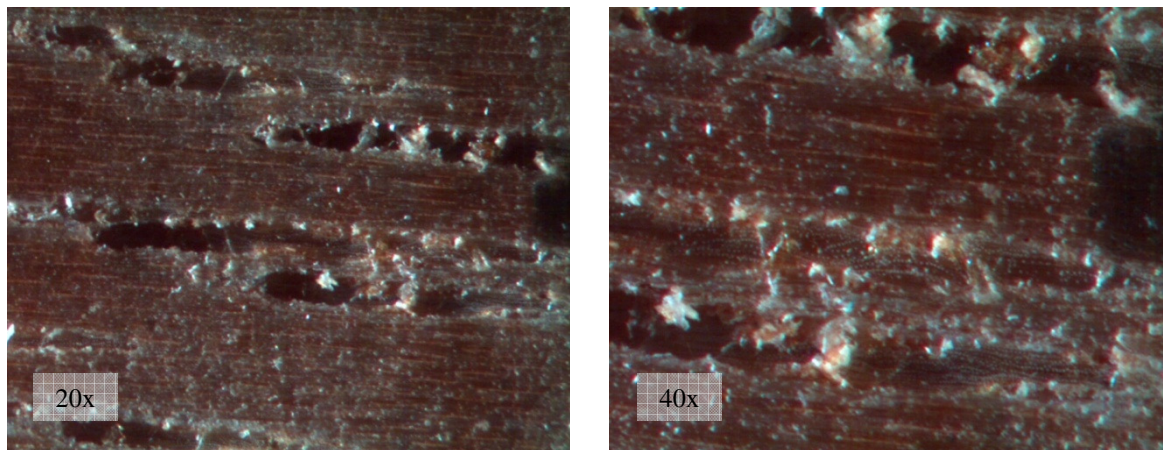


Figura 22– Imagens ampliadas das superfícies de *E. grandis* processadas com três velocidades de fresamento periférico

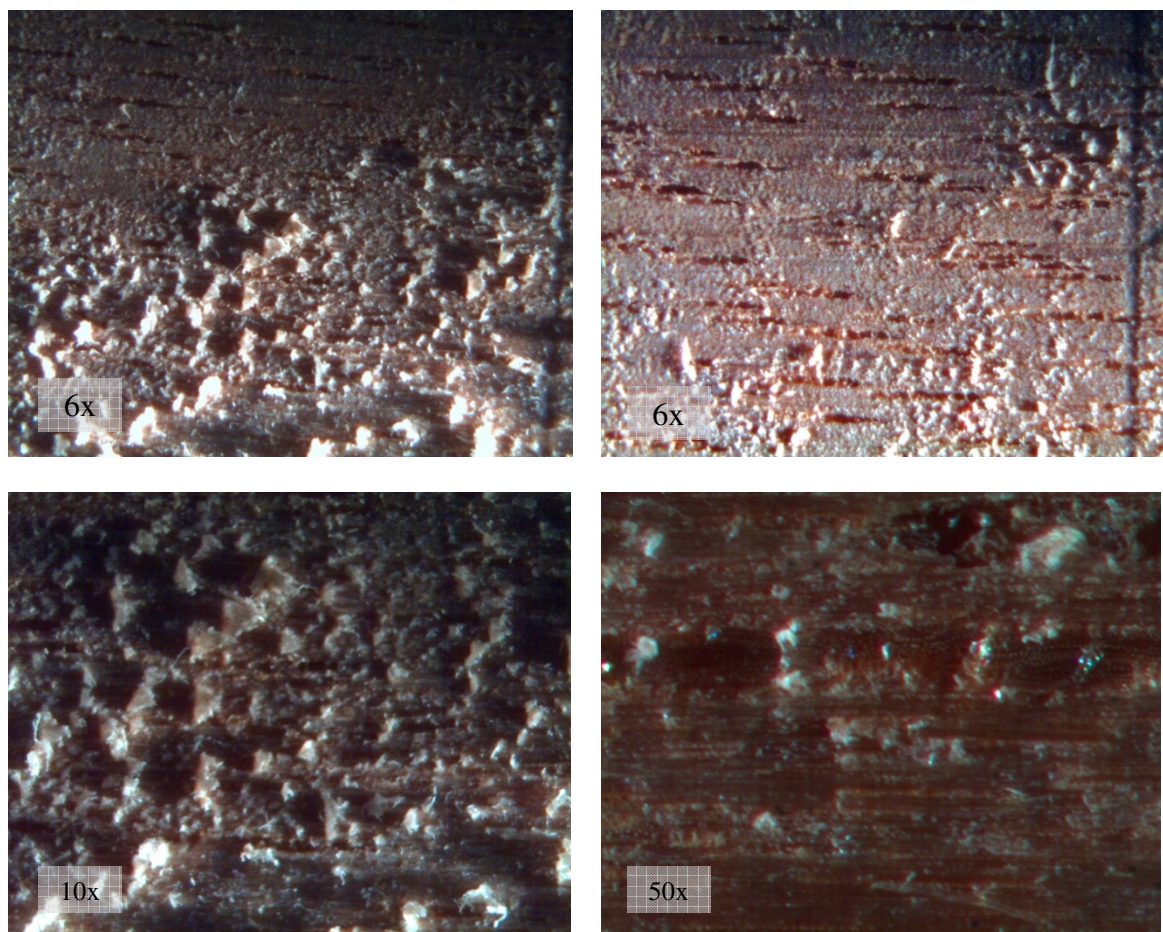


Figura 23– Imagens ampliadas de superfícies com defeitos de acabamento em corpos de prova de *E. grandis* usinadas por fresamento periférico

Ao efetuar as análises de variância para os parâmetros de rugosidade em cada um dos métodos de filtragem foram observadas diferenças significativas entre tratamentos avaliados. As comparações de médias efetuadas mediante o Teste de Tukey classificaram os acabamentos, em dois grupos. No primeiro grupo se encaixou o acabamento III com uma

rugosidade superior e no segundo grupo, com uma menor rugosidade, os acabamentos I e II. Esta classificação está mostrada na Figura 24 com letras maiúsculas seguida do índice indicativo do grupo de médias em comparação.

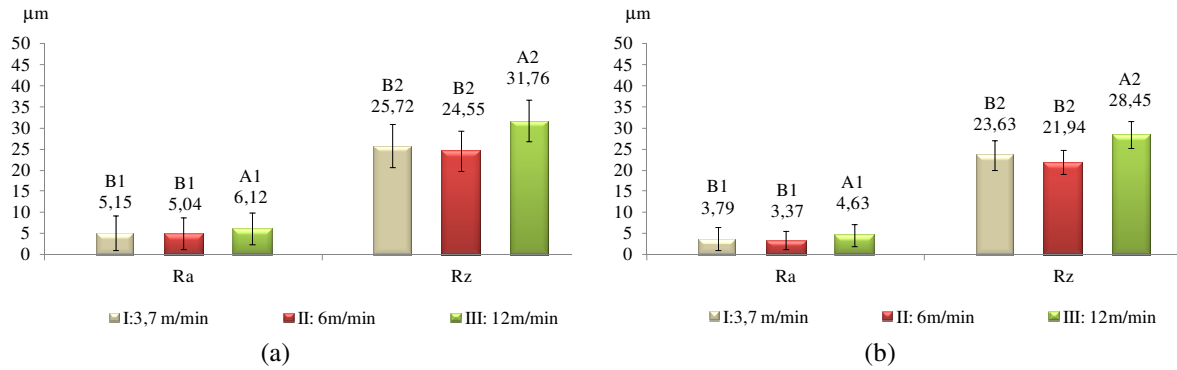


Figura 24– Parâmetros de Rugosidade para três tratamentos de fresamento periférico discordante, de acordo com os métodos de filtragem Gaussiano Robusto (a) e Gaussiano (b)

A massa específica não influenciou nos parâmetros de rugosidade  $R_a$  e  $R_z$ , de acordo com as regressões lineares mostradas na Figura 25.

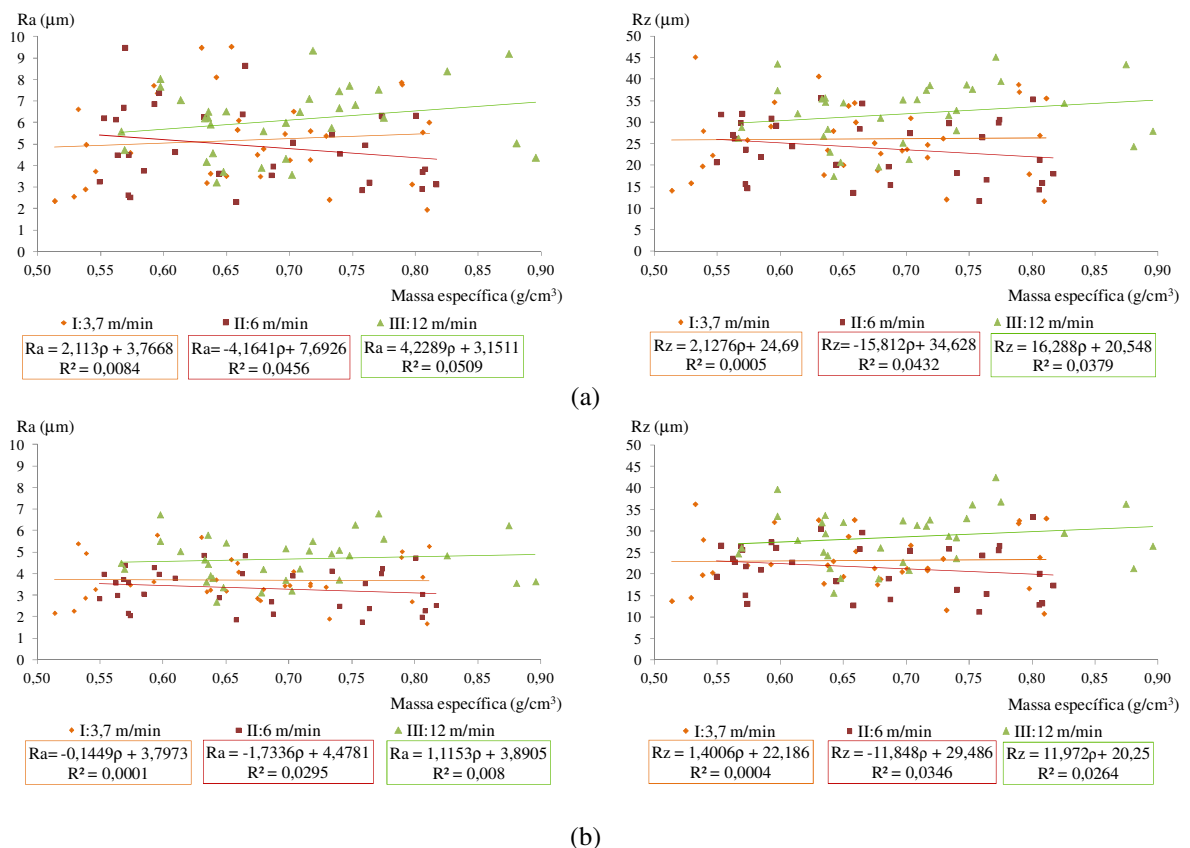


Figura 25– Correlações da rugosidade média ( $R_a$ ) e a média de picos e vales ( $R_z$ ) com a massa específica ( $\text{g/cm}^3$ ) dos corpos de prova submetidos a acabamento superficial por fresamento periférico discordante na filtragem Gaussiano Robusto (a) e Gaussiano (b)

Os parâmetros de rugosidade encontrados diferem dos valores citados na literatura para a espécie. Lopes (2007) relata valores de Ra entre 1,44 e 4,19 $\mu\text{m}$ , os quais apresentam uma tendência crescente com o incremento da velocidade de avanço no fresamento periférico e Iskra e Hernandez (2009) observaram que essa tendência encontra-se associada à orientação da grã. Varanda et al. (2010), determinaram um valor médio de rugosidade de 7,40 $\mu\text{m}$  para peças de *E. grandis* processadas por lixamento tubular. Valores superiores foram relatados por Martins (2011), para peças aplainadas da espécie *E. benthamii*, orientadas radialmente sendo 9,08 $\mu\text{m}$  e 60,16 $\mu\text{m}$  para Ra e Rz respectivamente.

A presença de vasos abertos observada nas superfícies usinadas pode ser considerada como um fator que influencia positivamente na colagem da espécie, Moura & Hernandez (2005), ao avaliar a qualidade das superfícies aplainadas madeira de *Acer saccharum*, observaram que as fendas correspondentes aos elementos vasculares abertos facilitaram a penetração do adesivo promovendo a ancoragem.

#### 4.1.2 Eficiência adesiva

A qualidade da colagem foi avaliada em função da eficiência adesiva, a qual foi calculada a partir da relação entre a resistência ao cisalhamento no plano de cola e a resistência ao cisalhamento da madeira maciça (eq.4).

Os tratamentos avaliados foram considerados satisfatórios, já que os valores médios da eficiência adesiva variaram entre 90,9 e 127,8%. Dos 18 tratamentos avaliados a maior eficiência foi exibida pelos corpos com acabamento de superfie I (3,7 m/min) com o adesivo Jowapur e a pressão de colagem 0,8 MPa.

Nas Figuras 26 e 27 estão apresentadas as eficiências adesivas e as frequências de falha na madeira para o Cascophen e Jowapur, analisados separadamente para níveis de pressão dentro dos níveis de acabamento. Não houve diferenças significativas ao nível de 5% entre os tratamentos avaliados para cada adesivo. A frequência da falha na madeira foi superior nos corpos de prova colados com o adesivo Jowapur e por esse motivo foi feita uma nova análise estatística planejada para permitir comparações entre adesivos.

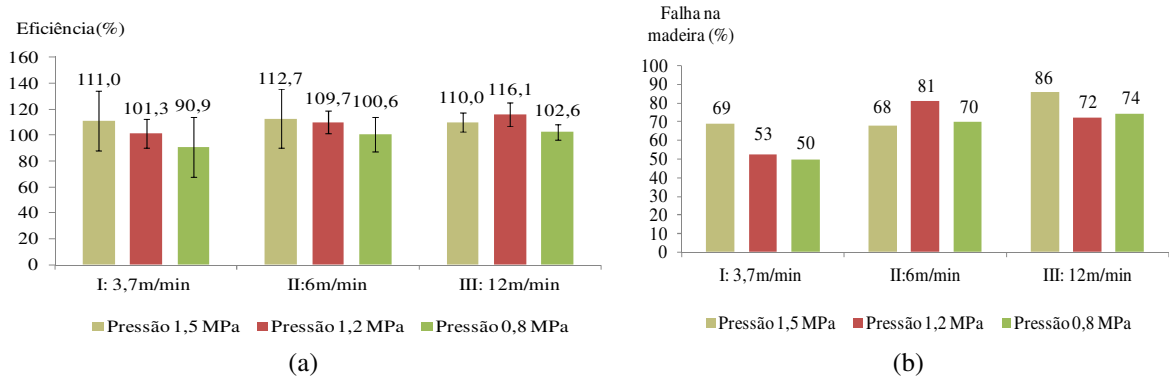


Figura 26 - Eficiência adesiva (a) e porcentagem de falha na madeira (b) dos corpos de prova colados com o adesivo Cascophen

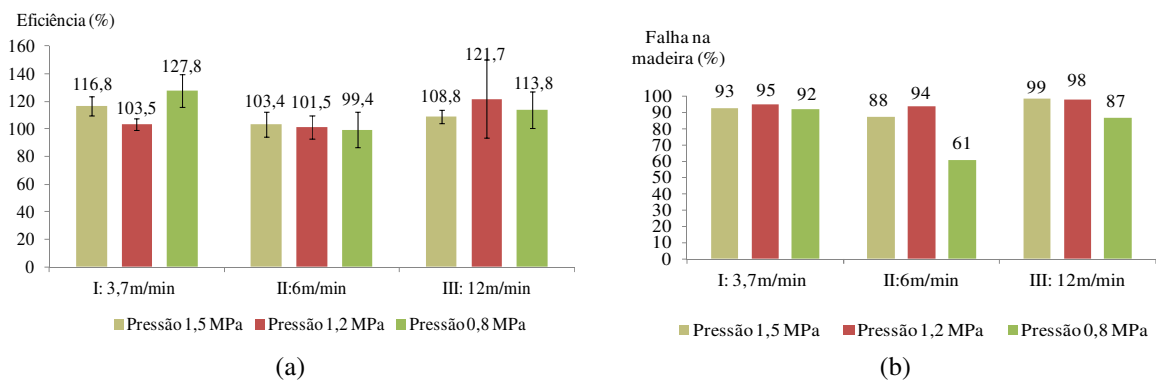
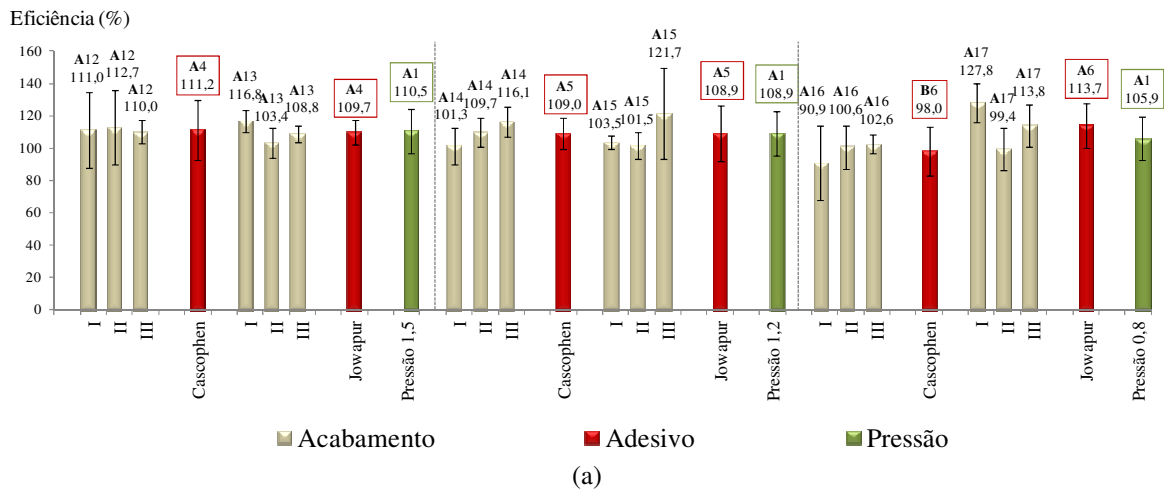


Figura 27 - Eficiência adesiva (a) e porcentagem de falha na madeira (b) dos corpos de prova colados com o adesivo Jowapur

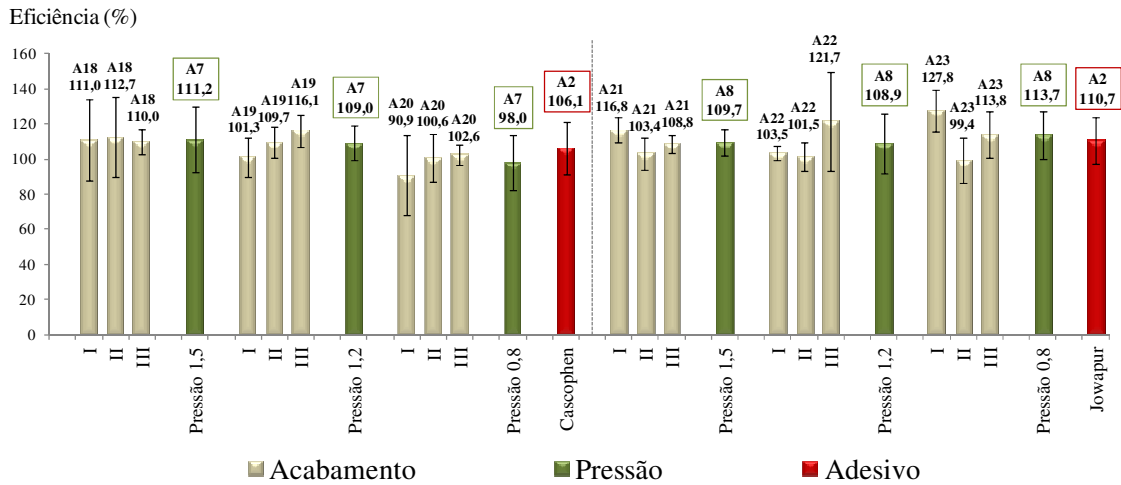
A análise estatística dos valores da eficiência adesiva permitiu verificar que não houve diferenças significativas ao nível de 5% entre os fatores avaliados Adesivo, Pressão de colagem e Acabamento de superfície. O comportamento dos diferentes fatores e a suas interações estão mostrados na Figura 28.

A interação tripla dos fatores (Pressão de colagem\*Adesivo\*Acabamento da superfície) não foi significativa e da mesma forma a interação dupla dos fatores (Pressão de colagem\*Acabamento da superfície). As interações duplas (Pressão de colagem\*Adesivo e Adesivo\*Acabamento da superfície) foram significativas. Na pressão de colagem de 0,8 MPa observou-se uma eficiência superior para o adesivo Jowapur (113,7%) ante 98% da eficiência dos corpos colados com Cascophen (Figura 28a). No acabamento de superfície I o adesivo Jowapur apresentou uma eficiência superior à apresentada pelo adesivo Cascophen 116,9% e 101,1% respectivamente (Figura 28c).

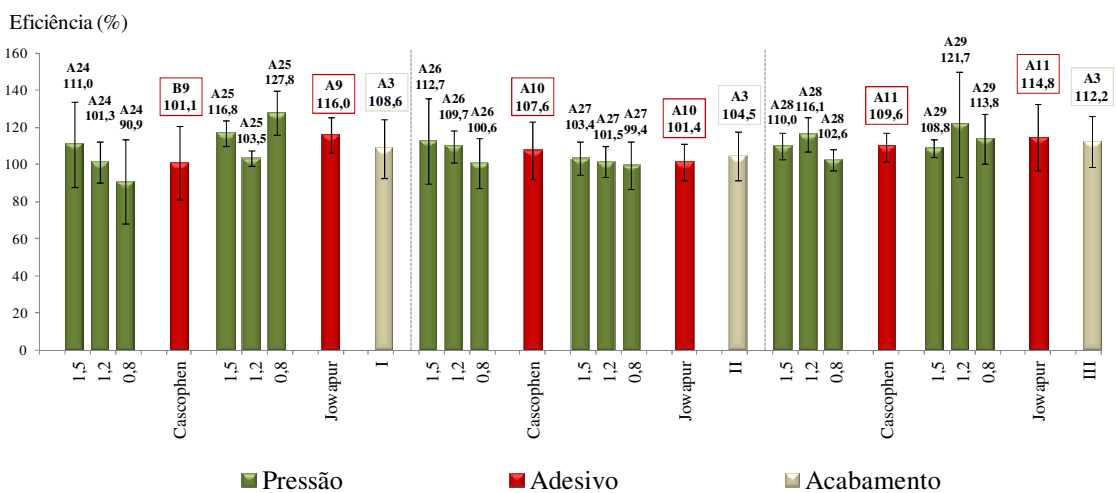




(a)



(b)



(c)

Figura 28– Eficiência adesiva ao cisalhamento paralelo às fibras no plano de cola de corpos de prova colados com os adesivos Cascophen e Jowapur

Considerou-se que a resistência ao cisalhamento obtida nos diferentes tratamentos foi afetada pela área real de cisalhamento, à penetração do adesivo e à resistência da madeira maciça. Na maioria dos casos o valor da resistência ao cisalhamento calculado não correspondeu à resistência ao cisalhamento real, porque a ruptura seguiu uma área ondulada que foi visivelmente maior do que a área de cisalhamento plana que é considerada no cálculo. Quando o rompimento ocorre fora do plano de cola o valor da resistência ao cisalhamento é superestimado.

Na Figura 29 ilustram-se os modos de falha presentes nos ensaios de cisalhamento, os quais foram avaliados em função da porcentagem da área total de cisalhamento correspondente ao rompimento na madeira maciça. Ditas porcentagens variaram entre 15 e 100% nos corpos colados com Cascophen e entre 25 e 100% nos corpos colados com Jowapur; sendo que neste último caso foi observada uma maior frequência de rompimento de 100% na madeira maciça. Observou-se que este tipo de ruptura não se encontra diretamente associado à eficiência adesiva como pode se inferir a partir de análises da Figura 30.



(a)



(b)

Figura 29 – Tipos de falha observados nos ensaios de cisalhamento no plano de cola paralelo às fibras de juntas coladas com Cascophen (a) e Jowapur (b)

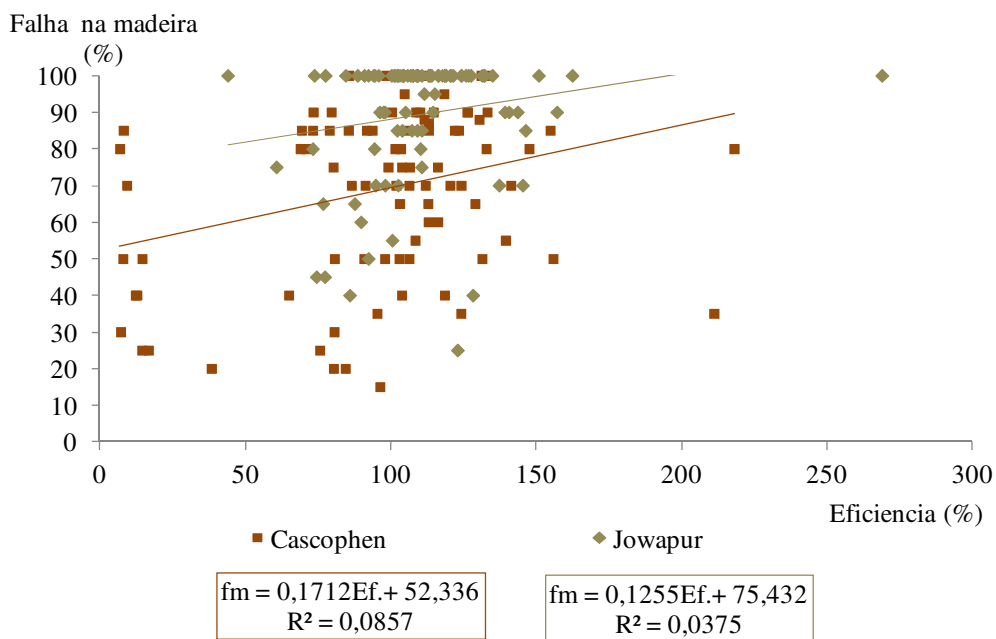


Figura 30 – Correlações da eficiência da colagem com a porcentagem de falha na madeira de corpos de prova de *E. grandis*

O rompimento dos corpos de prova ocorreu com maior frequência na madeira, fora da área de interação adesivo madeira, o que permite concluir que a resistência desta zona é superior à resistência da madeira maciça.

Observou-se uma correlação média inversa entre a porcentagem de falha na madeira e a massa específica nos corpos colados com Cascophen (Figura 31).

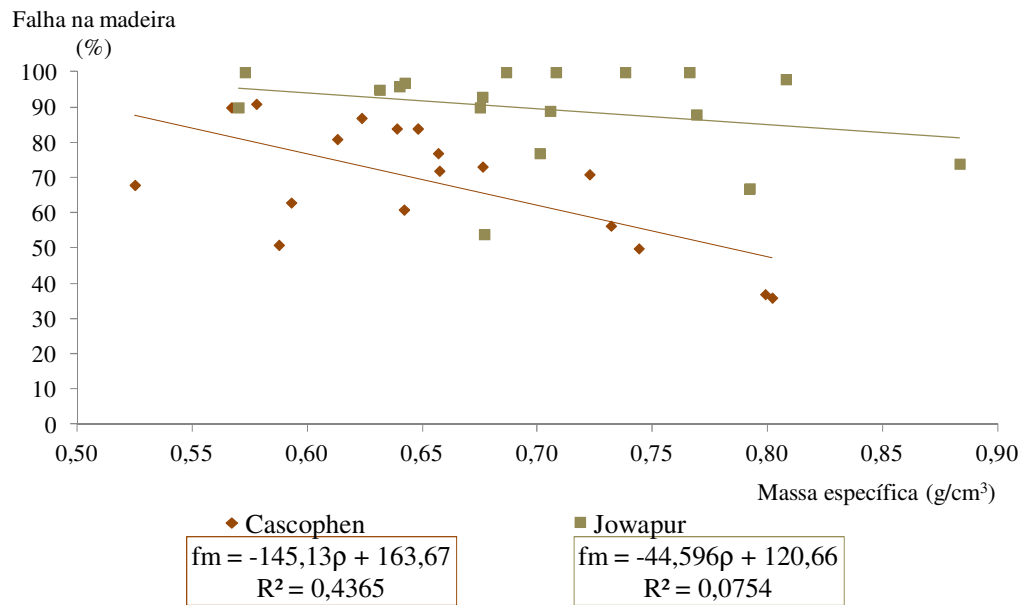


Figura 31 – Correlações da falha na madeira com a massa específica nos corpos de prova de *E. grandis* colados

Na Figura 32 foi observado que existiu uma fraca correlação inversa entre a massa específica e a eficiência adesiva, no entanto apresentou-se uma tendência de redução da eficiência com o aumento da massa específica.

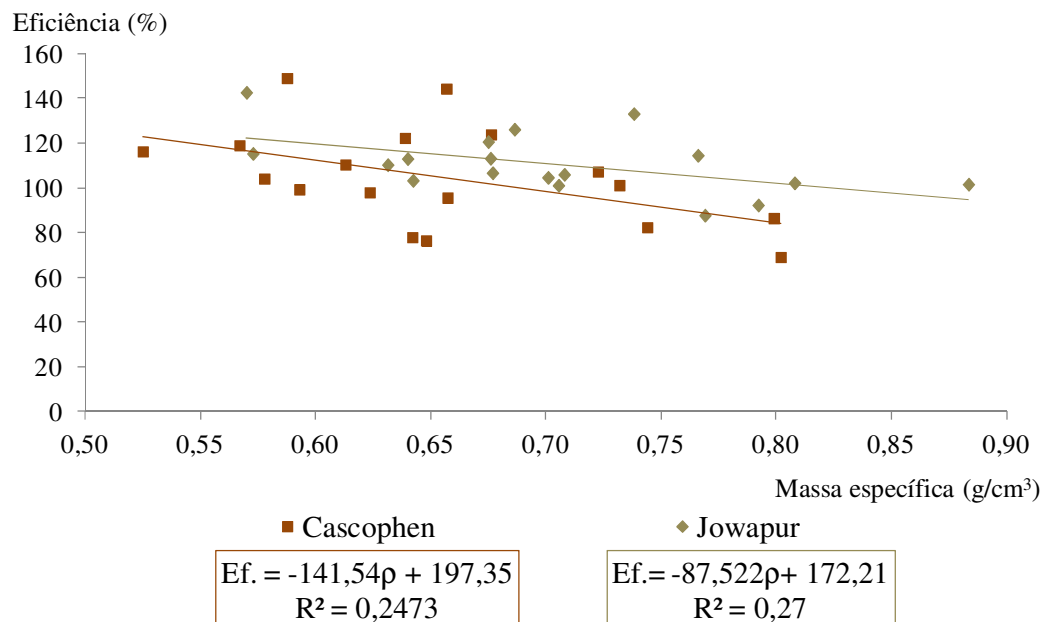


Figura 32 – Correlações da eficiência adesiva com a massa específica de *E. grandis* colados

Segundo River et al. (1991) e Frihart, (2005) a massa específica da madeira deve ser considerada como um fator importante que influencia na capacidade de o adesivo molhar, fluir e penetrar e que maior massa específica pode significar menor capacidade de adesão. Madeiras de alta massa específica são difíceis de serem ligadas por adesivos já que as paredes celulares são mais grossas e com lume menor, o que limita a penetração do adesivo a uma ou

duas células de profundidade reduzindo a interligação mecânica, resultando numa linha de cola deficiente. Plaster et al. (2008), ao trabalharem com madeira de *Eucalyptus sp.* com densidades entre 0,70 e 0,99 g/cm<sup>3</sup>, colada com Cascophen obtiveram valores médios de eficiência entre 85 e 123% , similares às obtidas neste estudo. Os autores identificaram uma menor resistência ao cisalhamento no plano de cola na madeira com maior densidade (0,90 a 0,99 g/cm<sup>3</sup>), fato atribuído à menor permeabilidade e a maior rigidez, o que dificulta a penetração do adesivo e a acomodação da madeira sob a carga aplicada, limitando o contacto necessário entre as peças.

A resistência ao cisalhamento das juntas coladas de *E. grandis* com o adesivo Cascophen obtida nos diferentes tratamentos avaliados neste estudo foi notavelmente superior às resistências relatadas por Vital et al. (2006) e Albino et al. (2012).

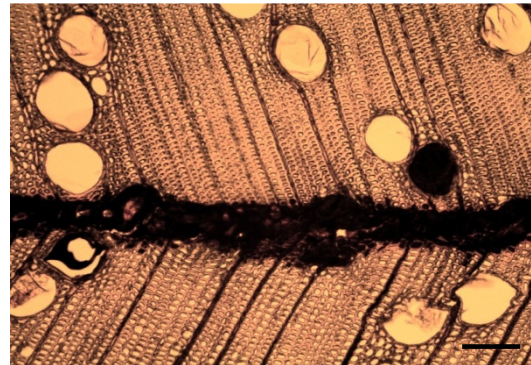
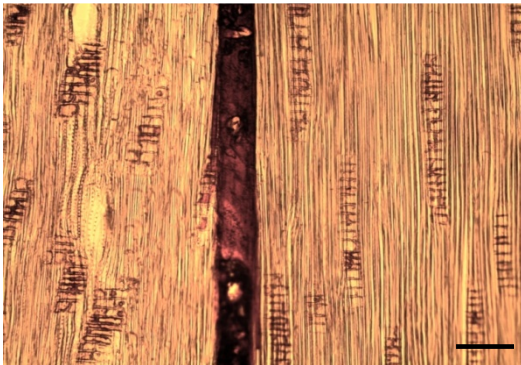
Vital et al. reportaram uma resistência média ao cisalhamento de 8,058 MPa em juntas coladas empregando o adesivo numa dosagem de 300g/m<sup>2</sup>, com uma pressão de colagem de 1 MPa, aplicada durante 8 horas; variáveis da colagem que podem ser considerados iguais às adotadas neste estudo. Empregando o valor médio da resistência ao cisalhamento da madeira maciça (14,7 MPa) relatado pelos autores, calculou-se uma eficiência adesiva de 54,63%, o que permitiu verificar a superioridade das eficiências obtidas no presente estudo. Albino et al. apresentaram valores de resistência ao cisalhamento entre 3,81 e 5,73 MPa, considerados especialmente baixos ao comparar-se com os normalmente reportados para a espécie. Os autores não relatam a resistência ao cisalhamento da madeira maciça o que impediu o cálculo de uma outra eficiência adesiva para comparação.

Lobão e Gomes (2006) avaliaram a adesão em corpos de prova de diferentes densidades e orientações de fibras. Os corpos de prova colados na direção paralela às fibras com baixa densidade (0,533g/cm<sup>3</sup>) apresentaram a eficiência 90,8% enquanto a eficiência obtida nos corpos de prova com maior densidade (0,809g/cm<sup>3</sup>) foi de 79,5%.

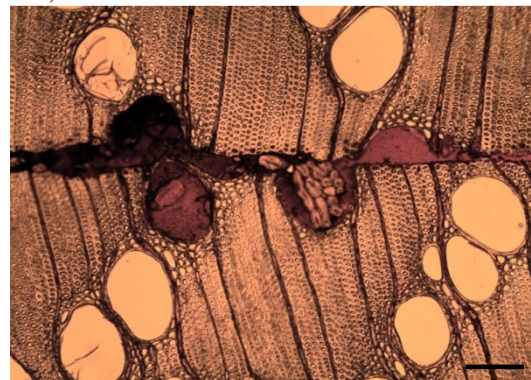
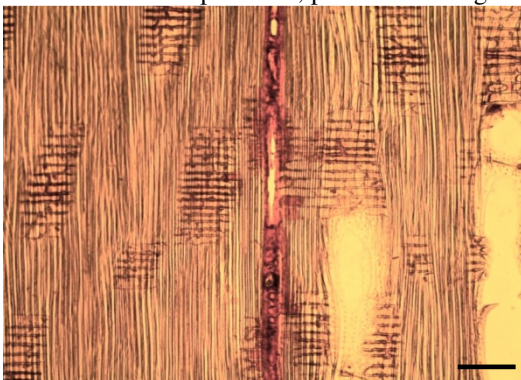
A resistência ao cisalhamento das juntas coladas com o adesivo à base de poliuretano (Jowapur) obtida no estudo apresentou valores entre 10,45 e 15,24 MPa, similares aos relatados por Martins et al. (2012), que avaliaram a colagem da madeira de *E. benthamii* com adesivo à base de poliuretano na produção de painéis colados lateralmente. A resistência foi afetada positivamente pelo aumento da pressão de colagem de 0,7 para 1 MPa, assim como pelo processo de acabamento da superfície, sendo superior a colagem das superfícies lixadas comparada com a das superfícies plainadas. Os tratamentos avaliados exibiram resistências entre 9,8 e 12,7 MPa.

### 4.1.3 Avaliação qualitativa da linha de cola

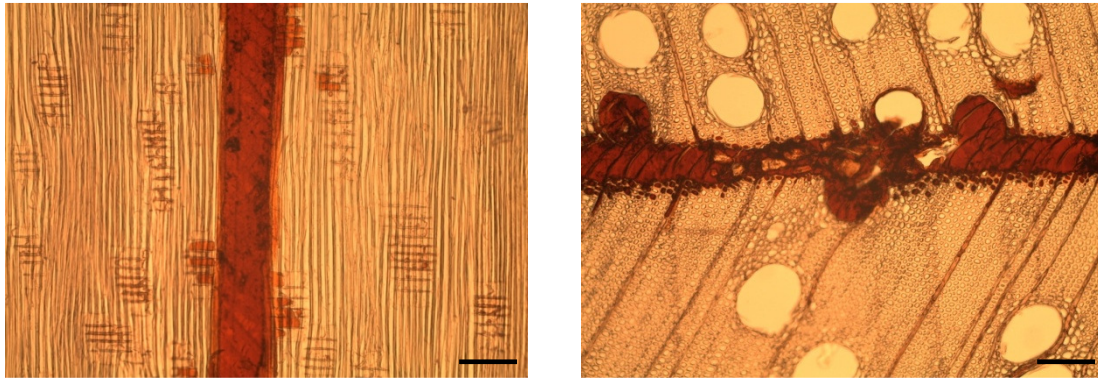
As imagens microscópicas dos planos transversal e longitudinal da interface adesivo-madeira nos diferentes tratamentos avaliados permitiram observar a espessura e a uniformidade da linha de cola. No caso dos corpos de prova colados com Cascophen (Figura 33) ficou visível a penetração do adesivo nos elementos vasculares, nas fibras e nos raios; no entanto essa visualização nos corpos colados com Jowapur foi limitada pela coloração do adesivo sendo possível identificar a linha de cola, mas não a penetração do adesivo nas diferentes estruturas da madeira (Figura 34). Ao se verificar essa limitação optou-se por empregar o teste de raio-X, no qual foram obtidas imagens dos corpos de prova nos planos transversal e longitudinal, delimitando a zona de colagem e efetuando mediação em diferentes pontos ao longo da linha de cola.



Acabamento de superfície I, pressão de colagem 0,8 MPa;

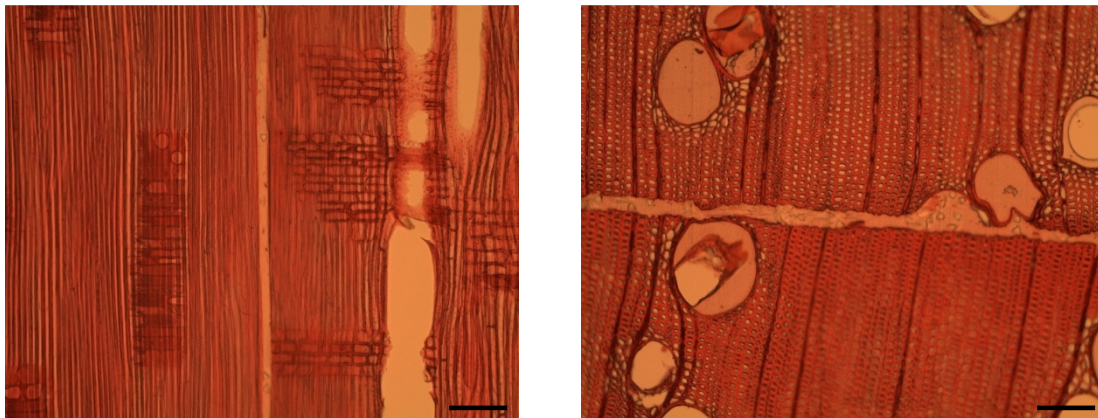


Acabamento de superfície II, pressão de colagem 1,2 MPa

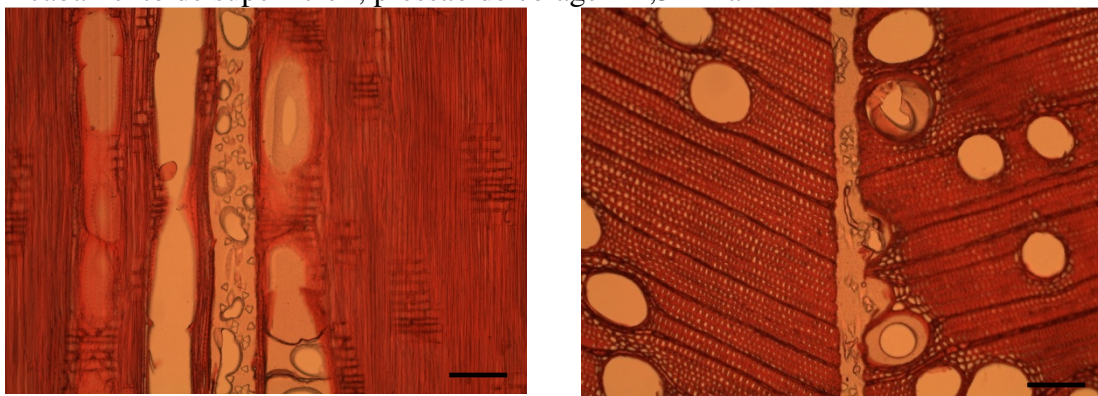


Acabamento de superfície III, pressão de colagem 0,8 MPa

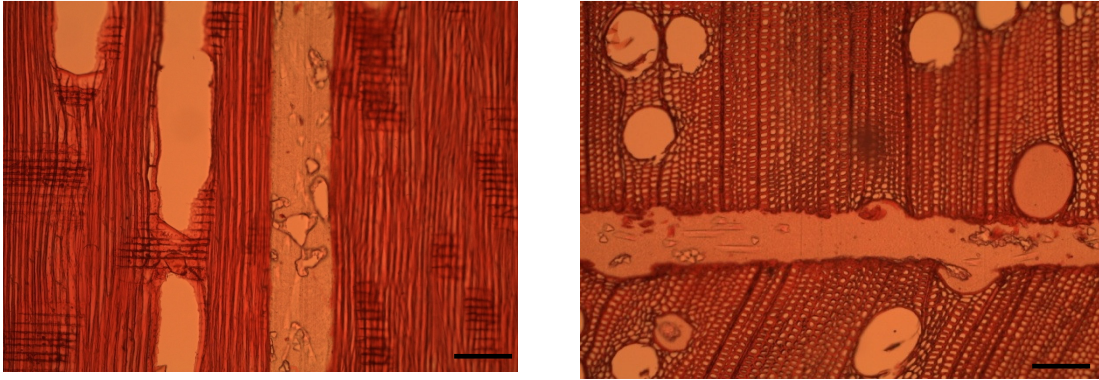
Figura 33- Fotomicrografias da interface madeira-adesivo nos planos longitudinal e transversal da madeira de *E. grandis* colada com Cascophen. Escala de barra \_\_\_ 100  $\mu\text{m}$



Acabamento de superfície I, pressão de colagem 1,5 MPa



Acabamento de superfície II, pressão de colagem 1,2 MPa

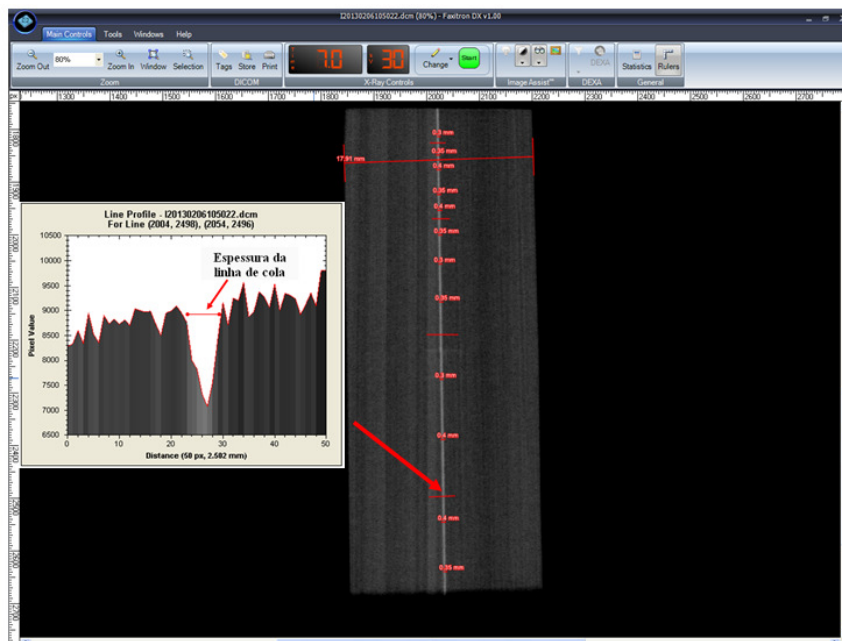


Acabamento de superfície III, pressão de colagem 1,2 MPa

Figura 34- Fotomicrografias da interface madeira-adesivo nos planos longitudinal e transversal da madeira de *E. grandis* colada com Jowapur. Escala de barra \_\_\_\_ 100  $\mu$ m

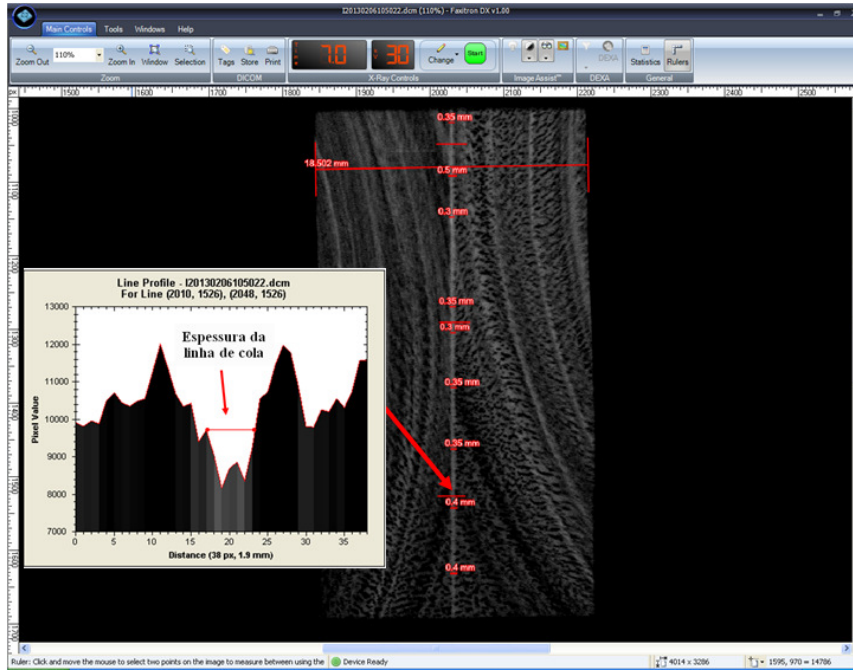
Nas Figuras 35 e 36 observou-se a zona da linha de cola, o perfil de densidade no qual foi possível medir a espessura da linha de cola, assim como a distribuição das medições efetuadas ao longo da mesma, em cada um dos planos. A zona da linha de cola é identificada pela sua tonalidade mais clara devido à maior densidade que limita a penetração dos raios X.

A espessura da linha de cola corresponde ao adesivo e à interface madeira-adesivo compreendida entre os elos 6 e 7 de acordo com o modelo Marra, exibido na Figura 1.



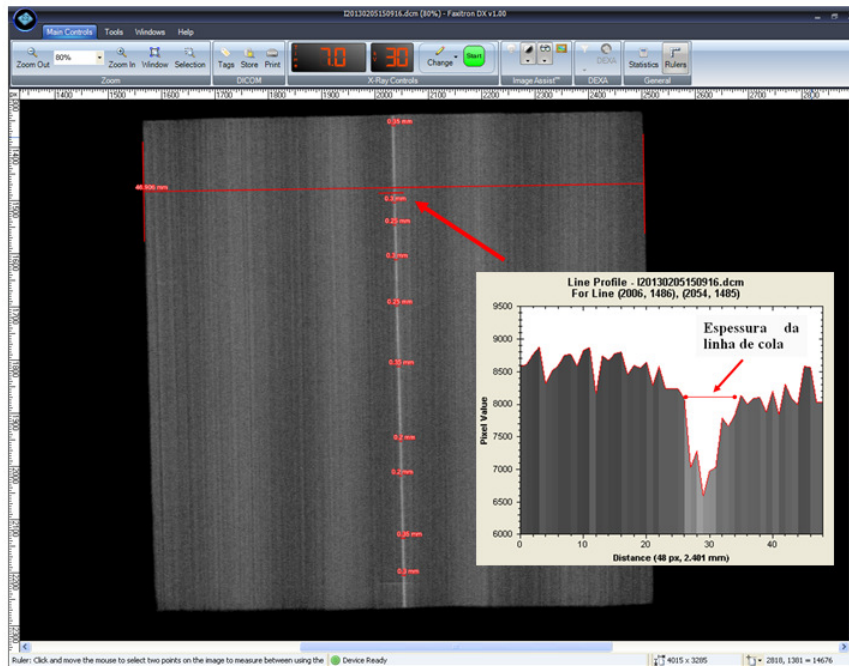
(a)



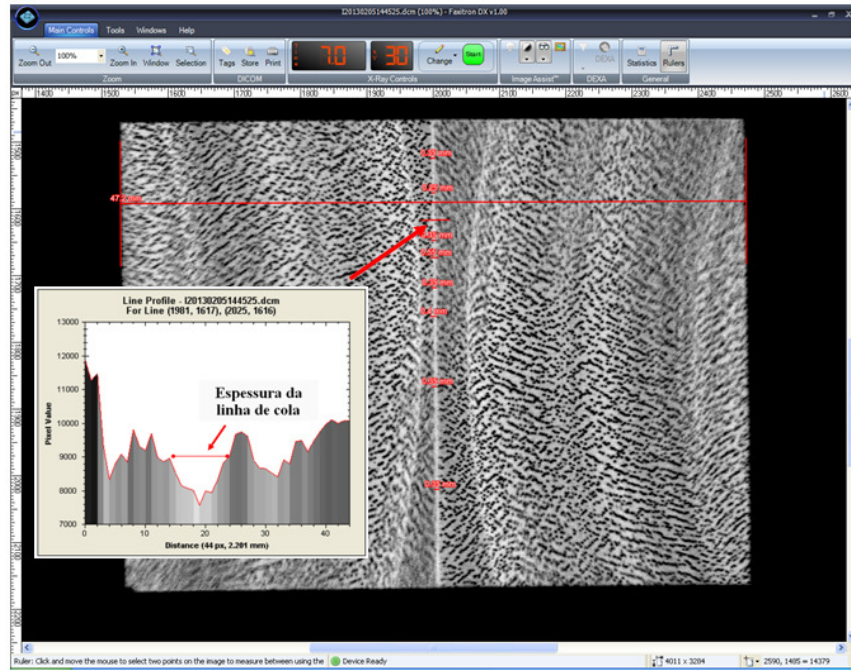


(b)

Figura 35 - Imagens de raio-X no planos longitudinal (a) e transversal (b) da madeira de *E. grandis* colada com o adesivo Cascophen



(a)



(b)

Figura 36 - Imagens de raio-X no planos longitudinal (a) e transversal (b) da madeira de *E. grandis* colada com o adesivo Jowapur.

A espessura média de linha de cola dos corpos de prova colados com Cascophen foi ligeiramente maior do que a espessura da linha de cola dos corpos colados com Jowapur (Figura 37). Efetuando-se regressões linear entre a espessura da linha de cola e as variáveis massa específica, resistência ao cisalhamento, eficiência adesiva e porcentagem de falha na madeira observou-se somente correlações muito fracas (Figura 38 e 39).

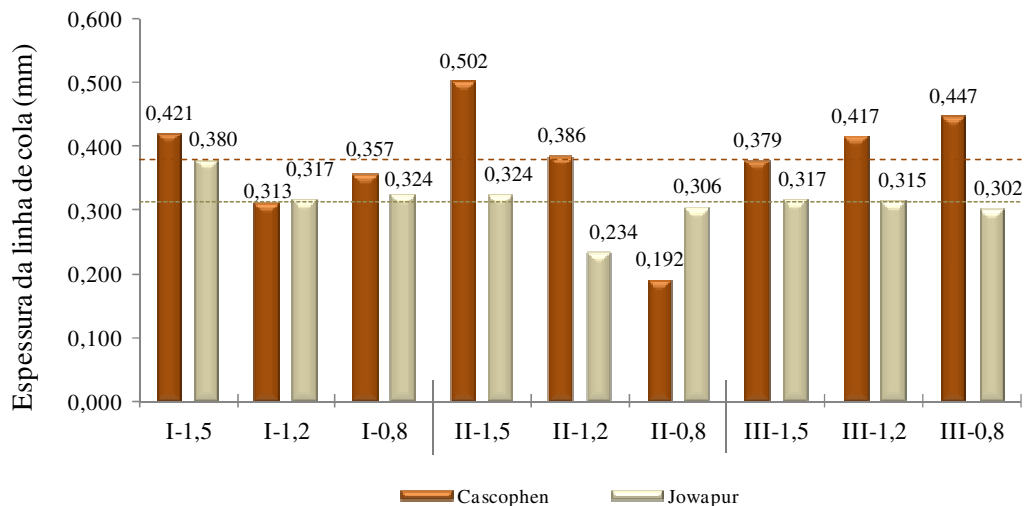


Figura 37 – Valores médios da espessura da linha de cola em madeira de *E. grandis* colada

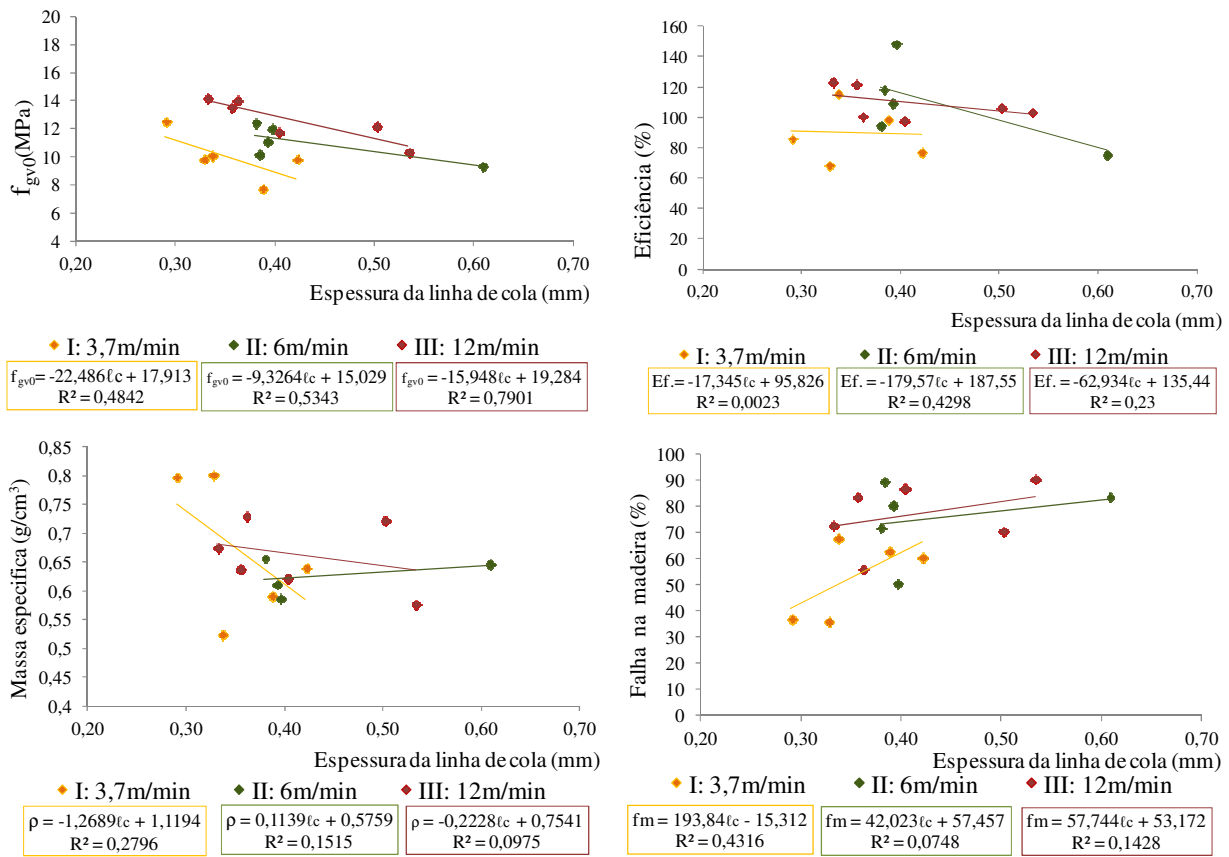
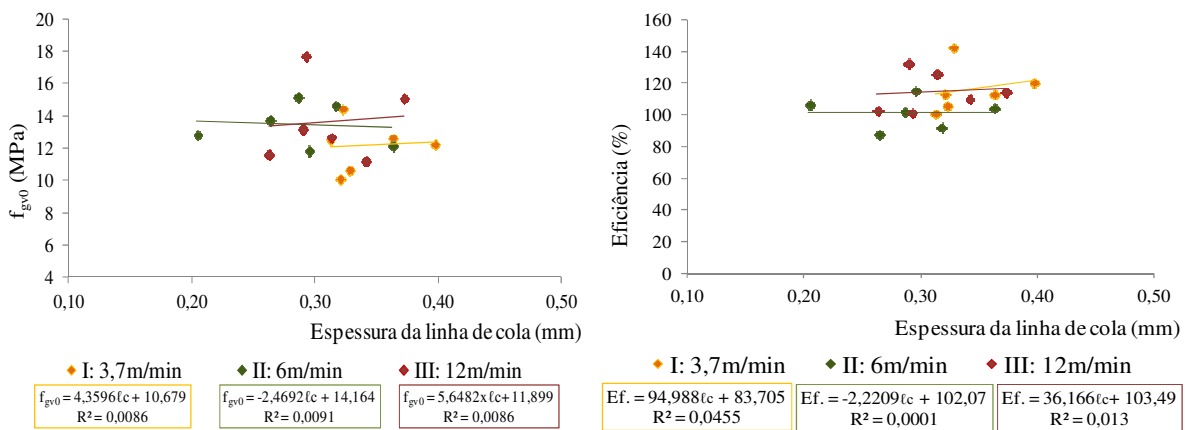


Figura 38 – Correlação entre a espessura da linha de cola e a resistência ao cisalhamento ( $f_{gv0}$ ), eficiência adesiva, massa específica e porcentagem de falha na madeira em corpos de prova colados com Cascophen



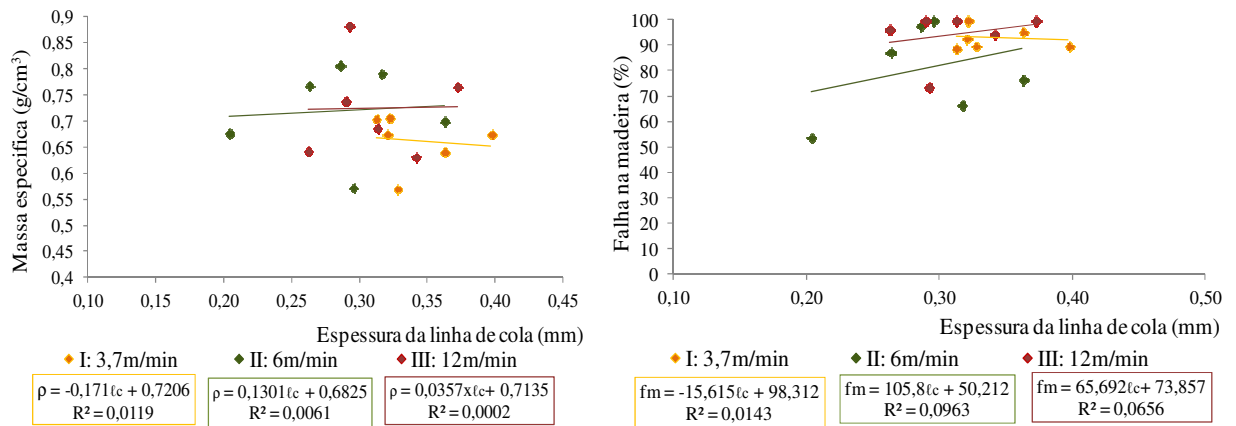


Figura 39 – Correlação entre a espessura da linha de cola e a resistência ao cisalhamento ( $f_{gv0}$ ), eficiência adesiva massa específica e porcentagem de falha na madeira em corpos de prova colados com Jowapur

Albino et al. (2012) relatam espessuras da linha de cola das juntas coladas com o adesivo Cascophen entre 109 e 164  $\mu\text{m}$  variando de acordo com a posição radial e longitudinal da madeira de *E. grandis* colada. A Figura 40 permite observar o esquema de mensuração adotado pelos autores a partir de fotomicrografias nos planos transversal e longitudinal. Os valores de espessura correspondem à denominada linha principal; enquanto os valores de espessura da linha de cola mensurados no presente estudo correspondem à soma da linha de cola principal com a linha de cola estendida o que explica a diferença nos valores registrados.

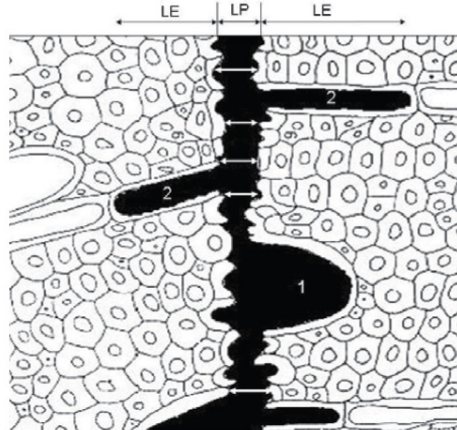


Figura 40 - Espessura da linha de cola adotado por Albino et al. (2012). LP: linha de cola principal; LE: linha de cola estendida; 1: vaso preenchido com adesivo; 2: raios preenchidos com adesivo. As setas indicam onde foi mensurada a espessura da linha de cola

#### 4.1.4 Avaliação do tamanho e forma dos corpos de prova para resistência ao cisalhamento

Ao analisar a influência das formas e as dimensões dos corpos de prova estabelecidos pelas Normas ASTM D-905-08 e NBR 7190/97 na resistência ao cisalhamento e nas

respectivas eficiências, encontrou-se que não existiram diferenças significativas ao nível do 5% de probabilidade e, portanto, as geometrias com dimensões específicas de cada norma são satisfatórias para o ensaio de cisalhamento no plano de cola (Figura 41).

Salienta-se que a maior área de cisalhamento dos corpos da Norma NBR 7190/97, promove esmagamento na base dos corpos de prova, e que isso pode interferir no valor real da resistência ao cisalhamento. Na Figura 42 observam-se em vermelho as zonas com alta concentração de tensões; a partir da simulação do cisalhamento paralelo às fibras pelo método de elementos finitos.

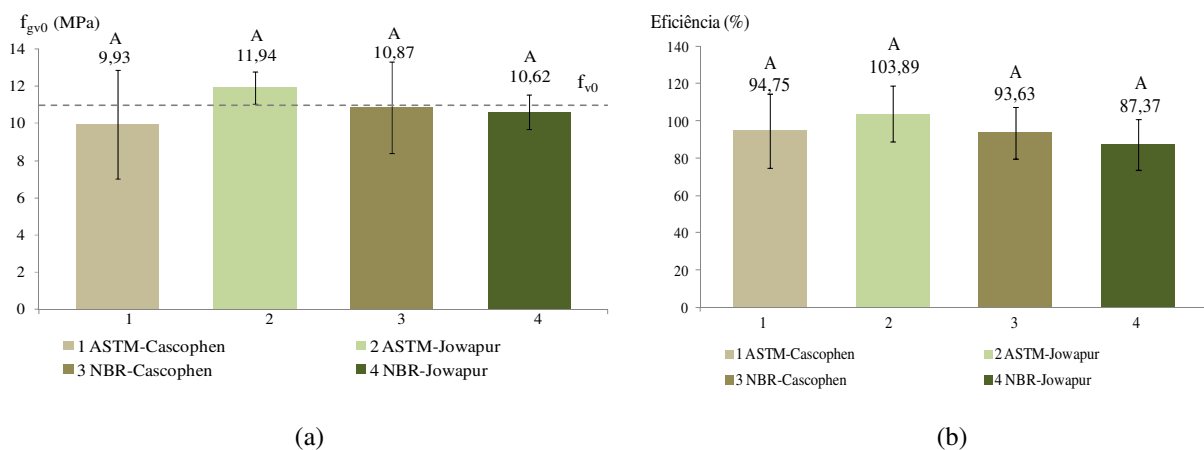


Figura 41- Resistência ao cisalhamento no plano de cola ( $f_{gv0}$ ) (a) e eficiência adesiva (b) em corpos de prova com forma e dimensões de acordo com as Normas ASTM D-905-08 e NBR 7190/97

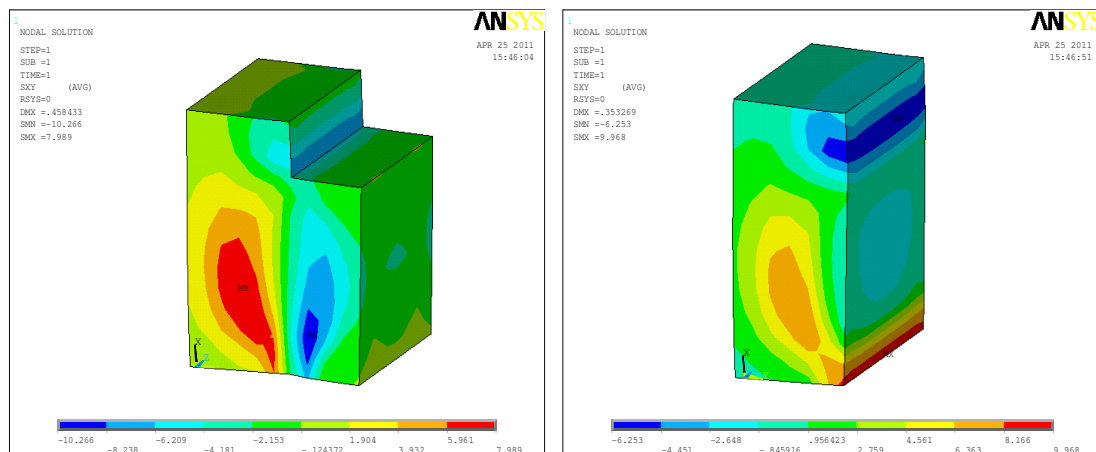


Figura 42- Tensões de cisalhamento paralela às fibras simuladas pelo método de elementos finitos, no corpo de prova da Norma NBR 7190/97 e distribuição de tensões no interior do corpo de prova no plano de ruptura

Serrano (2004) concluiu que as imperfeições geométricas apresentadas nos corpos de prova da Norma ASTM D-905-08 originam um atrito que afeta a determinação do valor da resistência ao cisalhamento. O autor observou que a distribuição das tensões na junta colada tende a ser mais uniforme com a diminuição da área cisalhada, facilitando a determinação da verdadeira resistência ao cisalhamento.

#### 4.1.5 Degradação da linha de cola

A alternância dos ciclos de umidade e secagem da madeira colada ocasionaram defeitos associados à variação dimensional como fissuras e distorções de forma (Figura 43). O inchamento e a retração das partes que conformavam o corpo de prova colado gerou uma concentração de tensões internas afetando o funcionamento do plano de cola, reduzindo sua resistência ao cisalhamento. Considerou-se que os adesivos avaliados tiveram um comportamento ligeiramente flexível ou deformável, o que fez com que a perda da resistência não fosse tão grande quanto a apresentada por adesivos rígidos.

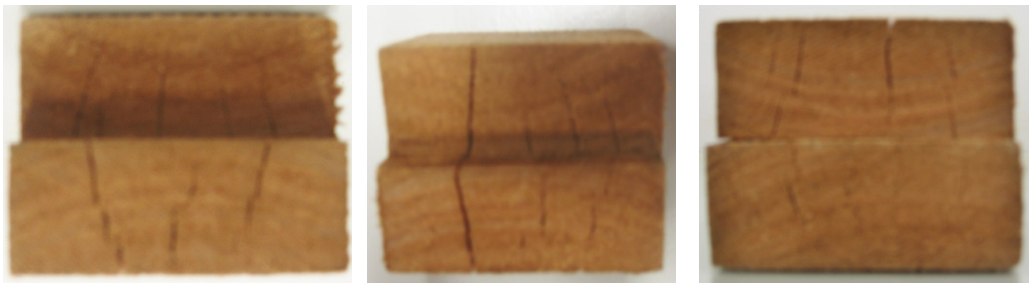


Figura 43– Corpos de prova colados, depois do tratamento de envelhecimento acelerado

Na Figura 44 apresentam-se os valores médios da resistência ao cisalhamento nos corpos de prova de controle e os submetidos a tratamento de envelhecimento, a linha tracejada indica o valor médio de resistência ao cisalhamento da madeira maciça de *E. grandis*.

Com o tratamento de envelhecimento houve diminuição da resistência ao cisalhamento no plano de cola de 34,16% nos corpos de prova colados com Cascophen e de 29,71% nos corpos colados com Jowapur. Valores similares foram obtidos por Alamsyah et al. (2007), ao avaliar a degradação da linha de cola em madeira laminada colada com o adesivo resorcinol-formaldeído e submetida ao mesmo tratamento de envelhecimento acelerado aplicado neste estudo, o qual identificou uma redução da resistência ao cisalhamento entre 28 e 46% de acordo com a espécie avaliada.

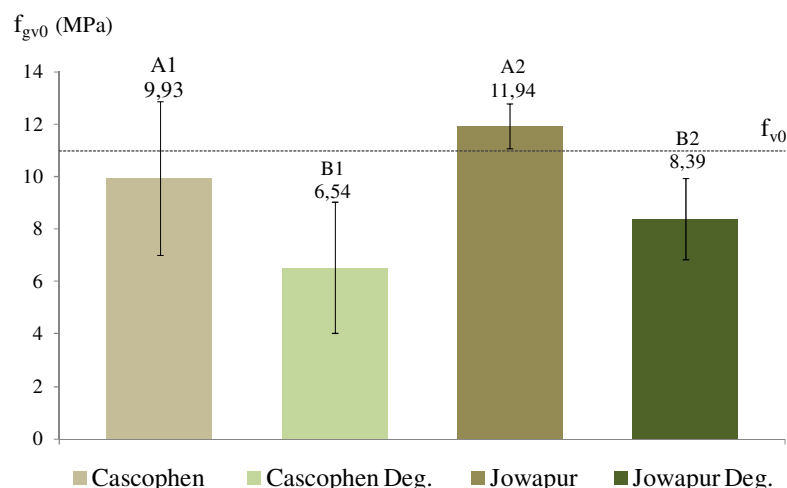


Figura 44– Resistência ao cisalhamento ( $f_{gv0}$ ) no plano de cola de corpos de prova submetidos ao envelhecimento acelerado

Uysal & Özçifçi (2005), ao avaliarem o comportamento de juntas coladas com adesivo à base de poliuretano em ensaios de resistência à água, observaram uma maior redução da resistência da linha de cola na madeira de maior densidade, o que é atribuído à falha dos mecanismos de ligação pela baixa interação física e química entre a superfície da madeira e o adesivo e agravada pela presença de extrativos e pelo maior inchamento associado à maior densidade.

#### 4.1.6 Influência do tempo de espera entre o acabamento da superfície e a efetiva colagem

Para avaliar a influência do tempo de espera entre a usinagem das superfícies e o processo de colagem, foram analisados três tempos de armazenamento do material 24, 48 e 360 horas. A análise mostrou que existiram diferenças significativas ao nível do 5% de probabilidade (Figuras 45).

Houve uma marcada diferença entre os corpos colados 360 horas após o processo de acabamento da superfície. Pôde-se inferir que as superfícies sofreram um processo de inativação que reduziu a capacidade do adesivo de molhar, fluir e penetrar adequadamente, fatores esses importantes para gerar juntas adesivas fortes. Isso mostra a importância de manter um tempo reduzido entre o processo de usinagem das superfícies e a colagem para a fabricação de madeira laminada.

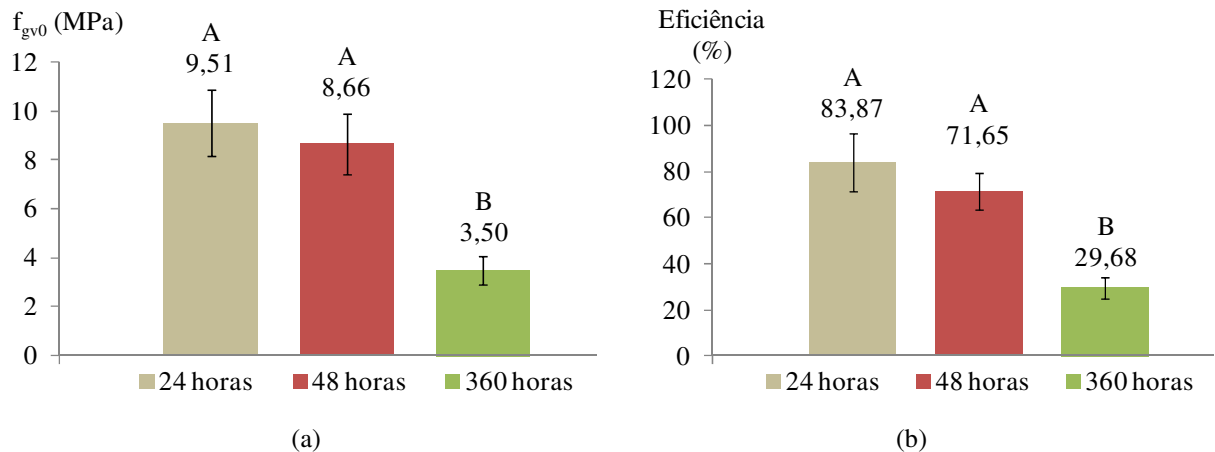


Figura 45- Resistência ao cisalhamento ( $f_{gv0}$ ) (a) e eficiência adesiva (b) em corpos de prova colados com o adesivo Jowapur

## 4.2 Ensaio de Flexão

### 4.2.1 Correlação entre a resistência ao cisalhamento no plano de cola e a resistência à flexão

As Figuras 46 e 47 mostram o detalhe do rompimento na flexão estática a três pontos das Vigas Laminadas Coladas e das vigas não solidarizadas, com os valores de módulo de elasticidade ( $E_{m0}$ ) calculados utilizando pelo método do coeficiente angular e os valores da resistência à flexão ( $f_M$ ) obtidos nos ensaios estáticos não destrutivos e destrutivos.

Nas vigas laminadas coladas estão mostrados adicionalmente os módulos de elasticidade dinâmico, determinados a partir dos ensaios de vibração transversal com o uso do sistema BING.



*Viga Laminada Colada 1*  
 -  $E_{m0}$  dinâmico: 19032 MPa  
 -  $E_{m0}$  estático: 17719,00 MPa  
 -  $f_M$ : 113,71 MPa



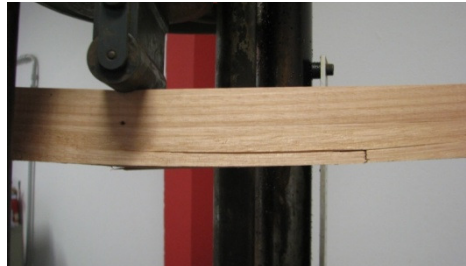
*Viga Laminada Colada 2*  
 -  $E_{m0}$  dinâmico: 17035 MPa  
 -  $E_{m0}$  estático: 15809,33 MPa  
 -  $f_M$ : 96,67 MPa





*Viga Laminada Colada 3*

- $E_{m0}$  dinâmico: 17197 MPa  
 - $E_{m0}$  estático: 16242,11 MPa  
 - $f_M$ : 100,97 MPa



*Viga Laminada Colada 4*

- $E_{m0}$  dinâmico: 17040 MPa  
 - $E_{m0}$  estático: 15558,05 MPa  
 - $f_M$ : 94,97 MPa



*Viga Laminada Colada 5*

- $E_{m0}$  dinâmico: 16909 MPa  
 - $E_{m0}$  estático: 15685,85 MPa  
 - $f_M$ : 98,61 MPa



*Viga Laminada Colada 6*

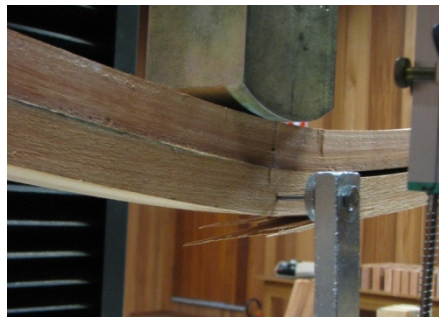
- $E_{m0}$  dinâmico: 15526 MPa  
 - $E_{m0}$  estático: 14848,98 MPa  
 - $f_M$ : 101,23 MPa

Figura 46 – Detalhe da ruptura de vigas laminadas coladas em ensaios de flexão estática a três pontos



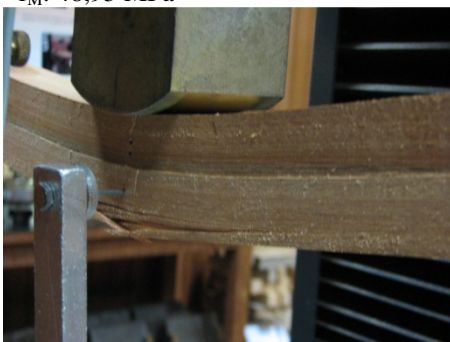
*Viga não solidarizada 1*

- $E_{m0}$  estático não destrutivo: 18901,64 MPa  
 - $E_{m0}$  estático: 18220,78 MPa  
 - $f_M$ : 48,93 MPa



*Viga não solidarizada 2*

- $E_{m0}$  estático não destrutivo: 20895,70 MPa  
 - $E_{m0}$  estático: 20396,95 MPa  
 - $f_M$ : 52,15 MPa



*Viga não solidarizada 3*

- $E_{m0}$  estático não destrutivo: 19710,47 MPa  
 - $E_{m0}$  estático: 19425,02 MPa  
 - $f_M$ : 52,54 MPa



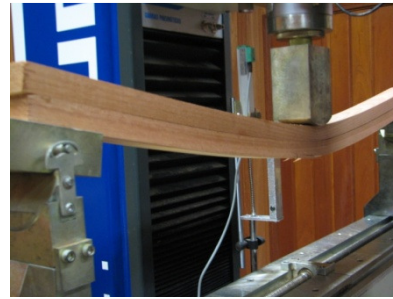
*Viga não solidarizada 4*

- $E_{m0}$  estático não destrutivo: 19880,35 MPa  
 - $E_{m0}$  estático: 19713,15 MPa  
 - $f_M$ : 49,58 MPa



Viga não solidarizada 5

- $E_{m0}$  estático não destrutivo: 19653,52 MPa  
 - $E_{m0}$  estático: 20077,67 MPa  
 - $f_M$ : 39,39 MPa



Viga não solidarizada 6

- $E_{m0}$  estático não destrutivo: 20639,84 MPa  
 - $E_{m0}$  estático: 19323,82 MPa  
 - $f_M$ : 57,76 MPa

Figura 47 – Detalhes da ruptura de vigas não solidarizadas em ensaio de flexão estática a três pontos

#### 4.2.2 Módulo de elasticidade à flexão

A Figura 48 apresenta os valores médios do Módulo de elasticidade ( $E_{m0}$ ), obtidos mediante ensaios estáticos não destrutivos, em 24 lâminas de madeira maciça, 12 conjuntos com duas lâminas dispostas lateralmente não solidarizadas e 12 conjuntos com duas lâminas sobrepostas não solidarizadas.

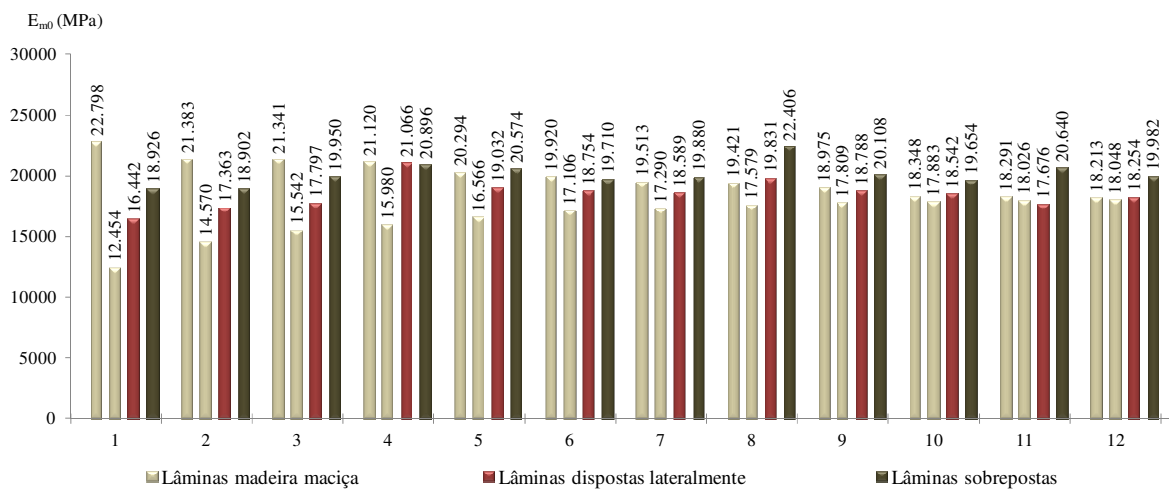


Figura 48 - Módulo de Elasticidade ( $E_{m0}$ ) determinados em ensaios de flexão estática não destrutivos

A análise de variância do  $E_{m0}$  dos conjuntos não solidarizados indicou diferenças significativas ao nível de 5% de probabilidade; sendo superior o  $E_{m0}$  exibido pelos conjuntos de 2 lâminas sobrepostas (Figura 49). Esse fato foi atribuído à influência do atrito entre as peças sobrepostas que indica a necessidade de um tratamento diferenciado no cálculo do momento de inércia teórico.

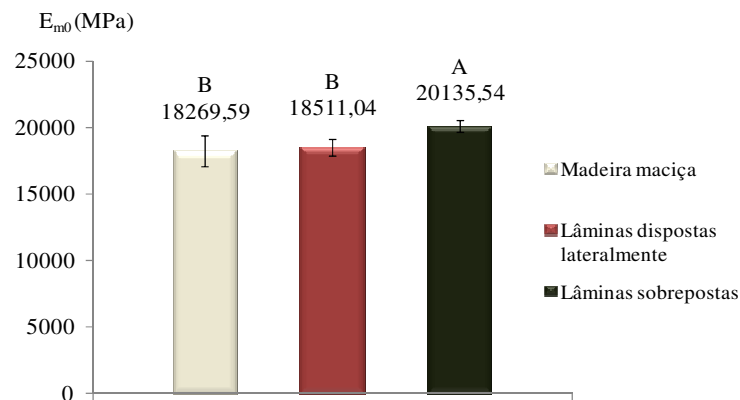


Figura 49 – Valores médios do Módulo de Elasticidade ( $E_{m0}$ ) determinados em ensaios de flexão estática não destrutivos

Nas lâminas de madeira maciça o coeficiente angular da regressão linear do  $E_{m0}$  estático não destrutivo com o  $E_{m0}$  dinâmico (Figura 50) apresentou-se muito próximo de um, demonstrando uma grande correlação entre os métodos não destrutivos empregados para a estimação do módulo de elasticidade.

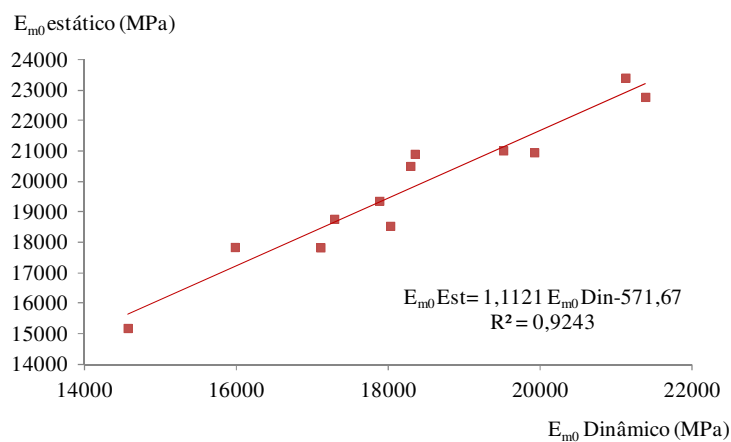


Figura 50 – Correlação entre o módulo de elasticidade estático determinado no ensaio de flexão não destrutivo e o módulo de elasticidade dinâmico, para madeira maciça de *E. grandis*

Ao analisar os valores do módulo de elasticidade obtidos nos ensaios estáticos não destrutivos e destrutivos nas vigas com peças sobrepostas não solidarizadas verificou-se que não houve diferenças significativas entre eles, o que demonstrou a efetividade da determinação do módulo de elasticidade mediante os ensaios não destrutivos de flexão estática (Figura 51).

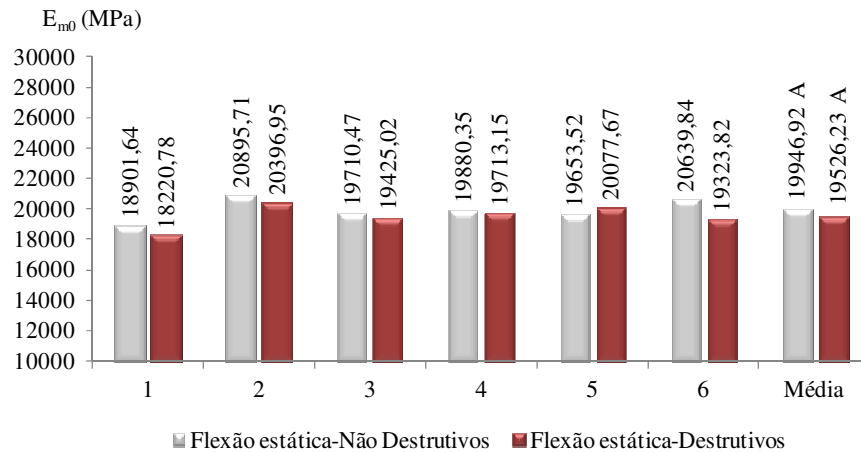


Figura 51 – Valores médios do Módulo de Elasticidade ( $E_{m0}$ ) vigas com 2 lâminas superpostas não solidarizadas

Os valores do  $E_{m0}$  das vigas laminadas coladas com Jowapur determinados mediante ensaios não destrutivos e destrutivos estão mostrados na Figura 52. A análise de variância indicou que existiram diferenças significativas ao nível de 5% de probabilidade entre os tratamentos avaliados, os quais foram classificados em dois grupos por comparação de médias. Observou-se uma superestimação nos valores obtidos no ensaio não destrutivo de flexão estática. No caso do  $E_{m0}$  determinado por vibração transversal observou-se uma maior exatidão, o que foi verificado mediante a regressão linear simples apresentada nas Figuras 53 e 54. A superioridade no  $E_{m0}$  exibida pelas vigas laminadas coladas nos ensaios estáticos não destrutivos pode ser atribuída às baixas cargas empregadas no desenvolvimento deste tipo de ensaios, as quais geram uma acomodação parcial do corpo de prova, enquanto nos ensaios estáticos destrutivos são aplicadas maiores cargas que permitem a acomodação total do corpo de prova, assim as possíveis imperfeições de forma contribuem no aumento do valor total da flecha, o que reduz o valor do módulo de elasticidade.

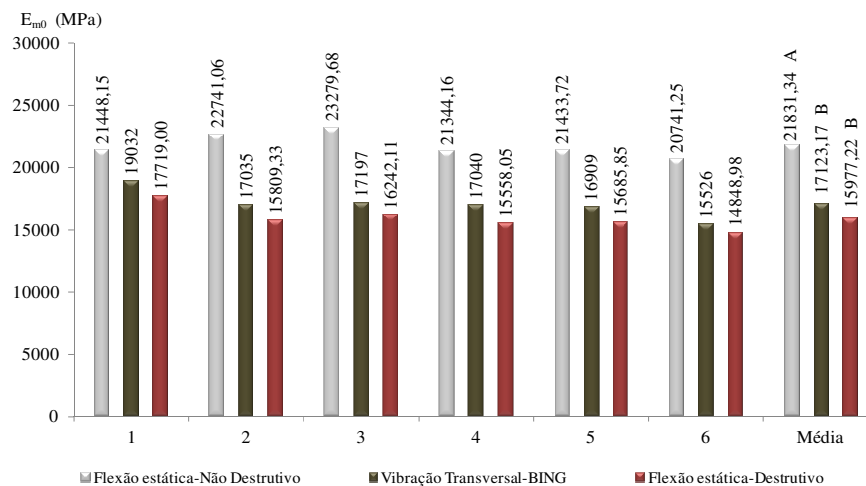


Figura 52 – Módulo de Elasticidade ( $E_{m0}$ ) em vigas laminadas coladas com Jowapur

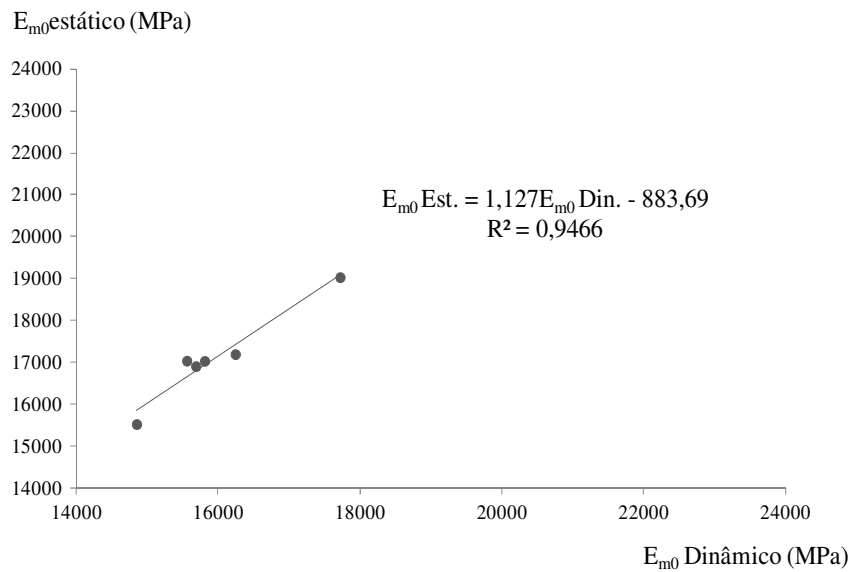


Figura 53– Correlação entre o módulo de elasticidade ( $E_{m0}$ ) estático determinado no ensaio destrutivo e o módulo de elasticidade ( $E_{m0}$ ) dinâmico determinado mediante vibração transversal BING em vigas laminadas coladas com o adesivo Jowapur

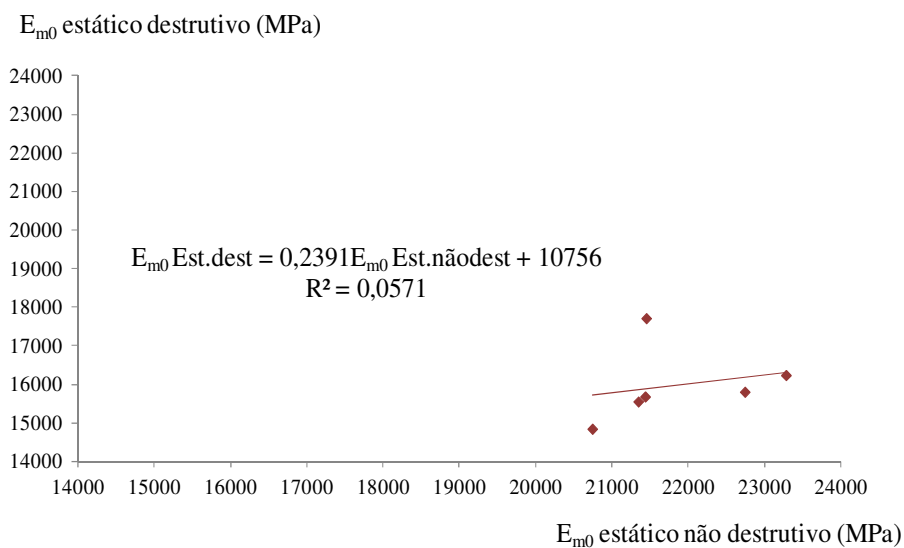


Figura 54– Correlação entre o módulo de elasticidade ( $E_{m0}$ ) estático determinado no ensaio destrutivo e o módulo de elasticidade ( $E_{m0}$ ) estático determinado no ensaio não destrutivo em vigas laminadas coladas com o adesivo Jowapur

Ao analisar os resultados do  $E_{m0}$  nos ensaios destrutivos de flexão estática em vigas solidarizadas e sem solidarizar, verificou-se que existiram diferenças significativas, sendo superior o comportamento das vigas não solidarizadas (Figura 55). O valor médio do  $E_{m0}$  da madeira maciça foi representado pela linha tracejada para mostra que foi praticamente

idêntico ao da viga não solidarizada e significativamente maior do que as vigas coladas.

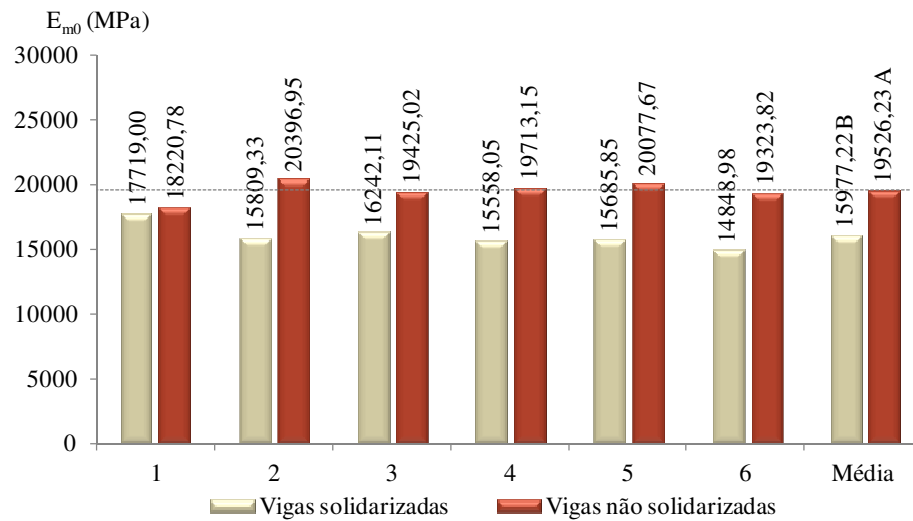


Figura 55 – Módulo de elasticidade ( $E_{m0}$ ) plotados para comparação com a referência da madeira maciça mostrada em linha tracejada

#### 4.2.3 Resistência à flexão ( $f_M$ )

A resistência à flexão das vigas solidarizadas e das vigas não solidarizadas foi determinada de acordo com os procedimentos descritos pela Norma NBR 7190-97. Os valores obtidos estão apresentados Figura 56 onde a linha tracejada corresponde ao valor médio de resistência à flexão da madeira maciça. A análise de variância não mostrou diferença significativa entre os tratamento ao 5% de probabilidade.

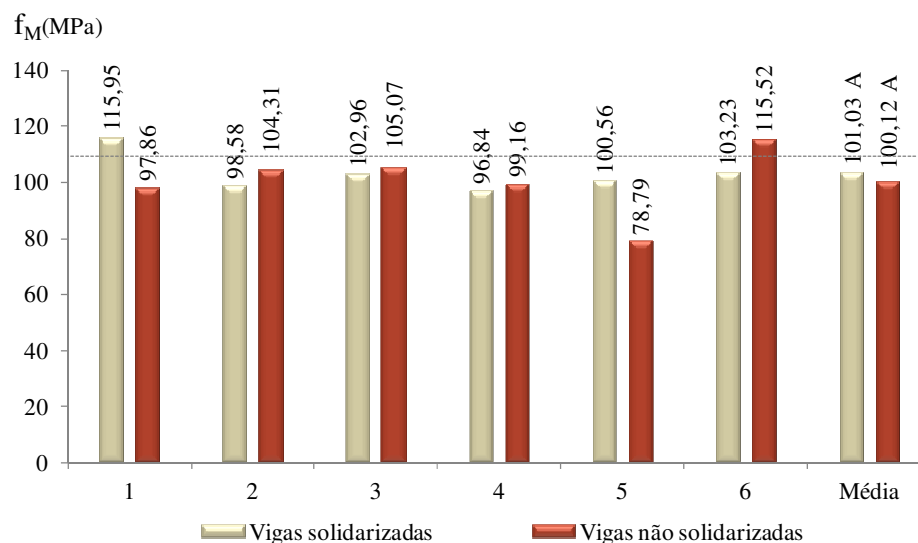


Figura 56 – Resistência à flexão ( $f_M$ ) tendo como referência o valor da madeira maciça indicado pela linha tracejada

#### 4.2.4 Índice de influência do esforço cortante (IFC)

As equações (7) e (8) apresentam as componentes da flecha total, sendo ( $f\sigma$ ) devida ao momento fletor e ( $f\tau$ ) devida ao esforço cortante. A partir destas foi desenvolvida a equação (9b), que permite estabelecer o efeito do esforço cortante (IFC).

$$f\sigma = \int_L \frac{M_r M_1}{EI} dx \quad (7)$$

$$f\tau = \int_L \frac{c Q_r Q_1}{GS} dx \quad (8)$$

$M_r$ : momento fletor devido ao carregamento real;

$M_1$ : momento fletor devido a uma carga unitária colocada no ponto e na direção em que se deseja calcular a flecha;

E: módulo de elasticidade longitudinal (MPa);

I: momento de inércia em relação ao centro de gravidade da seção transversal, dado por  $bh^3/12$

c: constante de correção da distribuição da tensão de cisalhamento na seção transversal;

$Q_r$ : esforço cortante devido ao carregamento real;

$Q_1$ : esforço cortante devido à mesma carga unitária;

G: módulo de elasticidade transversal ou módulo de cisalhamento (MPa);

S: seção transversal (mm<sup>2</sup>);

L: distância entre os apoios (mm);

h: altura da seção transversal da viga (mm);

b: largura da seção transversal da viga (mm).

As funções dos momentos fletores e dos esforços cortantes relativos ao ensaio, estão apresentados nas equações (8 e 9).

$$\text{Para } 0 \leq x \leq \frac{L}{2}$$

$$M_r(x) = \frac{P}{2}x \quad M_1(x) = \frac{x}{2} \quad (8a)$$

$$Q_r = \frac{P}{2} \quad Q_1 = \frac{1}{2} \quad (8b)$$

$$\text{Para } \frac{L}{2} \leq x \leq L$$

$$M_r(x) = \frac{P}{2}x - P\left(x - \frac{L}{2}\right) = \frac{P}{2}(L - x) \quad M_1(x) = \frac{1}{2}(L - x) \quad (9a)$$

$$Q_r = -\frac{P}{2} \quad Q_1 = -\frac{1}{2} \quad (9b)$$

Substituindo as equações (8a) e (9a) na eq. (7) e as equações (8b) e (9b) na eq. (8) obtiveram-se as equações (10) e (11) que integradas em todo o comprimento da viga forneceram as equações (12) e (13) que são respectivamente as componentes da flecha devida às tensões normais e às tensões cisalhantes (GARCIA, 2008).

$$f\sigma = \int_0^{\frac{L}{2}} \frac{\frac{P}{2}x \cdot \frac{x}{2}}{EI} dx + \int_{\frac{L}{2}}^L \frac{\frac{P}{2}(L-x) \cdot \frac{1}{2}(L-x)}{EI} dx \quad (10)$$

$$f\tau = \int_0^{\frac{L}{2}} \frac{\frac{L}{2}c \cdot \frac{P}{2} \cdot \frac{1}{2}}{GS} dx + \int_{\frac{L}{2}}^L \frac{c \left(-\frac{P}{2}\right) \cdot \left(-\frac{1}{2}\right)}{GS} dx \quad (11)$$

$$f\sigma = \frac{PL^3}{48EI} = \frac{P}{4Eb} \left(\frac{L}{h}\right)^3 \quad (12)$$

$$f\tau = \frac{PcL}{4GS} = \frac{Pc}{4Gb} \left(\frac{L}{h}\right) \quad (13)$$

Foi criado o índice de influência do esforço cortante (**IFC**), dado pela equação (14b), que expressa a contribuição do esforço cortante na flecha total e consequentemente no módulo de elasticidade à flexão e o **IFC1**, dado pela equação (15b), que expressa a importância do esforço cortante em relação ao momento fletor.

$$IFC = \frac{f\tau}{f\sigma + f\tau} \quad (14a)$$

$$IFC = \frac{1}{\frac{G}{cE} \left(\frac{L}{h}\right)^2 + 1} \quad (14b)$$

$$IFC1 = \frac{f\tau}{f\sigma} \quad (15a)$$

$$IFC1 = \frac{cE}{G \left(\frac{L}{h}\right)^2} \quad (15b)$$

A Figura 57 foi elaborada com as equações (14b) e (15b) para mostrar a influência do esforço cortante no módulo de elasticidade à flexão (IFC) e a influência do esforço cortante



sobre o momento fletor (IFC1) em função da relação  $L/h$  e para dois valores do módulo de cisalhamento ( $G=4000$  MPa e  $G= 650$  MPa). Em todos os casos foi adotado o valor de 1,2 para o fator de distribuição de tensões cisalhantes na seção transversal.

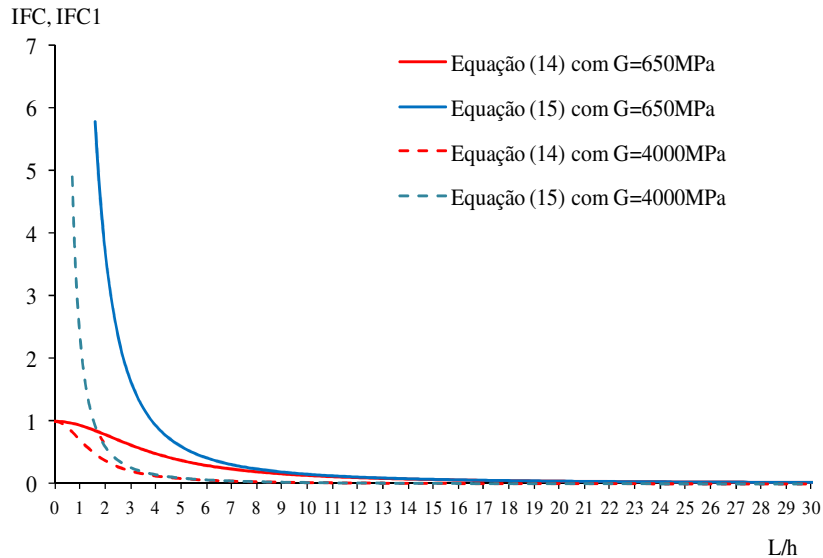


Figura 57 – Índice de influência do esforço cortante (IFC) em função da relação entre o vão ( $L$ ) e a altura ( $h$ ) da seção transversal da viga

Verificou-se que a influência do esforço cortante depende da relação  $L/h$  e também do valor do módulo de cisalhamento ( $G$ ). Para  $L/h < 12$  o efeito do  $G$  pode ser ainda maior do que o efeito da própria relação  $L/h$  indicando que a relação  $L/h$  ótima pode ser diferente de uma espécie para outra. Para relações  $L/h > 27$  não há influência importante seja do  $G$  ou da própria relação  $L/h$ , mas, evidencia-se a necessidade de se avançar para além da teoria elementar da resistência dos materiais no sentido de se considerar a importância de grandes deslocamentos que tem efeitos de segunda ordem nos esforços internos.

Com as equações deduzidas acima pode-se trabalhar com qualquer relação  $L/h$  qualquer que se queira e corrigir a flecha medida no ensaio descontando-se a influência do esforço cortante. Para isso é necessário entrar com o correto valor de  $G$  e cuidar para que não haja efeito de recalque nos apoios no valor da flecha medida, principalmente por compressão normal no corpo de prova sob flexão.

Ao analisar os resultados de módulo de elasticidade ( $E_{m0}$ ) e de módulo de ruptura ( $f_M$ ) obtidos nos ensaios de flexão em monoblocos de seção transversal (6 x 6) cm com  $L/h=16$  e  $L/h=21$ , verificou-se que não houve influências significativas do esforço cortante nessas propriedades (Tabela 9). Isso permitiu comprovar que o IFC mostra que a flexão pode ser considerada quase pura para  $L/h > 12$ .

Tabela 9 - Resultados da análise de variância para módulo de elasticidade ( $E_{m0}$ ) e para módulo de ruptura ( $f_M$ ) da madeira maciça para  $L/h=21$  e  $L/h=16$

Causas de Variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados		Quadrado Médio		Valor de F		Prob >F	
		MOE	MOR	MOE	MOR	MOE	MOR	MOE	MOR
Relação L/h	1	63457,16	15,83	63457,16	15,83	0,02	0,18	0,90	0,68
Resíduo	8	28468772,04	690,27	3558596,50	86,28				
Total	9	28532229,20	706,10						

Valores do módulo de cisalhamento  $G$ , para a madeira maciça de *E. grandis* e para as vigas laminadas coladas com Jowapur foram determinados nos ensaios de vibração transversal com o uso do sistema BING, sendo 911 e 967 MPa respectivamente. Na Figura 58 está mostrada a influência prática do esforço cortante no módulo de elasticidade à flexão.

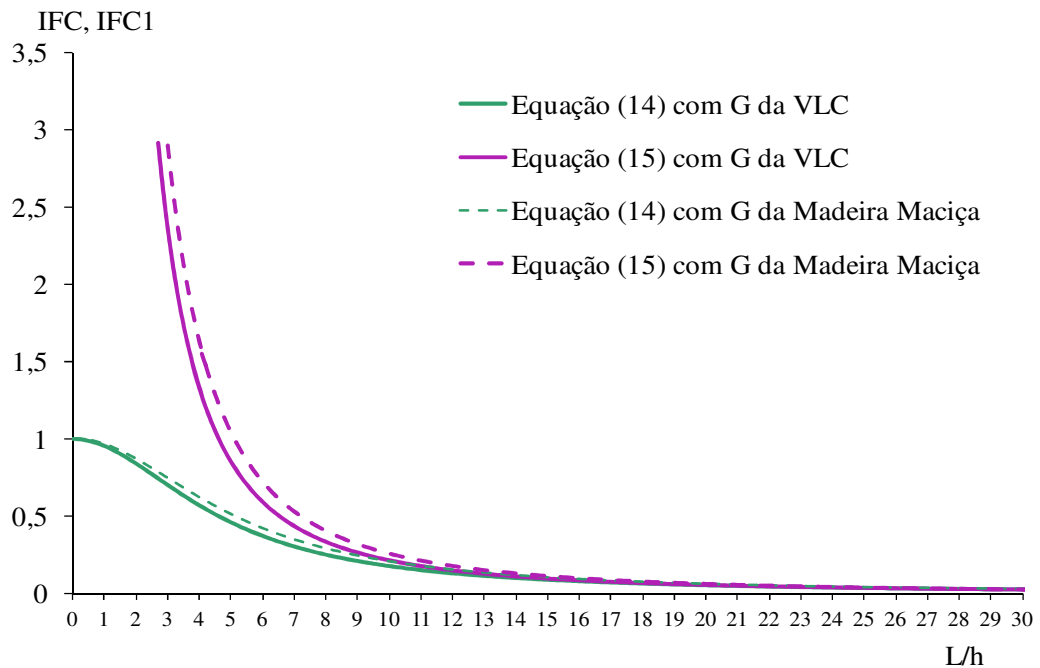


Figura 58 – Índice de influência do Esforço Cortante (IFC) em função da relação entre o vão ( $L$ ) e a altura ( $h$ )

A influência do esforço cortante na flecha e conseqüentemente no módulo de elasticidade pôde ser considerada, do ponto de vista prático, desprezível para relação vão-altura maior do que 25 mas muito dependente da qualidade do valor de  $G$ . Pode-se isolar o efeito do esforço cortante e corrigir o módulo de elasticidade, mas para isso é necessário conhecer a priori o módulo de cisalhamento. Sendo garantido que não haja recalque de apoios essa correção é desnecessária em face da variabilidade natural da madeira.



## 5 CONCLUSÕES/CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os processos de fabricação adotados garantiram uma qualidade ótima às juntas coladas, inferida pela observação das falhas que ocorreram tanto nos ensaios de cisalhamento quanto nos ensaios de flexão, nos quais as rupturas se deram ao longo da madeira maciça sem afetar o plano de cola.

A eficiência adesiva, que é a relação entre a resistência da madeira maciça e a resistência da madeira laminada colada, não variou significativamente entre adesivo, pressão de colagem e acabamento de superfície.

As superfícies usinadas por fresamento periférico discordante apresentaram alta frequência de vasos abertos que influenciaram positivamente na colagem, ao facilitar a penetração do adesivo promovendo a ancoragem.

A resistência das juntas coladas da madeira de *E. grandis* com os adesivos Cascophen e Jowapur foi satisfatória em ambos casos, já que os valores médios da eficiência adesiva variaram entre 90,9 e 127,8%.

Os valores de rugosidade obtidos corresponderam principalmente à anatomia da espécie e não refletiram o efeito real do processo de usinagem. As amostras utilizadas exibiram uma alta frequência de vasos abertos de tamanho considerável, que facilitaram o deslocamento do sensor de medição para dentro e para fora deles provocando variações maiores do que os limites de medição do rugosímetro.

A resistência ao cisalhamento das juntas coladas foi de, no mínimo, 90% da resistência ao cisalhamento da madeira maciça fato esse que indica o alto potencial da espécie para a fabricação de madeira laminada colada.

Na maioria dos casos o valor da resistência ao cisalhamento nominal não correspondeu à resistência ao cisalhamento real, porque quando a ruptura ocorre segundo uma superfície irregular fora do exato plano potencial de cisalhamento o valor da resistência ao cisalhamento pode ser superestimado.

Nos corpos de prova colados com Cascophen as imagens microscópicas dos planos transversal e longitudinal da interface adesivo-madeira permitiram observar a penetração do adesivo nos elementos vasculares, nas fibras e nos raios. A visualização nos corpos colados com Jowapur foi limitada pelo fato do adesivo ser incolor.

Os ensaios com raios-X permitiram estabelecer uma espessura média da linha de cola ligeiramente maior nos corpos de prova colados com Cascophen do que naqueles colados com Jowapur.

Observaram-se correlações muito fracas entre a espessura da linha de cola e as variáveis massa específica, resistência ao cisalhamento, eficiência adesiva e porcentagem de falha na madeira

A ruptura dos corpos de prova deu-se com maior frequência na madeira, fora da área de interação adesivo-madeira, o que permitiu concluir que a resistência desta zona é superior à resistência da madeira maciça.

A frequência de falha na madeira foi superior nos corpos de prova colados com o adesivo Jowapur

As geometrias com dimensões específicas pelas Normas ASTM-D-905-08 e NBR 7190/97 foram satisfatórias para o ensaio de cisalhamento no plano de cola. Observou-se, entretanto, que a maior área de cisalhamento dos corpos da Norma NBR 7190/97, promoveu esmagamento na sua base de contato com o acessório rígido de ensaio o que pôde ter interferido no valor real da resistência ao cisalhamento.

O incremento do tempo de espera entre o processo de usinagem da superfície e a efetiva da colagem gerou juntas adesivas fracas, devido à inativação das superfícies.

Uma resistência adesiva ótima no ensaio de cisalhamento permitiu concluir um comportamento satisfatório da Madeira Laminada Colada submetida à flexão.

O método não destrutivo de vibração transversal *Beam Identification by Non-destructive Grading* apresentou uma alta exatidão na determinação do módulo de elasticidade na flexão

de vigas laminadas coladas, potencializando a adoção do método na classificação de peças estruturais. No entanto considera-se necessária a avaliação de VLC variando o número de lamelas, emendas longitudinais e tipos de adesivo, fatores que influenciam na determinação do módulo de elasticidade.



## REFERÊNCIAS

ALAMSYAH E. M.; NAN, L. C.; YAMADA M.; TAKI, K.; YOSHIDA, H. Bondability of tropical fast-growing tree species I: Indonesian wood species. **Journal Wood Science**, Tokio, v.53, p.40–46, 2007.

ALBINO, V.C.; MORI, F.A.; MENDES, L.M. Estudo da interface madeira-adesivo de juntas coladas com resorcinol-formaldeído e madeira de *Eucalyptus grandis* w. Hill ex Maiden. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 509-516, set. 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D905-08** Standard Test Method for Strength Properties of Adhesive Bonds in Shear by Compression Loading. West Conshohocken. 2008. 31p.

\_\_\_\_\_. **D198-09** Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes. West Conshohocken. 2009. 26p.

\_\_\_\_\_. **D 5266 – 05** Standard Practice for Estimating the Percentage of Wood Failure in Adhesive Bonded Joints. West Conshohocken. 2009. 4p.

ANGYALOSSY-ALFONSO, V. **Caracterização anatômica das principais espécies de *Eucalyptus L'Hérit. cultivadas no Brasil***. 1987. 188p. Tese de (Doutorado em Ciências Biológicas) Instituto de Biociências - Universidade de São Paulo. 1987.

APRILANTI, M.D. **Influência de um corte na borda tracionada de uma viga maciça simulando uma emenda de topo na lâmina inferior de vigas laminadas coladas**. 2010.108p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6405**: Rugosidade das superfícies. Rio de Janeiro, 1988.9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS (ABRAF). **Anuário Estatístico da ABRAF 2010** ano base 2009. Brasília. 2010.140p.

BALDAN, A. Review Adhesively-bonded joints and repairs in metallic alloys, polymers and composite materials: Adhesives, adhesion theories and surface pretreatment. **Journal of Materials Science**, London, v. 39, p.1– 49, 2004.

BURDURLU, E.; KILIÇ, G.Y.; ELIBOL, C.;KILIÇ, M. The shear strength of Calabrian pine (*Pinus brutia* Ten.) bonded whit polyurethane and polyvinyl acetate adhesive. **Journal of Applied Polymer Science**, New York, v.99, p.3050-3061, 2006.

BURDURLU, E.; USTA,I.; KILIÇ, Y. ; ULUPINAR, M. The effect on shear strength of different surfacing techniques in Oriental beech (*Fagus orientalis* Lypsky) and Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.) bonded joints. **Journal Adhesion Science Technology**, Leiden, v.21, n. 3/4, p 319-330, 2007.



BUSTOS, A.C. **Optimisation du procédé d'aboutage par entures multiples du bois d'épinette noire**. 2003. These (Doctorat en Sciences du Bois)-Université Laval, Quebec. 2003. Disponível em: <<http://archimede.bibl.ulaval.ca/archimede/files/08ebf5a7-aa7a-4228-b2e4-233246ec8267/21006.html>>. Acesso em: 10 mar. 2010.

CARPINETTI, L.C.R.GONÇALVES,E.V.; PORTO, A.J.V.; JASINEVICIUS,R.G. **Rugosidade Superficial: Conceitos e Princípios de Medição**. São Carlos: Seção de Publicações da EESC-USP, 1996. 51p.

COMYN, J. **Adhesion science**. Cambridge:The Royal Society of Chemistry, 1997. 149p.

CUSTODIO, J.; BROUGHTON, J.; CRUZ, H. A review of factors influencing the durability of structural bonded timber joints. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, Guildford, v. 29, p.173-185, 2009.

DEMCOFF, M.L. 2003. Vigas laminadas estructurales de madera, su fabricación y empleo In: JORNADAS FORESTALES DE ENTRE RÍOS,18., 2003, Concordia. **Anais...** Concordia: RITIM, Disponível em: <[www.ritim.org.ar](http://www.ritim.org.ar)>.

FREAS, A.D.; SELBO, M.L. **Fabrication and Design of Glued Laminated Wood Structural Members**. Washington.:USDA-Forest Products Laboratory, 1954. 255p.

FRIHART, C.R. Adhesive bonding and performance testing of bonded wood products. **Journal of ASTM international**, West Conshohocken, v. 2, n.7, p.1-12. 2005.

FRIHART, C.R. Adhesive groups and how they relate to the durability of bonded wood. **Journal of Adhesion Science and Technology**, Leiden, n.23, p.601–617, 2009.

FRIHART, C.R. Adhesive interaction with wood. Fundamentals of composite processing. Madison:USDA, 2004. p 29-38.

FRIHART, C.R. Utility Horioka's and Marra's models for adhesive failure. In: WOOD ADHESIVES 2005. **Discussion Forum**. Madison:Forest Products Society, 2006.p 233-238.

FRIHART, C.R.; WIEDENHOEFT, A.C.; JAKES, J.E. Wood bonding in the furniture industry and the effect of changing wood supply. Practical Solutions for Furniture and Structural Bonding. In: INTERNATIONAL WORKSHOP. Larnaka 2007. p.11- 18.

FUJIWARA, Y.; FUJII, Y.; OKUMARA, S. Effect of removal of deep valleys on the evaluation of machined surfaces of wood. **Forest Products Journal**, Madison, v.53, n.2, p 58-62, 2003.

GONÇALVES, M.T.T. **Processamento da madeira**. Bauru. Document Center Xerox – USC, 2000. 245p.

HENDARTO, B.; SHAYAN, E.; OZARSKA, B.; CARR, R. Analysis of roughness of a sanded wood surface. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. London,v.28, n7/8, p.775-780, 2006.

HERNANDEZ, R. Analysis of strain in finger-jointed lumber. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 5., 1998. Montreux. **Proceedings...** Montreux: J. Natterer and J.-L. Sandoz. v. 1, 1998. p. 145-152.

HOUWINK, R.; SALOMON, G. **Adherencia y adhesivos**. Bilbao: Ediciones Urmo, 1973. v.1, 630p.

INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA. **Variación tecnológica y aptitud de la madera de distintos Orígenes y procedencias de *Eucalyptus grandis*, utilizado comercialmente en Argentina**. Concordia, 2003. Disponível em: <<http://www.inta.gov.ar/concordia/info/documentos/Forestacion/Rcaracteristicasmadera.htm>> Acesso em: ago. 2009.

ISKRA, P.; HERNANDEZ, R.E. The influence of cutting parameters on the surface quality of routed paper birch and surface roughness prediction modeling. **Wood and Fiber Science**, Madison, v.41, n.1, p. 28–37, 2009.

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

JOKERST, R.W. Finger-jointed wood products. Washington: USDA. 1981.p.1-24.

JOWAT AG. **Jowat News Polyurethane adhesives with certificates**. Abril de 2005. Disponível em: <[http://www.powerbond.co.uk/images/attachments/second/252\\_2.pdf](http://www.powerbond.co.uk/images/attachments/second/252_2.pdf)> Acesso em: fev. 2012.

\_\_\_\_\_. **Jowapour 686.60 Liquid one-component polyurethane adhesive for load-bearing structural wood bonding**. Detmold, 2010. p.1-4.

KILIC, M.; HIZIROGLU, S.; BURDURLU, E. Effect of machining on surface roughness of Wood. **Building and Environment**, Oxford, v. 41, p.1074-1078, 2006.

LIMA, I.L. **Influência do desbaste e da adubação na qualidade da madeira serrada de *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden**. 2005. 137p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

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, 2006.

LOPES, C.S.D. **Caracterização da madeira de três espécies de eucalipto para uso em movelaria**. 2007. 88p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

MARTINS, S.A. **Adequação tecnológica da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambafe para a produção de painéis colados lateralmente (PCL)**. 2011. 96p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2011.

MARTINS, S.A.; DEL MENEZZI, C.H.S.; FERRAZ, J.M.; SOUZA, M.R. Bonding behavior of *Eucalyptus benthamii* wood to manufacture edge glued panels. **Maderas, Ciencia y tecnología**, Concepción, 2012. Disponível em:

<[http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-221X2013005000008&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2013005000008&lng=es&nrm=iso)>. Acesso em: 02 abr. 2013. Epub 19-Dic-2012. doi: 10.4067/S0718-221X2013005000008.

MOMENTIVE. **Boletim técnico Cascophen RS-216-M**. Cotia, 2011. p. 1-4.

MOODY, C.R.; HERNANDEZ, R. Glued-Laminated Timber. **Engineered wood products**-A guide for specifiers, designers and users. Madison, WI: PFS Research Foundation, 1997. chap 1. p. 1-39.

MOODY, C.R. HERNANDEZ, R.; LIU, L.Y. Glued Structural Members. **Wood handbook** - Wood as an engineering material. Madison:Department of Agriculture;Forest Service; Forest Products Laboratory, 1999. chap. 11. p. 1-24

MORA, L.F.; HERNANDEZ, R.E. Evaluation of vanish coting performance for two surfacing methods on sugar maple wood. **Wood and Fiber Science**, Madison v.37, n.2, p.355-366, 2005.

NOVASKI, O. **Introdução à engenharia de fabricação mecânica**. São Paulo:Edgard Blucher, 1994. 119p.

OLIVEIRA, J.T.S.; HELLMEISTER, J.C. **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil**. São Paulo:EPUSP, 1998. 45p.

PETRAUSKI, A.; DELLA LUCIA, R.M. Desempenho de juntas coladas de *Eucalyptus grandis* em função de diferentes níveis de pressão, consumo de cola e número de faces de aplicação do adesivo. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 6., 1998. Florianópolis - SC. **Anais...** Florianópolis –SC, 1998. v.1. p. 304-311

PIZZI, K.A.; MITTAL, L. **Handbook of adhesive technology**. New York:Marcel Dekker, 2003. 1017p.

PLASTER, O.B.; OLIVEIRA, J.T.S.; ABRAHÃO, C.P.; BRAZ, R.L. Comportamento de juntas coladas da madeira serrada de *Eucalyptus* sp. **Cerne**, Lavras, v. 14, n. 3, p. 251-258, 2008

RHUDE, A.J. Structural glued laminated timber: history of its origins and early development. **Forest Products Journal**, Madison, v. 46 n. 1, p. 15-22, 1996.

RIVER, B.H.; VICK, B.C.H. ; GILLESPIE, H.R. **Wood as an adherend**. New York:Ed. J. Dean Minford Marcel Dekker, 1991. v. 7, 211p.

SANDAK, J.; NEGRI, N. Wood surface roughness – What is it? Trees and Timber Research Institute Ivalsa/CNR. 2005. 9 p. Disponível em: <[http://www.boku.ac.at/physik/coste35/Rosenheim/article/art\\_Sandak\\_COST\\_E35\\_Rosenheim\\_2005.pdf](http://www.boku.ac.at/physik/coste35/Rosenheim/article/art_Sandak_COST_E35_Rosenheim_2005.pdf)> Acesso em: mar. 2011.

SCHNEBERGER, G.L.**Adhesives in Manufacturing**. New York:Marcel Dekker, 1983.671p.

SERRANO, E. A numerical study of the shear-strength-predicting capabilities of test specimens for wood–adhesive bonds. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, Guildford, v.24, p. 23–35, 2004.

SILVA, J.R.M.; LIMA, J.T.; BRAGA, P.P.C.; TRUGILHO, P.F. A utilização de rugosímetro na qualificação das superfícies usinadas em madeiras de *Eucalyptus sp.* In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 10., 2006, São Pedro. **Anais...** São Pedro: Instituto Brasileiro da Madeira e Estruturas de Madeira, 2006. 1 CD-ROM.

SILVA, J.R.M. **relações da usinabilidade e aderência do verniz com as propriedades fundamentais do *Eucalyptus grandis hill ex. maiden***. 2002. 204p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

SILVA, J.C. Cresce presença do eucalipto no Brasil. **Revista da Madeira**, Curitiba, v.15, n. 92, 2005. Disponível em: [http://www.remade.com.br/pt/revista\\_materia.php?edicao=92&id=803](http://www.remade.com.br/pt/revista_materia.php?edicao=92&id=803) Acesso em: 15 set. 2009.

SIQUEIRA, P.K.; MONTEFUSCO, A.R.G.; GUIMARÃES, N.A.B. ; BONDUELLE, A. Principais metodologias de mediação de estado de superfícies. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, Guarapuava, v.5, n. 2, p.203-210, oct.2003.

STRICKLER, M.D. Finger-jointed dimensioned lumber past, present and future. **Forest Products Journal**, Madison, v.30 n.9, p.51-56, 1980.

THE ENGINEERED WOOD ASSOCIATION (APA) **Glulam**: product guide. 2008. Disponível em: <www.apawood.org> Acesso em: fev. 2009.

TIBURCIO, U.F.O. **Medição e análise do acabamento superficial da madeira de eucalipto na usinagem de torneamento cilíndrico e lixamento**. 2009. 101p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Guaratinguetá, 2009.

UYSAL, B.; ÖZÇİFÇİ, A. Bond Strength and Durabilty Behavior of Polyurethane-Based Desmodur-VTKA Adhesives Used for Building Materials After Being Exposed to Water-Resistance. **Journal of Applied Polymer Science**, New York, v. 100, p.3943–3947, 2006.

VARANDA, L.D.; ALVES, M.C.; GONÇALVES, M. T.T. ; SANTIAGO, L. F.F. A influência das variáveis do lixamento tubular na qualidade das peças de *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, Lavras, v.16, Suplemento, p. 23-32, jul.2010.

VICK C.B. Adhesive Bonding of Wood Materials. **Wood handbook** -Wood as an engineering material. Madison: Department of Agriculture; Forest Service; Forest Products Laboratory, 1999.chap. 9. p. 1-24

VIERA, E.R; **Propriedades adesivas de IPNS a base de poliuretana de óleo de mamona associada a diferentes poliácrlatos**. 2005. 84p. Dissertação (Mestrado em Engenharia ) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

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