

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

**Resistência à tração da madeira e resistência ao cisalhamento no plano de cola,
seus impactos na geometria do dente e propriedades mecânicas de emendas
dentadas**

Luisa Julieth Parra Serrano

**Dissertação apresentada para a obtenção do título de
Mestre em Recursos Florestais, com opção em Tecnologia
de Produtos Florestais**

Piracicaba
2009

Luisa Julieth Parra Serrano
Engenheira Florestal

Resistência à tração da madeira e resistência ao cisalhamento no plano de cola, seus impactos na geometria do dente e propriedades mecânicas de emendas dentadas

Orientador:
Prof. Dr. JOSÉ NIVALDO GARCIA

Dissertação apresentada para a obtenção do título de Mestre em Recursos Florestais, com opção em Tecnologia de Produtos Florestais

Piracicaba
2009

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

Parra Serrano, Luisa Julieth

Resistência à tração da madeira e resistência ao cisalhamento no plano de cola, seus impactos na geometria do dente e propriedades mecânicas de emendas dentadas / Luisa Julieth Parra Serrano. - - Piracicaba, 2009.

96 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2009.
Bibliografia.

1. Cisalhamento 2. Eucalipto 3. Madeira – propriedades mecânicas I. Título

CDD 674.132
P259r

“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 E.

Pertence este trabalho

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. José Nivaldo Garcia pela valiosa orientação, dedicação, apoio e amizade durante o desenvolvimento deste trabalho.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” pela oportunidade para a realização do curso.

Ao Técnico do Laboratório de Máquinas e Engenharia da Madeira Luis Eduardo Facco pela valiosa colaboração nas diferentes fases da realização dos ensaios.

À empresa Matra - Madeira tratada, à Art Pine e à Engetrel pelo completo apoio logístico prestado no perfilamento das emendas dentadas e na montagem de vigas laminadas coladas.

Ao Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira (LaMEM-EESC) pelo auxílio no desenvolvimento desta pesquisa

Ao estagiário Paulo Fujiwara pela colaboração na realização dos ensaios.

À Marisol Garcia P. e ao Sergio Arciniegas A. pela assistência nas análises estatísticas.

Às minhas amigas e colegas de laboratório (Maris e Claudia) pelo agradável convívio, amizade e apoio.

Aos meus amigos (Christian, Claudia, Marisol, Miguel Ángel, e Sergio) pela força, companhia e os agradáveis momentos compartilhados.

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
1. INTRODUÇÃO	9
1.1 Considerações gerais	9
1.2 Objetivos.....	9
1.2.1 Objetivo geral	9
1.2.2 Objetivos específicos.....	9
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 Madeira laminada colada.....	11
2.2 Emendas longitudinais em Madeira Laminada Colada	14
2.3 Emendas dentadas.....	16
2.4 Fatores que afetam a resistência da emenda dentada	17
2.4.1 Qualidade da Madeira.....	17
2.4.2 Parâmetros Geométricos.....	18
2.4.3 Procedimento de Usinagem	21
2.4.4 Colagem.....	21
2.4.4.1 Características da Madeira.....	22
2.4.4.2 O adesivo	24
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	29
3.1 Espécies de madeira.....	29
3.2 Adesivos	31
3.2.1 Fundo preparador para junta de placa cimentícia ADESPEC	32
3.2.2 Cascorez	32
3.2.3 Cascophen.....	33
3.2.4 Wonderbond	34
3.3 Resistência ao Cisalhamento no plano de cola.....	35
3.3.1 Resistência ao cisalhamento no plano de cola paralelo às fibras em corpos-de-prova colados com os adesivos Cascorez, Cascophen e Wonderbond	35
3.3.2 Resistência ao cisalhamento, em função do ângulo de inclinação do plano de cola em corpos-de-prova colados com os adesivos Adespec e Cascorez	35
3.3.3 Confecção dos corpos-de-prova para ensaios de cisalhamento.....	36
3.3.4 Procedimento de colagem.....	38
3.3.5 Procedimento de prensagem.....	40
3.3.6 Condicionamento pós prensagem.....	43
3.3.7 Ensaios de cisalhamento.....	44
3.3.8 Delineamento estatístico.....	44
3.3.8.1 Resistência ao cisalhamento no plano de cola paralelo às fibras (fgv0) para corpos-de-prova colados com os adesivos Cascorez, Cascophen e Wonderbond.....	44
3.3.8.2 Resistência ao cisalhamento em função do ângulo de inclinação do plano de cola (fgv α) em corpos-de-prova colados com os adesivos Adespec e Cascorez	45
3.3.8.3 Análises conjunta de dados de fgv0 e fgv α	46
3.4 Resistência à tração paralela da madeira e da junta dentada	46
3.4.1 Confecção dos corpos-de-prova para ensaios de tração de juntas dentadas.....	46
3.4.1.1 Perfilamento dos dentes.....	46
3.4.1.2 Procedimento de colagem e prensagem.....	50

3.4.1.3 Tempo de cura.....	50
3.4.2 Ensaio de Tração	51
3.4.3 Delineamento Estatístico.....	52
3.5 Resistência à flexão de lâminas emendadas, vigas maciças e compostas.....	53
3.5.1 Confecção dos corpos-de-prova.....	54
3.5.1.1 Seção transversal simples (monoblocos)	54
3.5.1.2 Seção transversal composta	54
3.5.2 Tempo de cura pós prensagem.....	55
3.5.3 Ensaio de Flexão.....	56
3.5.3.1 Ensaio destrutivo em peças maciças	56
3.5.3.2 Ensaio destrutivo em peças com emenda no meio do vão.....	57
3.5.3.3 Ensaio não destrutivo em peças maciças e emendadas componentes de vigas de seção composta	57
3.5.3.4 Ensaio destrutivo em vigas de seção composta	57
3.5.3.5 Ensaio destrutivo em vigas laminadas coladas	58
3.5.4 Delineamento Estatístico.....	60
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1 Resistência ao cisalhamento no plano de cola paralelo às fibras de corpos-de-prova especiais	63
4.2 Resistência ao cisalhamento em função do ângulo de inclinação do plano de cola em relação à direção das fibras	65
4.3 Análise conjunta da resistência ao cisalhamento nos planos de cola paralelo e inclinado em relação às fibras.....	68
4.4 Determinação de parâmetros geométricos ótimos do dente.....	79
4.5 Resistência à tração de emendas coladas com os adesivos Cascorez, Cascophen e Wonderbond.....	82
4.6 Resistência à flexão de lâminas emendadas e vigas maciças e compostas	87
5 CONCLUSÕES	101
REFERÊNCIAS.....	103

RESUMO

Resistência à tração da madeira e resistência ao cisalhamento no plano de cola, seus impactos na geometria do dente e propriedades mecânicas de emendas dentadas

A presente pesquisa teve como objetivo estudar a resistência ao cisalhamento no plano de cola de corpos de prova especiais e avaliar o seu impacto na geometria do dente, na resistência à tração de emendas dentadas e nas propriedades oriundas da flexão de vigas simples e compostas. A resistência ao cisalhamento no plano de cola foi estudada segundo o seu ângulo de inclinação em relação às fibras, desde 0 até 90° na madeira de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*. O *Eucalyptus grandis* foi favorecido por pequenos ângulos de inclinação do plano de cola contrariamente ao que aconteceu com o *Pinus elliottii* e, portanto, apresentou maior eficiência na colagem, o que é desejável para viga laminada colada. Os valores obtidos foram divididos pela resistência ao cisalhamento da madeira maciça para encontrarem-se as eficiências das ligações coladas com vários adesivos. O valor da resistência ao cisalhamento no ângulo de 5° foi utilizado conjuntamente com a resistência à tração da madeira maciça de *Eucalyptus grandis* para calcular o comprimento do dente a partir de uma teoria simples que o relaciona aos demais parâmetros já conhecidos ou simulados da emenda dentada. Essa teoria, resumida numa única identidade, foi desenvolvida para otimizar a emenda em termos de seus esforços solicitantes majoritários. A emenda dentada foi testada à tração paralela em lâminas emendadas com dentes verticais e horizontais. O perfil vertical apresentou maior resistência à tração e a diferença foi explicada pela área de colagem individual do dente. No caso do dente vertical essa área era menor e, portanto, penalizava menos quando havia algum defeito no dente. Na análise dos tipos de ruptura apresentados verificou-se que a ruptura do tipo 1 que denota má colagem por causa intrínseca do adesivo ou falta de pressão na colagem e ruptura do tipo 5 ou 6 que evidenciam pontos excessivamente fracos da barra ligada ou pontos de concentração de tensões imposta pelas garras da máquina no ensaio de tração contribuíam significativamente para redução da resistência à tração da emenda dentada. Essa resistência deve ser caracterizada por ocorrência alternada de rupturas por cisalhamento misto na superfície do dente e ruptura por tração na seção reduzida da barra ou na raiz do dente como acontece na ruptura do tipo 3. Na flexão foram ensaiadas lâminas emendadas trabalhando como viga sujeita a tensões normais de tração e de compressão e lâminas emendadas trabalhando como componente de viga laminada posicionada na borda tracionada. Não houve diferença entre esses dois casos em qualquer dos estados limites. A eficiência da viga laminada colada com emenda no meio do vão foi muito baixa em relação à viga maciça, mas somente para o módulo de ruptura à flexão. Essa eficiência foi expressa como a relação entre o momento de inércia real e o teórico. A emenda dentada não influenciou a elástica da viga laminada que apresentou o mesmo módulo de elasticidade da viga maciça.

Palavras-chave: Emendas dentadas; Propriedades mecânicas; Geometria do dente; Viga laminada colada; *Eucalyptus grandis*

ABSTRACT

Tensile and shear strength in the wood bonding surface, its impact on the finger geometry and on the mechanical properties of the finger joints

The objective of the present study was to determine the shear strength in the bonding surface of special samples and to evaluate their impact on the geometric parameters of the finger, the tensile strength of the finger joints and the intrinsic flexural properties of simple and composed beams. The shear strength on the bonding surface was studied as a function of the inclination angle related to the wood fibers direction, from 0 to 90° in *Eucalyptus grandis* and *Pinus elliottii* species. Small inclination angles of the bonding surface performed very well in *E. grandis* samples and therefore it showed higher bonding efficiency when compared to *P. Elliottii*. The efficiency of the glued joints with different adhesives was determined by dividing the measured values by the shear strength of the solid wood. A simple theory relates the other known or simulated parameters of finger joints to the length of the finger. Using the values of the shear strength obtained experimentally with an inclination angle of 5° and the tensile strength of the solid wood of *E. grandis* finger length was calculated. Such theory, summarized in a unique equality, was developed to optimize the finger joints in terms of major acting efforts. The finger joints which had vertical and horizontal finger were tested in parallel traction to evaluate the maximum carrying load. The vertical profile had higher tensile strength and the difference was explained by the area of the glued joints in the finger. In the case of the vertical finger the area of glued joints was smaller and therefore had less impact when there was a defect in the finger or problem with the adhesion. Analyses of the modules of rupture revealed that rupture type 1 and type 5 or 6 contributed significantly to the reduction in the tensile strength of the finger joints. Rupture type 1 refers to failure due to causes intrinsic to the adhesive or to lack of pressure in the bonding process. Rupture type 5 or 6 refers to the presence of excessively weak points in the bar or to points of concentration of stress imposed by the clamps of the machine during the test. Such tensile strength must be characterized by the alternate presence of ruptures by mixed shear strength in the surface of the finger tip and the rupture by traction in the reduced section of the bar or in the base of the finger tip similar to a type 3 rupture. In flexural tests laminas which had a finger joint in the middle of the span were tested as a beam subjected to tensile and compression normal stresses and also as a component of the laminated beam located in the traction edge. There were no significant differences between these two cases in any of the limiting states. The efficiency of the glued laminated beam with the finger joints located in the middle of the distance among points of support was very low in relationship to the efficiency of the solid wood, but only for the modulus of rupture in the flexure. This efficiency was expressed as the ratio of the moment of inertia to the theoretical moment. The finger joint did not influence the elasticity of the laminated beam since it had the same modulus of elasticity as the one found for solid wood.

Keywords: Finger joints; Mechanical properties; Finger geometry; Glued laminated beam;
Eucalyptus grandis

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

A madeira laminada formada por peças de madeira unida entre si, e colada com algum tipo de adesivo é considerada como uma alternativa estrutural interessante ao se comparar com a madeira maciça, a qual apresenta um comportamento adequado, mas é afetada pela presença de defeitos, assim como pela escassez de peças de grandes dimensões e a disponibilidade de volumes suficientes, fatores que limitam a seu uso. Espécies exóticas plantadas e de rápido crescimento, como o *Eucalyptus grandis* e o *Pinus elliottii*, garantem uma extração florestal rentável e por isso foram utilizadas na presente pesquisa. Partindo de um processo de fabricação controlado, cumprindo com as características ótimas na elaboração de emendas dentadas, considerando as variáveis geométricas dos dentes, e o tipo de adesivo empregado e as variáveis da fabricação destas, buscou-se determinar a partir de ensaios mecânicos básicos as características mais eficientes das emendas dentadas que pudessem imprimir uma maior resistência ao conjunto laminado. Pretendeu-se, assim, contribuir com o desenvolvimento da indústria da madeira laminada colada.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Estabelecer o impacto da resistência à tração na madeira e a resistência ao cisalhamento no plano de cola na geometria do dente. Avaliando as propriedades mecânicas das emendas, mediante a determinação da resistência à tração paralela e à flexão.

1.2.2 Objetivos específicos

-Mediante ensaios de cisalhamento estabelecer o efeito do ângulo de inclinação do plano de cola na resistência das emendas dentadas;

-Determinar a geometria do dente e estabelecer as variáveis relevantes, nas propriedades mecânicas das emendas dentadas;

- Determinar o efeito da orientação da emenda dentada (horizontal e vertical), nas propriedades de tração e flexão da lâmina emendada;

-Estabelecer a eficiência das emendas dentadas mediante a determinação da porcentagem da resistência exibida pela madeira emendada em relação à resistência apresentada pela madeira maciça;

-A partir da avaliação dos modos de ruptura, gerados no ensaio de tração determinar a efetividade das emendas dentadas (Norma ASTM D 4688-99);

-Estabelecer a influência do tipo de adesivo na resistência à tração exibida pelas emendas dentadas;

-Avaliar o efeito da presença de lâminas emendadas na resistência do conjunto laminado em relação à madeira maciça considerando o módulo de elasticidade e o módulo de ruptura na flexão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Madeira laminada colada

Madeira Laminada Colada (MLC) é uma denominação geral usada para peças de seção transversal retangular de largura fixa e altura constante ou variável e com eixo reto ou curvo; constituída de lâminas ou tábuas unidas com um adesivo especificamente formulado. A espessura normal das lâminas varia entre 20 e 45 mm. A fabricação de madeira laminada consiste em produzir elementos maciços de grandes dimensões com resistência incrementada, constituída de tábuas de espessura e comprimento reduzidos coladas de forma que o trabalho de cada uma delas não possa ser individualizado (DEMCOFF, 2003).

O arquiteto Francês Filiberto de l'Orme foi o primeiro a utilizar madeira encaixada para dar acabamentos curvos, mudando da construção em pedra para a construção em madeira no século XVI. No século XIX o coronel Emy, também na França, fabricou vigas laminadas unidas com pregos e cintas metálicas. Em 1901, o Alemão Friedrich Otto Hetzer recebeu a primeira patente Suíça para este método de construção, a qual se referia a várias lâminas de madeira unidas entre si com o adesivo caseína. Em 1906, Hetzer patenteou na Alemanha a construção de peças curvas com madeira laminada, começando o desenvolvimento dos arcos em madeira. A Suíça foi o primeiro país onde o sistema de fabricação Hetzer teve amplo sucesso, existindo em 1920 mais de 200 prédios com vigas ou arcos de tipo Hetzer

Em 1934, a tecnologia da madeira laminada foi implementada nos Estados Unidos com a construção do prédio do Laboratório de Produtos Florestais, projetado e construído pelo Alemão Max Hanisch o qual incluiu vigas e arcos laminados. Com o objetivo de estudar a resistência mecânica foram efetuados ensaios não destrutivos em vigas na escala real constatando que a carga suportada era 50% superior comparada com as especificações dos cálculos. Na sequência desenvolveram ensaios destrutivos em arcos, obtendo resultados satisfatórios, que foram determinantes na aceitação da madeira laminada para fins estruturais (RHUDE, 1996).

Durante a segunda guerra mundial criaram-se os adesivos sintéticos os quais deram um novo impulso à madeira laminada e sua aplicação se estendeu à construção de pontes e

construções marinhas, que devido às condições de uso exigiam alto grau de resistência e durabilidade.

Na atualidade essa indústria se encontra amplamente desenvolvida nos países da América do Norte e da Europa.

No Brasil a primeira indústria de Madeira laminada colada foi a Esmara Estruturas de Madeira Ltda. Fundada em 1934 em Curitiba/PR, alcançando grande sucesso com suas estruturas marcantes na Região sul do país. Segundo Azambuja (2006), outra empresa que merece destaque é a Emadel, a qual possui uma prensa para fabricação de vigas em MLC de 23 metros de comprimento. Até cerca de 3 anos atrás a indústria Battistella se destacava como a principal indústria de MLC do país; com mais de cinquenta anos de experiência no mercado madeireiro nacional e internacional, comercializava os produtos de madeira tratada da marca Stella e possuía uma linha de produção de casas pré-fabricadas cuja estrutura do sistema construtivo era feito de MLC. Atualmente a empresa Matra vem se destacando nesse setor.

De acordo com Nascimento (2000), tem se desenvolvido no Brasil desde a década de 60, uma série de estudos sobre a madeira laminada colada, a partir dos quais surgiram grupos de pesquisa localizados em São Carlos, Belo Horizonte, Florianópolis e Viçosa. Atualmente 2 novos pólos estão se destacando em Piracicaba e São Paulo.

A expectativa do mercado para a madeira laminada colada fabricada com espécies exóticas dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus* é bastante ampla devido ao alto custo das espécies nativas, somado com a dificuldade de consecução de peças maciças de grandes dimensões requeridas para fins estruturais. No primeiro semestre de 2007 as exportações de produtos de madeira tiveram um aumento de 7,8% em relação ao mesmo semestre do ano anterior 2006, sendo um total de US\$ 45,29 milhões correspondentes à madeira laminada (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES E EXPORTADORES DE MADEIRA - ABPMEX, 2007)

O fator limitante na produção da madeira laminada colada no Brasil, assinalado por Bohn e Szücs (1995), é o custo do adesivo a base de resorcinol, o qual tem uma participação de 40 a

60% do custo final. Com o objetivo de minimizar a quantidade de adesivo a ser usado em estruturas, esses autores estudaram a diluição do adesivo à base de resorcinol na qualidade das emendas coladas de madeira. Estabeleceram que uma dissolução de até do 40% em água foi viável.

Segundo Carrasco (1989) ocorre uma perda durante a fabricação da MLC, variando de 13 a 33%, tanto de madeira quanto de adesivo. Essa perda somada à exigência de equipamentos apropriados, técnicas e mão-de-obra especializada no processo de preparação e montagem das lâminas, restringem a fabricação de elementos estruturais de MLC (AZAMBUJA, 2006).

Pode-se dizer de forma geral, que a madeira laminada colada permite novos usos para a madeira exaltando sua beleza e elevando suas propriedades físico-mecânicas e durabilidade. Podendo ainda, permitir a fabricação de madeira estrutural em ampla variedade de tamanho e de forma.

Segundo a NBR 7190/97 as peças de madeira laminada devem ser formadas com lâminas superiores a 30 mm da madeira de primeira categoria coladas com adesivo à prova de água sob pressão, em processo industrial adequado que permita uma vinculação permanente.

Nas lâminas adjacentes de espessura (e), suas emendas devem estar afastadas entre si pelo menos uma distância igual a $25(e)$ ou à altura (h) da viga. As emendas contidas em um comprimento igual a (h) são consideradas como pertencentes à mesma seção resistente.

As lâminas emendadas possuem a seção resistente reduzida:

$$A_{red} = \alpha_r A_{ef}$$

Onde α_r de acordo com o tipo de emenda longitudinal tem os valores:

- emendas dentadas $\alpha_r = 0,9$
- emendas biseladas com inclinação 1:10 $\alpha_r = 0,85$
- emendas de topo $\alpha_r = 0$

A fabricação de peças laminadas deve ser feita sob condições industriais controladas, com adesivos desenvolvidos para produzir peças estruturais onde a integridade da ligação seja mantida durante o tempo de vida projetado, para o qual devem ser seguidas as recomendações dos fabricantes dos adesivos em relação às proporções da mistura, condições ambientais para aplicação, tempo de cura e teor de umidade dos elementos.

A aplicação de carga deve ser evitada nas peças coladas com adesivos que requerem um período de condicionamento após da colagem.

2.2 Emendas longitudinais em Madeira Laminada Colada

A união longitudinal das lâminas pode ser feita normalmente de três formas. A Figura 1(a) mostra a emenda topo a topo (butt joint); as Figuras 1(b), (c), e (d) mostram emendas dentadas em forma de dedos ou dentes de serra (finger joint); e a Figura 1(e) apresenta a emenda biselada (scarf joint). Estes tipos de emendas foram projetados com o objetivo de melhorar a qualidade do conjunto laminado, em termos de resistência.

As emendas representam um fator importante na determinação da resistência das peças de MLC, sendo sua eficiência dependente de vários fatores, como: geometria, precisão de usinagem, montagem, cura do adesivo, pressão, temperatura, umidade e densidade da madeira, presença de madeira juvenil e inclinação das fibras. As emendas representam uma descontinuidade na MLC convertendo-se em regiões potencialmente fracas.

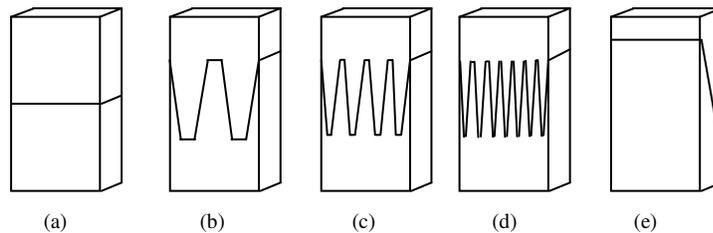


Figura 1 - Tipos de emendas

A emenda de topo avaliada no estudo desenvolvido por Freas e Selbo (1954) quando localizada na borda comprimida das vigas de MLC, não possui influência na resistência da viga, mas quando localizada no lado tracionado, especialmente na lâmina externa, a redução na resistência pode ultrapassar 40%, outra grande desvantagem da emenda de topo é a concentração de tensões nas lâminas adjacentes (MACEDO, 1996).

De acordo com Jokerst (1981), a técnica de emenda biselada mostrou uma resistência à tração de 85 a 90% da exibida pela madeira maciça ao ser trabalhada com uma inclinação de 1:10 e 1:12. Já na inclinação de 1:20 a resistência foi de 95%. Essas emendas apresentaram problemas com o desperdício de madeira, perdendo cerca de quinze polegadas de comprimento na construção da emenda com 1:10 de inclinação. O alinhamento e a vinculação das superfícies são críticas e determinantes na emenda. Na linha de montagem é difícil manter estes fatores, gerando uniões biseladas com características variáveis; aspectos que originaram a decadência deste tipo de emenda.

Nos anos cinquenta vários pesquisadores estudaram variações nos perfis das uniões visando alcançar capacidade estrutural ótima, sem remover um volume significativo de madeira. Originou-se então a emenda dentada, a qual conserva o princípio básico da emenda biselada, na qual os parâmetros geométricos são largura do dente ou passo, comprimento do dente, largura da ponta do dente e a inclinação. A emenda dentada é consideravelmente melhor do que a anterior, já que o volume de madeira removido corresponde a apenas 10% do volume comumente retirado na emenda biselada (HERNANDEZ, 1998).

Moody, 1970 apud Carrasco (1989), estabelece que as emendas biseladas precisam de um comprimento em torno de 45,75 cm para uma espessura nominal de material de 5,0 cm, em quanto à emenda dentada precisa somente de 2,54 a 5,0 cm de comprimento, reduzindo o consumo e economizando acima de 90% da madeira consumida na emenda dentada.

2.3 Emendas dentadas

As emendas dentadas apresentam uma alternativa prática na fabricação de MLC, fato baseado na adaptação do processo industrial. A aplicação de adesivos, a pressão de colagem e o uso de equipamentos específicos para a retirada de defeitos presentes na madeira, podem otimizar a produção de elementos estruturais. Esse tipo de emendas adquiriu boa aceitação devido a sua boa resistência mecânica, possuindo mais uniformidade do que a apresentada pelas emendas biseladas.

Segundo Nascimento (2000), a emenda dentada é atualmente a mais usada nos países com maior desenvolvimento tecnológico na utilização e produção de MLC, como os Estados Unidos, a França, o Japão, e o Canadá. Os perfis mais usados na fabricação de madeira laminada nos Estados Unidos estão mostrados na Tabela 1. Para a produção deste tipo de emenda deve se contar com Normas bem definidas, as lâminas a serem juntadas devem pertencer a uma mesma qualidade e a uma mesma espécie ou espécies afins. A indústria Norte Americana conta com um sistema de classificação que responde às seguintes normas:

“American Softwood Lumber Standard”

“Standard Grading Rules for Northeastern Lumber ”

“Rules for measurement and inspection of Hardwood Lumber and Cypress”

“Standard Methods for Establishing Grades for Lumber (ASTM D 245-69)”

Em cada uma das normas, as madeiras são divididas em classes segundo a qualidade, estabelecida em função da quantidade e tamanho dos nós, densidade da madeira, desvio da grã, módulo de elasticidade, entre outros. Pode-se efetuar uma classificação visual ou mecânica pela medição do módulo de elasticidade.

Tabela 1 - Parâmetros geométricos dos perfis usados na fabricação de emendas dentadas nos Estados Unidos

Parâmetro	Perfil 1	Perfil 2
Comprimento (mm)	28,27	28,27
Largura do dente ou passo (mm)	6,98	6,83
Largura da ponta do dente (mm)	0,81	0,76
Tangente θ	1:10.55	1:10.86

Fonte: Hernandez (1998)

2.4 Fatores que afetam a resistência da emenda dentada

São muitos os fatores que afetam a resistência da emenda dentada. Alguns referem-se à madeira, como densidade, defeitos naturais e boa interação com o adesivo; outros referem-se ao processo de usinagem da emenda, mas a geometria do dente marca o padrão para a resistência da emenda.

2.4.1 Qualidade da Madeira

O principal aspecto intrínseco da madeira que afeta as emendas dentadas é a presença de fibras irregulares, o que é difícil de ser evitado. Os nós estão normalmente circundados por esse tipo de fibra e, portanto, a emenda tem que estar afastada do nó pelo menos uma vez o tamanho do seu diâmetro. Um efeito notável da perda de resistência à tração é a orientação dos anéis de crescimento, já que ao emendar longitudinalmente não é possível evitar que parte do lenho tardio de uma peça (que apresenta maior resistência), seja emendado ao lenho inicial de outra (LOUW, 1969 citado por MACÊDO, 1996).

A madeira que apresenta medula ocasiona uma baixa resistência à tração das emendas dentadas de acordo com o estudo efetuado por Moody (1970) apud Carrasco (1989). A média da resistência à tração das emendas com madeira sem medula foi maior do que as emendas contendo medula, em torno de 34%. Segundo o autor, metade dessa diferença pode ser atribuída aos efeitos da qualidade e da densidade do material e a outra metade à baixa resistência da madeira com medula.

2.4.2 Parâmetros Geométricos

A geometria da emenda dentada é considerada a variável mais crítica na determinação da resistência da emenda. O desempenho da emenda dentada depende de quatro variáveis interdependentes: comprimento, largura do dente, largura da ponta do dente e inclinação (FISSETTE, 1988). A Figura 2 ilustra a geometria das emendas dentadas.

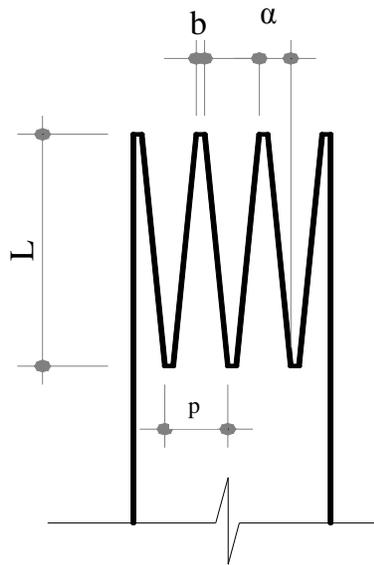


Figura 2 - Parâmetros geométricos das emendas dentadas

L: Comprimento do dente;
 p: largura do dente;
 b: largura da ponta do dente;
 α : inclinação do dente

De acordo com Jokerst (1981), as emendas dentadas podem ser consideradas como uma série de pequenas emendas biseladas, separadas por uma pequena largura nas extremidades dos biséis. As pontas dos dentes se comportam como uma série de emendas de topo e são catalogadas como regiões de enfraquecimento da emenda. Em adição, pela transferência de tensões para as partes inclinadas dos dentes, as pontas causam indesejáveis concentrações de tensões na madeira da vizinhança. A largura da ponta deve ser, portanto, tão pequena quanto possível.

A inclinação das porções biseladas dos dentes influenciam diretamente a resistência da

emenda dentada, uma vez que a maior parte da resistência deste tipo de emenda longitudinal é desenvolvida principalmente nas partes biseladas dos dentes. Um ajuste fechado destas é necessário para obterem-se resultados ótimos de colagem. Segundo Lown (1969) apud Macêdo (1996), o melhor resultado é obtido através do corte de pontas um pouco mais largas do que as aberturas correspondentes, garantindo deste modo o ajuste total nos flancos quando a pressão de colagem é aplicada.

Strikler (1980) assinala que a inclinação da superfície lateral dos dentes tem um efeito semelhante na resistência da emenda comparada com o efeito da inclinação nas emendas biseladas. As pontas dos dentes são consideradas de resistência zero, mesmo se estes são espessos e devidamente colados. Estas pontas desenvolvem indesejáveis concentrações de tensões que tem efeito negativo sobre a resistência da emenda.

Hernandez (1998) cita a relação dos parâmetros geométricos com a força da emenda, estabelecendo que ao decrescer a inclinação dos dentes a força resistente da emenda aumenta, sendo que o parâmetro geométrico com influência mais perceptível nessa força é a largura da ponta do dente. Quanto menor for essa dimensão mais forte é a emenda dentada. Partindo deste fato, foram gerados estudos com a finalidade de projetar emendas dentadas mais fortes, obtendo as emendas denominadas *feather-tipped fingers*.

Ayarkwa et al. (2000), ao avaliar o efeito da geometria do dente nas propriedades de flexão da madeira laminada colada em três espécies tropicais africanas, determinaram que o perfil do dente tem uma influência estatisticamente significativa no módulo de ruptura. Fato que pode estar relacionado com uma maior área eficaz de cola. O que corrobora com informações mencionadas por Selbo (1963) apud Jokerst (1981), assinalando que para obter uma força comum elevada, os dedos devem ser suficientemente longos com uma inclinação suficientemente baixa, fornecendo uma área eficaz na emenda colada. Ao estudar os efeitos de três larguras de ponta (0,045, 0,090 e 0,135 polegadas) seis inclinações (1:6, 1:8, 1:10, 1:12, 1:14 e 1:16), e seis larguras de dente (3/16", 1/4", 5/6", 3/8", 7/16" e 1/2") em três espécies de madeira, apresentaram as seguintes conclusões:

- A resistência da emenda dentada aumenta com a diminuição da inclinação;
- Aumentando a largura dos dentes e mantendo a inclinação e a largura da ponta constantes, a resistência da emenda geralmente aumenta, já que o acréscimo da largura do dente implica em maior comprimento e conseqüentemente em maior área efetiva de cola;
- Existe uma correlação direta entre a resistência e a área efetiva de cola, para obter alta resistência da ligação. Os dentes devem ser suficientemente longos e a inclinação baixa, o suficiente para gerar uma área efetiva de magnitude adequada para resistir aos esforços que se aproximam da resistência à tração da área efetiva da seção;
- A largura da ponta vem a ser o fator decisivo na consideração da resistência da emenda. Quanto mais fina a ponta maior será a resistência.

Page (1959) apud River, Vick e Gillespie (1991), estudou o efeito da inclinação dos dentes na resistência da emenda dentada trabalhando com largura e ponta do dente constante. O autor observou que pequenas reduções na inclinação de 1:8 ou 1:9 resultam em um marcante incremento na resistência da emenda. Constatou também que uma redução maior na inclinação, equivalente a 1:12, foi apenas um pouco mais resistente. Esses acréscimos eram esperados uma vez que a redução da inclinação gera um acréscimo da área efetiva de cola da emenda.

Jorkest (1981), assinala que o potencial da resistência ou desempenho de uma emenda dentada é dada em função da inclinação, largura, comprimento e largura da ponta dos dentes. Sendo esses quatro parâmetros interdependentes, de forma que a mudança de uma das dimensões ocasionará mudança nas outras.

A orientação da emenda dentada com relação à largura e a espessura de uma peça é outro fator que pode afetar o desempenho desta. Na Europa a orientação vertical é a mais utilizada, enquanto nos Estados Unidos, Canadá e Austrália utiliza-se a horizontal.

Pesquisas desenvolvidas estabeleceram que a orientação vertical é levemente mais resistente que a horizontal, o qual é atribuído à existência de uma área de colagem maior. Jorkest (1981) atribuiu o melhor desempenho das emendas verticais na flexão e tração ao fato de que nas emendas horizontais os dois dentes externos transmitem a maioria da carga, criando uma situação

crítica. Isso não acontece nas emendas de orientação vertical, pois as tensões são distribuídas uniformemente em todos os dentes da emenda.

Marin (2006), ao analisar os resultados dos ensaios de tração para peças de madeira com emendas dentadas, coladas com o adesivo Cascophen, concluiu que não existiu diferença significativa entre as duas orientações, sendo levemente superior a resistência à tração no dente vertical.

2.4.3 Procedimento de Usinagem

O comportamento da emenda dentada depende em grande parte do processo de produção, sendo que a operação de usinagem deve ser feita da melhor maneira possível em procura de uma superfície de qualidade o que influencia na resistência da emenda dentada.

As superfícies lisas, secas e sem danos são consideradas as condições necessárias para obter emendas dentadas de resistência ótima, onde o processo de corte dos dentes constitui um aspecto crítico. Isso depende das características próprias da madeira e do estado da ferramenta de corte quando bem afiado produz superfícies excessivamente lisas que são difíceis de colar devido ao atrito reduzido no plano de cola. Isso provoca desajuste das emendas devido ao efeito combinado do escorregamento da superfície de cola e a pressão hidráulica gerada pelo excesso de adesivo na emenda. Após um desgaste inicial, os cortadores apresentam um perfil de corte mais ou menos constante por um longo período, produzindo superfícies mais rugosas e retas melhorando o atrito na linha de cola e conseqüentemente possibilitando emendas mais resistentes (MACEDO, 1996).

2.4.4 Colagem

A qualidade da colagem pode ser afetada por fatores relativos à madeira (substrato), pelas características próprias do adesivo e pelo processo da colagem.

2.4.4.1 Características da Madeira

- Densidade da Espécie

A densidade é considerada como um bom indicador da facilidade da colagem, sendo que o acréscimo desta dificulta a obtenção de uma ligação de alta qualidade, fato relacionado com os seguintes fatores:

- Maior probabilidade de presença de extrativos, os quais interferem na adesão;
- Interligação mecânica reduzida entre madeira e adesivo;
- Maiores tensões de retração e inchamento;
- Dificuldade de obtenção de superfície de união adequada, mesmo com aplicação de maiores pressões.

Ruysch (1980) apud Macêdo (1996) assinala que sob condições práticas é quase impossível produzir emendas dentadas confiáveis em madeiras com massa específica superior a 0.65g/cm^3 (a um teor de umidade de 14%).

Henriques, Calil Jr. e Chierice (2002) recomendam para madeiras com densidade inferior ou igual a 0.5 g/cm^3 utilizar uma pressão de colagem na linha de cola igual a 0.7 MPa e para madeiras de densidade superior a $0,5\text{g/cm}^3$, pressão igual a 1,2 MPa.

Carmona, Espinoza e Bull (1998) estudaram o comportamento mecânico das emendas dentadas em função das variações de densidade presentes na madeira de *Pinus radiata* utilizando 2 tipos de adesivos, acetato de polivinila (PVA) e resorcinol formaldeído. Determinaram o esforço de ruptura e a qualidade da aderência, mediante ensaios de cisalhamento para uniões laminadas e tração para emendas dentadas; para três classes de densidades, baixa ($0,430\text{--}0,471\text{ g/cm}^3$), média ($0,476\text{--}0,509\text{ g/cm}^3$) e alta ($0,522\text{--}0,570\text{ g/cm}^3$). Os resultados indicaram a influência da densidade da madeira na encolabilidade, apresentando-se um aumento significativo da resistência com o incremento da densidade, concordando com o assinalado por Bassett (1960), Skeist (1966), Poblete (1978) apud os autores; segundo os quais as menores resistências das

emendas ocorreram na madeira de densidades mais baixas, fato atribuído a que o adesivo foi absorvido na sua totalidade gerando uniões pobres.

No caso das madeiras com densidades altas se produz também uniões fracas devido à má transferência do adesivo entre os substratos. Além disso, as tensões geradas pelas variações dimensionais são suportadas pelas uniões coladas determinando a ruptura na linha de cola antes que no substrato. Mediante análises qualitativas da linha de cola concluíram que a penetração do adesivo é superior na madeira de primavera que na madeira de verão, indiferentemente da densidade. Blomquist (1983) apud Carmona, Espinoza e Bull (1998), assinala que a penetração do adesivo incrementa a resistência da união, já que proporciona uma zona de transição com propriedades mecânicas intermediárias entre as do adesivo e as da madeira, requerendo de 2 a 6 células de profundidade. A regularidade da penetração é importante para uma união forte. No caso de penetração irregular a resistência da união pode-se reduzir apresentando falha no lugar onde tem menos adesivo ou onde este penetra de maneira insuficiente.

No estudo desenvolvido por Ayarkwa, Hirashima e Sasaki (2000) ao avaliar o efeito do tipo de cola nas propriedades de flexão e tração, determinou que o desempenho da emenda se encontra relacionado com a densidade da madeira, exibindo maior eficiência na espécie de menor densidade ($0,351\text{g/cm}^3$), eficiência moderada na espécie de densidade média ($0,677\text{g/cm}^3$) e menor eficiência na espécie de alta densidade ($0,819\text{g/cm}^3$).

- Teor de umidade

O teor de umidade pode afetar significativamente as propriedades das ligações adesivas, de acordo com o citado por Selbo, 1975 apud Jokerst (1981). A adesão entre a cola e a madeira pode ser afetada negativamente se a madeira estiver excessivamente seca e um excesso de umidade ocasiona fluxo do adesivo da linha de cola para dentro da madeira, gerando ligações deficientes.

A diferença no teor de umidade entre as duas partes da emenda deve apresentar uma variação de 4% a 5%. Para Louw, 1964 apud Jokerst (1981) o teor de umidade da emenda deve

ser aproximado àquele que a madeira alcançará em serviço. Segundo Morkved (1982) apud Bustos (2003), qualquer diferença de umidade entre as partes da emenda induzirá acréscimos de tensões na linha de cola devido ao movimento que ocorre na emenda quando o teor de umidade é nivelado. Por isso torna-se necessário o estabelecimento de um limite admissível para a diferença de umidades.

Jorkest (1981) considera que uma melhor aderência é obtida entre 6 e 17% de umidade. Com alguns tipos e formulações de adesivos é possível sair desse intervalo variando os limites de umidade. Têm se feito emendas experimentais satisfatórias com resorcinol e madeiras com um teor de umidade perto do ponto de saturação das fibras e caseína e madeira com baixo teor de umidade. O problema usual encontrado na aderência da madeira com elevado teor de umidade é que o adesivo é absorvido pela madeira enfraquecendo a emenda. Além disso, ao usar energia para a cura do adesivo, esta vai ser investida no aquecimento da água contida na madeira e não no aquecimento do adesivo, tendo como resultado uma baixa cura da cola. Strickelr (1980) e Raknes (1982) apud Bustos (2003), reportaram emendas feitas com madeira cujo conteúdo de umidade se encontrava perto do 20%. Efetuaram aquecimento com o objeto de acelerar a cura do adesivo, obtendo excelentes resultados na resistência e durabilidade das emendas. Ao acelerar o processo de cura reduziu-se a penetração da resina.

2.4.4.2 O adesivo

O termo adesivo é usado para os produtos que tem propriedades de unir materiais através de substâncias químicas à base de polímeros. A palavra é genérica servindo tanto para colas extraídas de origem animal (gorduras, sebos) ou resinas de origem vegetal. O mercado madeireiro acostumou-se a chamar de adesivo especialmente os produtos utilizados na união de materiais.

A American Society for Testing and Materials (ASTM, 1994) define o adesivo como uma substância capaz de unir materiais através do contato entre suas superfícies. As condições físicas e químicas da superfície durante a adesão são extremamente importantes para que ela tenha um desempenho satisfatório, uma vez que o adesivo tem que umedecer e espalhar-se livremente nas superfícies para que se estabeleça um contato íntimo entre elas.

Tecnicamente o adesivo age como um aglomerante, cuja função é realizar entre as fibras uma ligação mecânica o mais próxima possível da ligação existente naturalmente. Quimicamente os grupos oxidrilas livres das cadeias de celulose da madeira se unem por pontes de hidrogênio com os grupos de oxidrilas livres do adesivo. O mesmo princípio acontece na união entre as cadeias de celulose da madeira, onde as oxidrilas livres de cadeias de celulose adjacentes se unem diretamente umas às outras por pontes de hidrogênio, ou mediante moléculas de água, caso a madeira possua algum teor de umidade (RIVER; VICK; GILLESPIE, 1991).

Segundo o citado por Azambuja (2006) o adesivo deve ser capaz de: fluir ou se espalhar na superfície a ser colada, transferir-se para a outra superfície que está sendo colada; solidificar por evaporação, resfriamento ou reação química e minimizar o custo do produto final.

No processo de escolha do adesivo devem ser levados em conta os seguintes parâmetros:

- O tipo de esforço em que a colagem estará sujeita em serviço;
- O tipo de agente químico que pode reagir com a colagem;
- O tipo de exposição que a colagem terá.

Os fatores que tem importância no endurecimento do adesivo são:

- Tempo de cura: Depois de ter aplicado o adesivo sobre a madeira transcorre um período de tempo, até ocorrerem as condições de cura, sob pressão ou pressão e temperatura. Esse período se compõe de duas partes, tempo de união aberto (entre a aplicação e união das superfícies), e o tempo fechado (entre a reunião das superfícies e a cura). Neste período o adesivo começa a se endurecer, e de acordo com as características técnicas, este tempo tem que ser regulado. Se o tempo de união excede os limites máximos e mínimos permitidos pelo adesivo, este não será capaz de formar uma boa união.

- Pressão: A aplicação da pressão é em alguns casos o único fator externo ao adesivo e à madeira, usado para lograr a união, dita pressão deve permanecer durante grande parte da cura. A produção de uma boa aderência pode ser inferida pela observação da união. Em um completo

contato entre as superfícies o ar e parte do adesivo que ficava na zona de contacto das partes saem pelas laterais da linha de cola, produzindo-se uma linha de união fina e de igual espessura em toda a superfície a unir.

Carrasco (1989), em um estudo sobre vigas laminadas fez as seguintes considerações respeito da pressão de colagem:

-A aplicar carga de pressão antes da cura do adesivo se produz uma melhor penetração do adesivo nos poros da madeira, eliminando as bolhas de ar existentes na interface adesivo-madeira, o que contribui à formação de uma película delgada, e uma ligação adesiva resistente.

-A pressão de colagem tem influência muito grande nas ligações adesivas à base de PVA, a qual se deve em parte à alta viscosidade do adesivo que necessita de pressão externa para que possa penetrar nos poros da madeira. A ausência de pressão provoca uma sensível queda na resistência da linha adesiva. O adesivo à base de resorcinol apresenta uma resistência razoável na ausência de pressão devido à maior fluidez e penetração nos poros da madeira. A falta de pressão durante a cura das peças de madeira ocasiona menor penetração do adesivo e formação de uma película mais espessa e uma pressão muito elevada provoca uma penetração excessiva do adesivo na madeira, enfraquecendo a película adesiva e diminuindo a sua resistência.

No caso das emendas dentadas a pressão é necessária para garantir o contato mais próximo possível entre as superfícies dos dentes a serem colados, e uma distribuição uniforme do adesivo, Tsoumis (1991) citado por Ayarkwa et al. (2000) assinala que o grau e duração da pressão dependem do tipo de viscosidade do adesivo, da espécie da madeira (densidade e resistência à compressão), tipo de junção e uso do produto colado. Uma maior pressão gera uma trava mais eficiente, tomando a precaução de não ocasionar danos tais como rachar a base do dedo, causar falha de compressão da madeira e espremer fora a cola.

Ao aplicar-se pressão na emenda dentada, os dentes externos tendem a se destacar da peça. O que resulta em uma linha de cola compacta e uma emenda de baixa resistência, já que nas superfícies externas a concentração de tensão é elevada, o que reduz a resistência da peça. Tal

fato pode ser controlado com a aplicação de uma pressão lateral no momento da colagem ou com uma nova usinagem da peça, eliminando os dentes externos mal colados (MARIN, 2006).

Segundo Strickler (1980), para ensaios de tração paralela em emendas dentadas é recomendada uma pressão de colagem entre 7 a 8,4 MPa para madeiras de coníferas, e de 10,5 a 12,6 MPa, para as folhosas.

As emendas dentadas devem ser coladas sob pressão que depende do comprimento do dente e da densidade da madeira, observando que a pressão empregada não exceda o limite que provoque fissura de extensão superior a 0,5 cm no fundo dos dentes. Fiorelli; Dias e Azambuja (2004) indicam as pressões sob as quais devem ser coladas as emendas em função da densidade da madeira e o comprimento do dente como registrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Pressão de Colagem em função da densidade da madeira e do comprimento do dente (Ld)

L _d (mm)	Pressão de colagem (MPa)	
	Densidade ≤ 0,50 g/cm ³	Densidade > 0,50 g/cm ³
10	12	14
20	8	10
30	6	8
40	4,5	6,5
50	3	5
60	2	4

Fonte: Fiorelli, Dias e Azambuja (2004)

De acordo com Macedo (1996), a pressão de colagem utilizada em emendas dentadas coladas com o adesivo Cascophen foi da ordem de 8 kN/mm² para o *Pinus caribaea hondurensis* e de 10 kN/mm² para o *Eucalyptus grandis*. Segundo Henriques; Calil Jr. e Chierice (2002), a pressão de colagem para *Pinus caribaea hondurensis* foi de 9 kN/mm² e para o *Eucalyptus grandis* foi de 10 kN/mm² nos teste efetuados com o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.

• Temperatura: Alguns adesivos requerem temperaturas superiores às do meio ambiente para produzirem uma união de características ótimas. O efeito de elevar temperaturas se traduz na redução da tensão superficial, para facilitar a penetração do adesivo na madeira. Além disso, produz a evaporação do portador e acelera as reações físico-químicas que conduzem à cura do adesivo. O uso de pressão conjuntamente com temperatura apresenta uma série de vantagens, comparados com o uso de somente pressão, dentre as quais podem ser citadas a redução do tempo de prensagem e a possibilidade de aplicar uma menor quantidade de adesivo.

A norma ASTM D 4688-99 Standard Test Method for Evaluating Structural Adhesives for Finger Jointing Lumber, define critérios para a avaliação de adesivos estruturais aplicados em emendas dentadas para madeira laminada colada. Os corpos-de-prova devem ser submetidos a três tratamentos distintos:

- Dry test onde os corpos-de-prova devem estar com o teor de umidade em equilíbrio com o ar em torno do 12%, definido como seco;

- Cold Water Vacuum-pressure soak test onde os corpos-de-prova devem ser introduzidos na autoclave de vácuo-pressão e mantidos com vácuo inicial de 25" de Hg durante 30 minutos. Logo após, devem ser mantidos submersos em água na temperatura ambiente, com uma pressão de 2 MPa, durante 2 horas. Depois disso devem ser removidos da autoclave e mantidos submersos na água à temperatura ambiente até serem testados.

- Cyclic boil test onde corpos de prova devem ser introduzidos em um caldeirão de fervura, de modo que a água tenha acesso livre a todas as superfícies. Depois devem ser fervidos por 4 horas e em seguida, secos em climatizadora com circulação de ar para um índice de umidade de 8% entre 18 e 20 horas. O ciclo de ferver e secar deve ser repetido por 5 vezes, exceto durante o último ciclo, no qual os corpos-de-prova, após a fervura devem ser mantidos submersos na água, e resfriados até atingir a temperatura ambiente, para serem testados.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Espécies de madeira

Para o desenvolvimento da pesquisa foram empregadas as espécies *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii* que são amplamente utilizadas em reflorestamentos e que apresentam grande potencial para uso em estruturas.

•*Eucalyptus grandis*

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).

A madeira de *Eucalyptus grandis* é destinada principalmente para indústrias celulósicas e energéticas e em menor quantidade para painéis e postes, sendo muito mais 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).

Segundo Lopes (2007), a produção de *Eucalyptus grandis* no Brasil está relacionada com a sua excelente resposta silvicultural, boa forma e rápido crescimento, além das propriedades desejáveis para diversos usos, como a massa específica, grã direita e fácil trabalhabilidade.

De acordo com Silva (2005) esta 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.

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 e por isso a adequação de espécies de rápido crescimento para suprir a demanda que recai sobre as florestas nativas é necessária. O *Eucalyptus grandis* surge 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.

•*Pinus elliottii*

As espécies do gênero *Pinus* foram introduzidas no Brasil há mais de um século, para diversas finalidades. Em 1936 iniciou-se a introdução de *Pinus* com fins silviculturais e em 1948 o Serviço Florestal do Estado de São Paulo introduziu as espécies americanas conhecidas como pinheiros amarelos que incluem o *P. palustris*, *P. echinata*, *P. elliottii* e *P. taeda*, destacando-se as duas últimas pela facilidade nos tratamentos culturais, rápido crescimento e reprodução intensa, principalmente no sul e sudeste do Brasil (SHIMIZU, 2006).

O *Pinus* está sendo usado em grande proporção nas indústrias madeireiras e nas produtoras de celulose e papel no Brasil. Segundo Serpa e Vital (2005), das empresas que utilizam *Pinus* nos seus processos produtivos, 48% concentram-se na indústria de madeira serrada, 29% em celulose e papel e 18% em painéis compensados, chapas e MDF. Uma característica adicional e importante da espécie *P. elliottii* é sua alta produção de resina, viável quanto à exploração comercial e pode ser conduzida paralelamente à produção de madeira serrada.

Segundo dados da Sociedade Brasileira de Silvicultura, em 2007 existiam mais de 1,8 milhões de hectares plantados com *Pinus*, dos quais, mais da metade (57,6%) localizavam-se nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná.

A Tabela 3 mostra os valores médios da massa específica e de propriedades mecânicas das madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii* dadas pela NBR 7190/97.

Tabela 3 - Valores médios de propriedades físicas e mecânicas da madeira de espécies plantadas

Nome comum	Nome científico	$\rho_{ap(12\%)}$ kg/m ³	f_{c0} MPa	f_{t0} MPa	f_{t90} MPa	f_v MPa	E_{c0} MPa
<i>E. grandis</i>	<i>Eucalyptus grandis</i>	640	40,3	70,2	2,6	7,0	12813
<i>P. elliottii</i>	<i>Pinus elliottii</i> var. <i>elliottii</i>	560	40,4	66,0	2,5	7,4	11889

Fonte: NBR 7190/97

$\rho_{ap(12\%)}$: 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 empregada na fabricação dos corpos-de-prova foi fornecida pelo Laboratório de Máquinas e Engenharia da Madeira pertencente ao Departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

Foram usadas as duas espécies citadas, em ensaios de cisalhamento e apenas o *Eucalyptus grandis* em ensaios de tração e flexão simples.

3.2 Adesivos

Os adesivos usados na colagem dos corpos-de-prova foram o Adespec (Fundo preparador para junta de placa cimentícia), Cascorez, Cascophen e Wonderbond.

3.2.1 Fundo preparador para junta de placa cimentícia ADESPEC

Adesivo monocomponente composto à base de elastômeros, de alto desempenho não inflamável, incolor e atóxico.

Esse adesivo foi originado para fixar e unir todos os materiais de construção, sendo considerado como um produto ecologicamente correto, já que, sendo isento de solventes orgânicos inflamáveis não emite voláteis no ambiente. O adesivo não requer ambientes especiais para aplicações, resiste a temperaturas altas e baixas e tem característica impermeabilizante.

O adesivo torna-se transparente após a cura e não causa manchas indesejadas na madeira, é flexível quando a cura ocorre à temperatura ambiente (30°C), mas torna-se rígido quando a cura ocorre perto dos 60°C. O maior impedimento para o uso desse adesivo está relacionado com o alto custo e às incertezas quanto ao comportamento estrutural que ainda permanecem por desconhecimento da sua rigidez.

Segundo Melotto (2007), o Adespec foi desenvolvido dentro do CIETEC (Centro Incubador de Empresas Tecnológicas), criado por um convênio entre IPEN, IPT, USP, Sebrae-SP e a SCTDET (Secretaria de Estado de Ciência, Tecnologia, Desenvolvimento econômico e Turismo).

3.2.2 Cascorez

Adesivo em forma de emulsão aquosa à base de poliacetato de vinila (PVA), homopolímero isento de formaldeído e aplicável em artefatos de madeira e materiais porosos em geral.

Carateriza-se como um líquido leitoso branco, viscoso, livre de materiais estranhos e de odor característico de acetato de vinila. O filme seco é levemente esbranquiçado, rígido e de baixa resistência à umidade.

O processo de cura pode-se dar em prensa quente ou prensa fria. O uso de prensagem por frequência não é recomendável para madeiras de alta densidade e o período entre a montagem das peças e a prensagem não deve ultrapassar cinco minutos para evitar-se uma secagem precoce do adesivo. As condições de prensagem estão apresentadas na Tabela 4 (ALBA QUIMICA, 2007a).

Tabela 4 - Condições de prensagem para colagem com o adesivo Cascorez

Tipo de prensa	Temperatura de trabalho (°C)	Substrato	Pressão (kg/cm ²)	Tempo de prensagem (minutos)	Tempo de cura após prensagem (mínimo de horas)
Fria	Acima de 12	Laminado Decorativo	4 a 6	30 a 120	12
		Laminação com madeira	6 a 10	30 a 60	
		Estruturas Multilaminadas	10 a 15	30 a 120	24
		Laminado Decorativo	4 a 6	1 a 3	3
Quente	Entre 50 e 90	Laminação com Madeira	6 a 10	1 a 3	12
		Estruturas Multilaminadas	10 a 15	Distancia até a linha de cola mais profunda, em mm, transformada em minuto mais 10%.	

Fonte: Alba Química (2007a), adaptada

3.2.3 Cascophen

O Cascophen RS é um adesivo líquido sintético à base de resorcinol-formol em solução aquoso-alcoólica. Apresenta dois componentes sendo um a resina de cor marrom avermelhada e o outro o endurecedor que se apresenta na forma de pó bege. Os dois componentes, depois de misturados, resultam em uma “cola” de alto desempenho à prova d’água, resistente a diversos solventes orgânicos, fungos e intempérie.

O Cascophen RS é indicado para colagens de materiais para trabalhos navais, aeronáuticos, hidráulicos e outros que poderão ser expostos à ação da água e intempérie. 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 de 4 horas a 20°C.

A aplicação do adesivo pode ser feita com pincel ou escova para pequenos serviços ou com passadeira de cola em superfícies grandes. O tempo para início da montagem das partes é de 10 a 15 minutos. A adição de 5 a 10 % de álcool etílico é recomendada apenas quando a cola estiver grossa por evaporação do solvente e/ou quando houver necessidade de melhorar a penetração da cola em algumas madeiras duras.

Deve-se manter a pressão das peças coladas até a cura do adesivo que é de aproximadamente 10 horas; o tempo necessário para que o adesivo atinja sua resistência máxima é de 8 dias (ALBA QUIMICA, 2007b).

3.2.4 Wonderbond

O Wonderbond EPI EL-70 é um adesivo em emulsão polimerizada com isocianato fluido, livre de materiais estranhos e utilizado para colagens de artefatos de madeira que exijam alto desempenho, alta resistência térmica e alta resistência à água. Uma de suas aplicações é na fabricação de madeira laminada colada. É diluído em água, isento de formaldeído e deve ser utilizado com um catalisador/endurecedor.

O adesivo é preparado com Wonderbond EPI EL-70 (base) juntamente com o endurecedor Wonderbond EPI WS 742. Na preparação da mistura, deve-se evitar a má dispersão do catalisador e envelhecimento precoce do adesivo catalisado. A mistura do catalisador/base deve ser realizada em frascos apropriados, isto é, aço inox ou plástico com agitação.

As superfícies a serem coladas devem estar limpas, perfeitamente planas e secas, com teor de umidade entre 8 e 12%. Uma vez aplicado o adesivo as partes devem ser juntadas imediatamente, para evitar a secagem precoce do adesivo. Deve-se mantê-las sob pressão até sua completa secagem. É recomendada a utilização do adesivo preparado nos primeiros 20 minutos depois de ser catalisado. O tempo necessário para que o adesivo atinja sua resistência máxima é de 7 dias (HEXION, 2006).

3.3 Resistência ao Cisalhamento no plano de cola

Foram desenvolvidos dois ensaios de cisalhamento em corpos-de-prova especiais para determinarem-se propriedades que são importantes no cálculo e execução de vigas laminadas coladas.

3.3.1 Resistência ao cisalhamento no plano de cola paralelo às fibras em corpos-de-prova colados com os adesivos Cascorez, Cascophen e Wonderbond

Com o objeto de estabelecer o comportamento dos três adesivos citados efetuaram-se ensaios de cisalhamento no plano de cola, usando um total de 30 corpos-de-prova, sendo 15 para cada espécie, com cinco repetições para cada tratamento.

O processo de confecção e colagem dos corpos-de-prova para os ensaios de cisalhamento assinalados foi efetuado de maneira comum, apresentando-se pequenas mudanças relativas às exigências dos adesivos, as quais são especificadas nos itens correspondentes.

3.3.2 Resistência ao cisalhamento, em função do ângulo de inclinação do plano de cola em corpos-de-prova colados com os adesivos Adespec e Cascorez

Efetuaram-se ensaios em 50 corpos-de-prova maciços denominados controle, com a finalidade de estabelecer os valores máximos de tensão de cisalhamento para cada espécie estudada. Foram feitos ensaios em 100 corpos-de-prova colados para cada uma das espécies, envolvendo 10 ângulos de inclinação do plano de cola em relação à direção das fibras, 2 adesivos e cinco repetições para cada tratamento avaliado. Foram estudados os ângulos 5°, 10°, 15°, 20°, 30°, 45°, 60°, 75°, 80° e 90°.

3.3.3 Confeccção dos corpos-de-prova para ensaios de cisalhamento

As dimensões dos corpos-de-prova empregados nos testes de cisalhamento foram reduzidas em relação às estabelecidas pela Norma Brasileira NBR 7190/97 (Figura 3). Tal adaptação foi adotada para permitir economia de matérias primas, já que foi assumida a hipótese de que a simples redução de área não prejudica os resultados de cisalhamento.

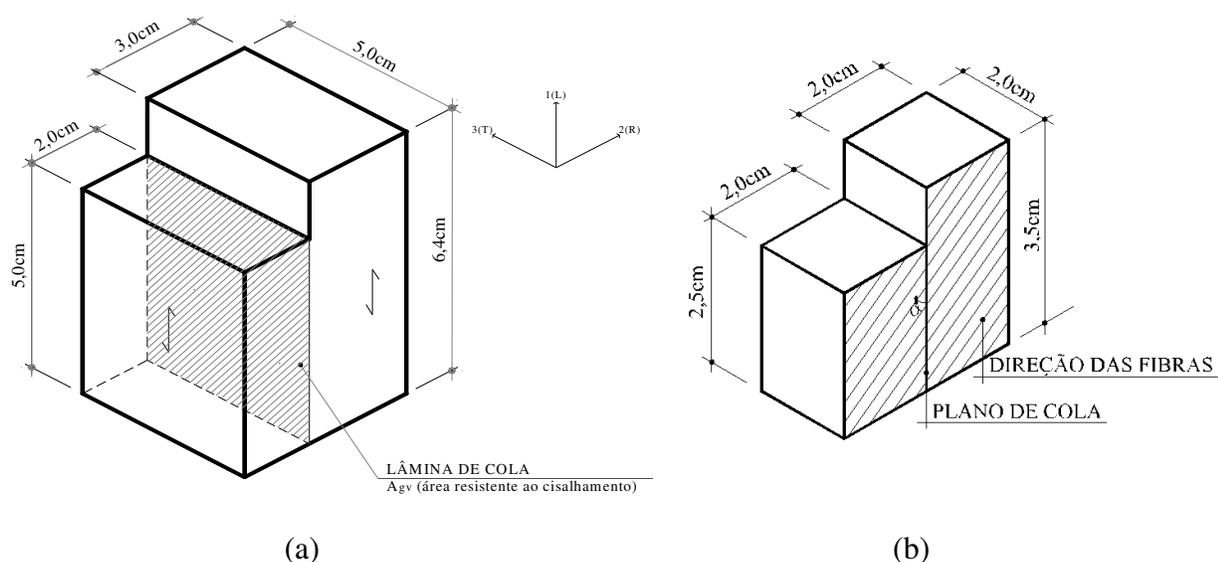


Figura 3 – Corpo-de-prova para o ensaio de cisalhamento segundo a NBR 7190/97 (a) e adaptado (b)

Os corpos-de-prova foram obtidos de peças de madeira de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii* previamente maquinados com dimensões 2,0 x 6,0 x 32 cm (Figura 4), submetidos à secagem natural até atingir um teor de umidade média de 12%. Efetuou-se uma avaliação visual das diferentes peças de madeira a serem utilizadas excluindo-se aquelas com defeitos como nós e rachaduras.

A orientação da grã foi feita a olho nu, efetuando-se a marcação desta direção com uma reta e adotando-a como eixo principal. Partindo deste eixo, foram determinadas as linhas de corte para os dez ângulos de inclinação citados no item 3.3.2 (Figura 5). Esses ângulos foram estabelecidos com o objetivo de simular as diferentes inclinações dos planos de cola que podem ocorrer nas emendas dentadas e entender melhor o fenômeno da ruptura para ângulos considerados grandes.

Uma vez estabelecida a linha de corte em cada uma das peças empregadas para a obtenção dos corpos, efetuaram-se os cortes destas em serra circular como se mostra na Figura 6(a), dando-se o dimensionamento na largura de 4,0 cm para os corpos-de-prova de controle e 2,0 cm para os corpos-de-prova a encolar. As peças já dimensionadas em largura foram cortadas transversalmente em uma destopadeira circular para a obtenção do comprimento requerido para a montagem de corpos-de-prova dos ensaios de cisalhamento, como se observa na Figura 6(b).



Figura 4 – Amostras de *Eucalyptus grandis* (a) e *Pinus elliottii* (b) usadas para obtenção de corpos-de-prova de cisalhamento

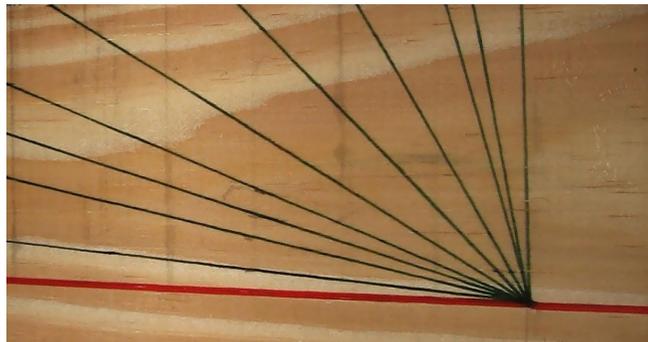


Figura 5 - Eixo principal (em vermelho) orientado longitudinalmente e linhas de corte (em verde) orientadas segundo os ângulos de 0° a 90°



Figura 6 – Corte de regularização da largura dos corpos-de-prova corte em serra circular (a) e corte transversal do ajuste do comprimento em uma serra circular destopadeira (b)

3.3.4 Procedimento de colagem

Para a determinação da resistência ao cisalhamento no plano de cola em corpos-de-prova colados com os adesivos Cascorez, Cascophen e Wonderbond, efetuou-se a colagem dos corpos-de-prova sorteando-se aleatoriamente a ordem dos 6 tratamentos. Na Tabela 5 exibe-se o cronograma de colagem das amostras do ensaio.

Tabela 5 - Cronograma do processo de colagem com os adesivos Cascorez (ca), Cascophen (cp) e Wonderbond (wd) com plano de cola paralelo às fibras

Dia	<i>Pinus elliottii</i>						<i>Eucalyptus grandis</i>					
1	1ca	1cp	1wd				1ca	1cp	1wd			
2	2ca	2cp	2wd	3ca	3cp	3wd	2ca	2cp	2wd	3ca	3cp	3wd
3	4ca	4cp	4wd	5ca	5cp	5wd	4ca	4cp	4wd	5ca	5cp	5wd

Para a determinação da resistência ao cisalhamento em corpos-de-prova colados com os adesivos Adespec e Cascorez com dez ângulos de inclinação do plano de cola, foram colados 10 corpos-de-prova por dia, utilizando-se um total de 20 dias. Os tratamentos foram montados de maneira aleatória como apresentado na Tabela 6 na qual se indicam os ângulos de inclinação do plano de cola, numerados de 1 a 10 correspondendo 5° ao número 1 e 90° ao número 10 e os tipos de adesivos utilizados Adespec e Cascorez.

Tabela 6 - Cronograma do processo de colagem com os adesivos Adespec (ad) e Cascorez (ca) e ângulos de inclinação do plano de cola 5°,10°,15°,20°,30°,45°,60°,75°,80° e 90° representados respectivamente pelos números 1 a 10

Dia	<i>Pinus elliottii</i>					<i>Eucalyptus grandis</i>				
1	9ca	2ad	3ad	8ad	9ad	9ad	8ca	1ca	4ad	6ca
2	3ca	10ca	6ca	6ad	7ad	6ad	1ad	7ca	8ca	2ca
3	4ad	4ca	2ca	7ad	6ad	3ad	2ad	8ad	9ad	6ad
4	4ca	5ad	8ca	10ca	1ca	2ad	5ca	10ad	1ca	8ad
5	8ca	7ad	3ca	4ca	6ca	9ad	3ad	7ca	6ad	2ca
6	1ca	1ca	4ad	9ca	2ca	5ad	10ad	8ca	3ad	9ca
7	8ad	1ad	10ca	4ad	2ad	3ca	4ca	6ca	10ca	7ad
8	8ca	9ad	1ad	8ad	5ca	5ad	8ca	10ad	10ca	7ad
9	3ca	7ad	5ad	1ca	2ad	10ad	1ad	5ca	10ca	4ca
10	6ca	7ca	10ad	5ca	3ad	1ad	7ca	8ad	9ca	7ad
11	2ca	7ca	5ca	9ca	9ad	5ca	4ca	4ad	5ad	10ca
12	5ad	7ca	2ca	5ca	3ad	7ad	6ca	5ad	3ca	2ca
13	1ad	5ca	2ca	10ca	6ad	10ca	3ad	5ad	3ca	9ad
14	9ad	4ca	6ad	10ad	2ad	9ca	1ad	9ad	5ca	3ca
15	7ca	3ad	7ca	3ca	5ad	4ad	2ad	9ca	1ca	8ad
16	8ca	10ad	4ca	6ad	6ca	10ad	4ad	2ca	6ad	1ca
17	10ad	1ad	9ca	8ad	4ad	8ad	6ad	6ca	7ca	3ad
18	4ad	3ad	1ad	9ad	10ca	2ad	1ca	4ad	4ca	9ca
19	9ca	8ad	6ca	10ad	8ca	5ca	4ca	6ca	2ad	8ca
20	7ad	3ca	5ad	1ca	2ad	7ad	3ca	2ca	7ca	1ad

O adesivo foi aplicado em uma das superfícies a serem coladas, sendo espalhado com pincel, em uma quantidade de 250 g/m². No caso dos adesivos Adespec, Cascorez e Wonderbond as duas partes componentes do corpo-de-prova foram juntadas imediatamente à aplicação do adesivo. Na colagem com o adesivo Cascophen foi dado um tempo de 10 minutos entre a aplicação do adesivo e a montagem do corpo, para atender as especificações técnicas do adesivo (Figura 7).

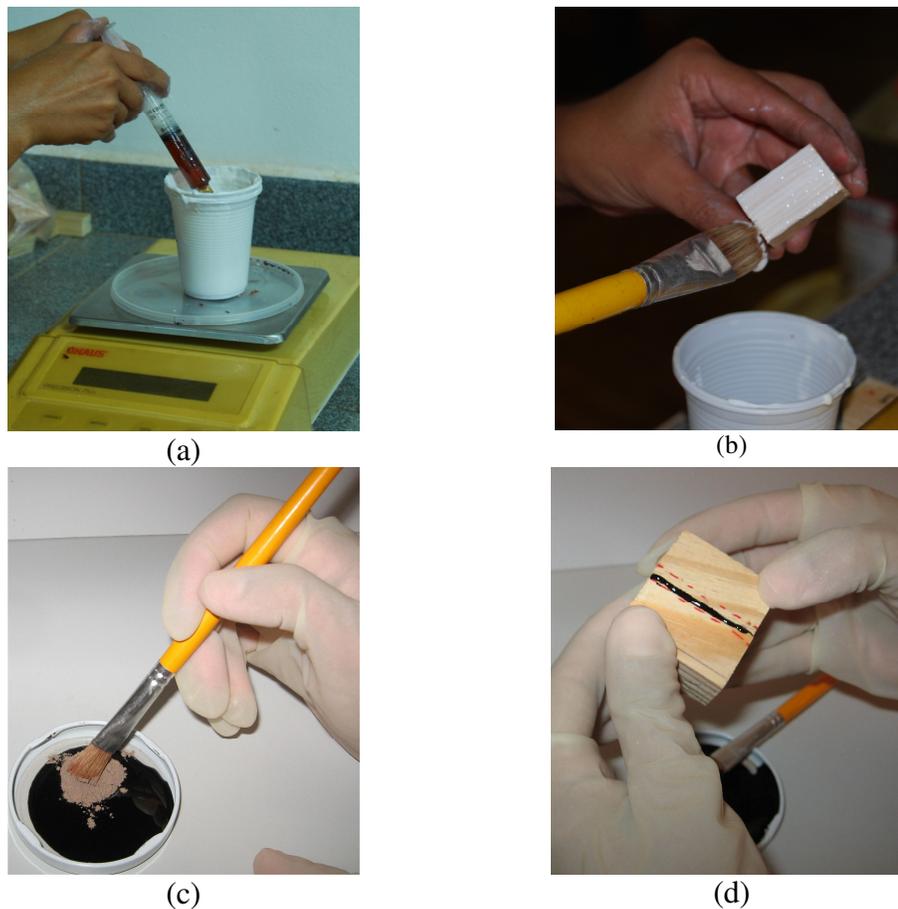


Figura 7 - Preparação do adesivo Wonderbond (a), detalhe da aplicação do adesivo em uma das superfícies de contato (b), preparo do adesivo Cascophen (c) e montagem das partes componentes do corpo-de-prova (d)

3.3.5 Procedimento de prensagem

As amostras foram posicionadas aleatoriamente em um aparato confinador projetado no Laboratório de Máquinas e Engenharia da Madeira para manter um grande número de corpos-de-prova perfeitamente alinhados e sob a mesma pressão. A Figura 8(a) mostra o suporte que foi construído com madeira maciça da espécie *Eucalyptus grandis* e que corresponde a um pilar de seção retangular vazada com dimensões internas de (3,7 x 4,0) cm e externas de (6,0 x 7,5) cm e comprimento de 60 cm; com uma fase removível para facilitar a colocação e retirada das amostras. Uma vez posicionados os corpos-de-prova a tampa superior do aparelho era fixada com a ajuda de pinos metálicos e grampos de carpinteiro (Figura 8(b)).

A pressão adotada para a prensagem dos corpos-de-prova foi de 4.4 MPa, mantida constante por um período de 24 horas, mediante o uso do equipamento exibido na Figura 8(c). A regulagem do dispositivo para aplicação da pressão citada foi feita através das equações de equilíbrio de momentos considerando as cargas e suas respectivas distâncias mostradas na Figura 9.



(a)



(b)



(c)

Figura 8 – Corpos-de-prova inseridos no aparato confinador (a) posicionados para serem prensados por uma carga vertical aplicada num elemento de transição colocado no topo da pilha (b) através da prensa de aplicação de pressão constante de colagem (c)

Com a eq. (1) obteve-se a força (**F**) a ser aplicada na área (**A**) de colagem para obter-se a pressão (**p**) desejada

$$p = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Onde:

$$F = pbh \quad (2)$$

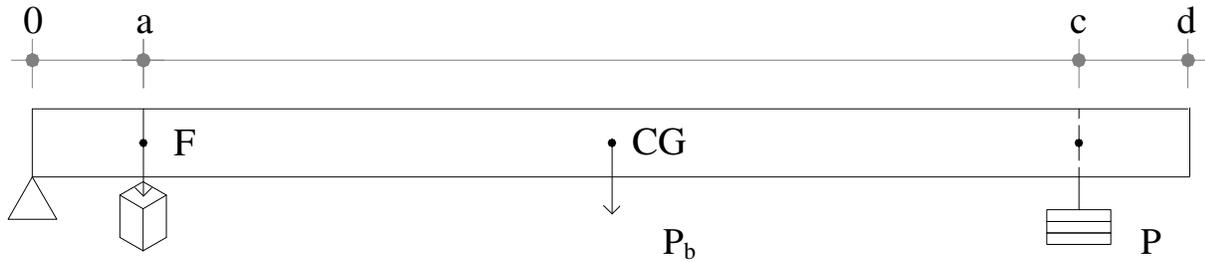


Figura 9 – Esquema do dispositivo de aplicação da pressão na coluna de corpos-de-prova

Com a eq. (3) calculou-se o peso (**P**) aplicado em um determinado ponto da viga em balanço para gerar a força (**F**) solicitada na colagem dos corpos-de-prova.

$$\sum M(0) = 0 \Rightarrow P_c + \frac{P_b d}{2} - Fa = 0 \quad (3)$$

$$P = \frac{Fa - \frac{P_b d}{2}}{c} \quad (4)$$

Substituindo (2) em (4) obteve-se a eq. (5) que permite de forma geral calcular-se a carga (**P**) em função da pressão adotada (**p**), dos lados da área de colagem do corpo-de-prova e dos braços de alavanca criados na barra.

$$P = \frac{2pbha - P_b d}{2c} \quad (5)$$

Onde:

P: peso a ser aplicado no ponto c, N;

P_b: peso da barra, N;

a: ordenada do ponto de aplicação da força (**F**) na coluna de corpos-de-prova, mm;

c: ordenada do ponto de aplicação da força (**P**), mm;

d: ordenada da extremidade livre da barra, mm;

Com os valores:

$$p = 4,4 \text{ MPa};$$

$$a = 200 \text{ mm};$$

$$c = 2000 \text{ mm};$$

$$d = 2460 \text{ mm};$$

$$P_b = 165 \text{ N};$$

$$b = 20 \text{ mm};$$

$$h = 35 \text{ mm}$$

Obteve-se o valor da carga (**P**) a ser aplicada, dada pela eq. (6)

$$P = \frac{2 \cdot 4,4 \cdot 20 \cdot 35 \cdot 200 - 165 \cdot 2460}{2 \cdot 2000} = 200 \text{ N} \quad (6)$$

3.3.6 Condicionamento pós prensagem

Depois de completada a cura parcial sob pressão os corpos foram retirados do confinador e mantidos em condições ambientes por um tempo entre 20 e 28 dias. A uma semana antes de iniciarem-se os ensaios mecânicos os corpos foram colocados em câmara climatizada com temperatura média de 21°C e umidade relativa de 69%.

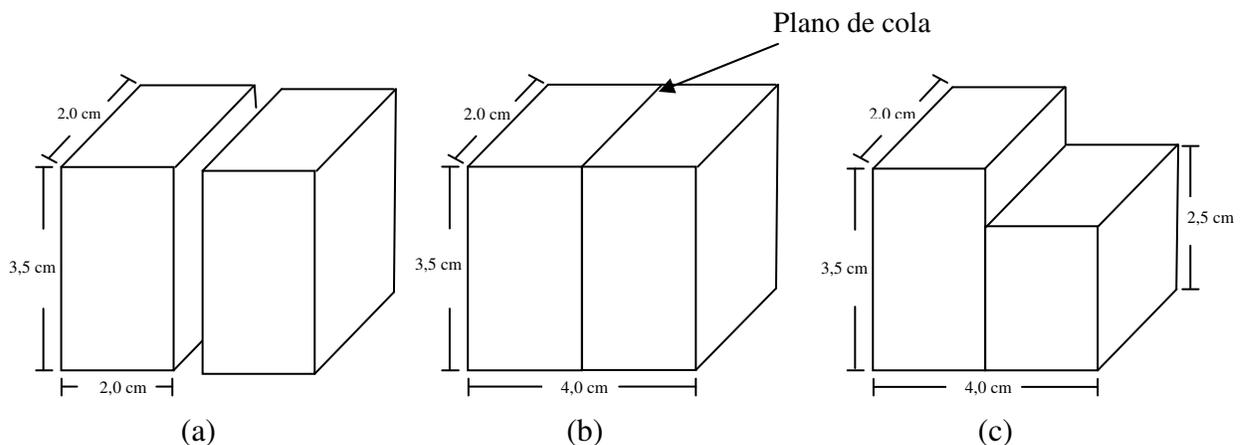


Figura 10 - Sequência da montagem dos corpos-de-prova com as peças componentes produzidas separadamente (a), ligados com cola (b) e com o dente perfilado após a cura do adesivo (c)

3.3.7 Ensaio de cisalhamento

Os ensaios de cisalhamento foram desenvolvidos de acordo com a Norma Técnica Brasileira NBR 7190. As medições das dimensões do corpo-de-prova foram feitas com 0,01mm de precisão.

O carregamento foi conduzido na velocidade de 0.25 kN/cm²/min até a ruptura do corpo-de-prova; registrando-se o valor máximo da carga e o tipo de falha que ocorreu na ruptura.

Ao final do ensaio foi extraído um paralelepípedo regular de cada uma das duas partes do corpo-de-prova rompido, com o objetivo de determinar a massa específica.

3.3.8 Delineamento estatístico

Foi feita uma análise estatística para cada um dos ensaios de cisalhamento no plano de cola e uma para o conjunto de dados específicos. Todas as análises estatísticas foram efetuadas com o uso do pacote estatístico Statistical Analysis System (SAS).

3.3.8.1 Resistência ao cisalhamento no plano de cola paralelo às fibras (fgv0) para corpos-de-prova colados com os adesivos Cascorez, Cascophen e Wonderbond

O arranjo estatístico para esse ensaio foi um fatorial 2 x 3 sendo consideradas 2 espécies (*Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*), três adesivos (Cascorez, Cascophen e Wonderbond) e ficando o plano de cola paralelo às fibras (Tabela 7).

Tabela 7 - Esquema da análise da variância para (fgv0)

Causas de variação	Graus de liberdade
Espécie	1
Adesivo	2
Espécie x Adesivo	2
(Tratamentos)	(5)
Resíduo	24
Total	29

3.3.8.2 Resistência ao cisalhamento em função do ângulo de inclinação do plano de cola (fgv α) em corpos-de-prova colados com os adesivos Adespec e Cascorez

Adotou-se o delineamento inteiramente casualizado, com arranjo fatorial 2 x 2 x 10 (Tabela 8) com os seguintes fatores:

2 espécies: *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*;

2 adesivos: Fundo preparador para junta de placa cimentícia Adespec e Cascorez;

10 ângulos de inclinação do plano de cola: 5°, 10°, 15°, 20°, 30°, 45°, 60°, 75°, 80°, e 90°.

Tabela 8 - Esquema da análise da variância para (fgv α)

Causas de variação	Graus de liberdade
Espécie	1
Adesivo	1
Ângulo	9
Espécie x Adesivo	1
Espécie x Ângulo	9
Adesivo x Ângulo	9
Espécie x Adesivo x Ângulo	9
(Tratamentos)	(39)
Resíduo	161
Total	200

3.3.8.3 Análises conjunta de dados de fgv_0 e fgv_α

A Tabela 9 mostra a análise efetuada para extraírem-se informações do conjunto dos 2 experimentos.

Tabela 9- Esquema da análise da variância conjunta para fgv_0 e fgv_α

Causas de variação	Graus de liberdade
Tratamentos	13
Resíduo	56
Total	69

3.4 Resistência à tração paralela da madeira e da junta dentada

Com o objetivo de estabelecer a resistência à tração das emendas dentadas em madeira de *Eucalyptus grandis*, efetuaram-se ensaios de tração em 95 corpos-de-prova emendados; colados com os adesivos Cascorez, Cascophen e Wonderbond e em 11 corpos-de-prova maciços, denominados controle, para efeitos de comparação.

3.4.1 Confecção dos corpos-de-prova para ensaios de tração de juntas dentadas

3.4.1.1 Perfilamento dos dentes

Os parâmetros importantes dos dentes e que regulam a resistência da união dentada estão mostrados na Figura 11.

Adotou-se a denominação de dente horizontal àquele produzido com o gume normal à face onde se vê a espessura (e) (Figura 11(a)) da peça a ser ligada e dente vertical àquele produzido com o gume normal à fase onde se vê a largura (l) da peça (Figura 11(b)).

Essa classificação foi pensada para expressar a exata orientação do gume do dente sob serviço em uma viga laminada colada e para que isso seja uma regra geral convencionou-se que a espessura (e) será sempre á medida do dente vertical da seção transversal, independentemente de ser maior ou menor do que a largura (ℓ). Nas lâminas componentes das vigas laminadas coladas apresentadas adiante essas dimensões foram convertidas em (h) e (b) respectivamente.

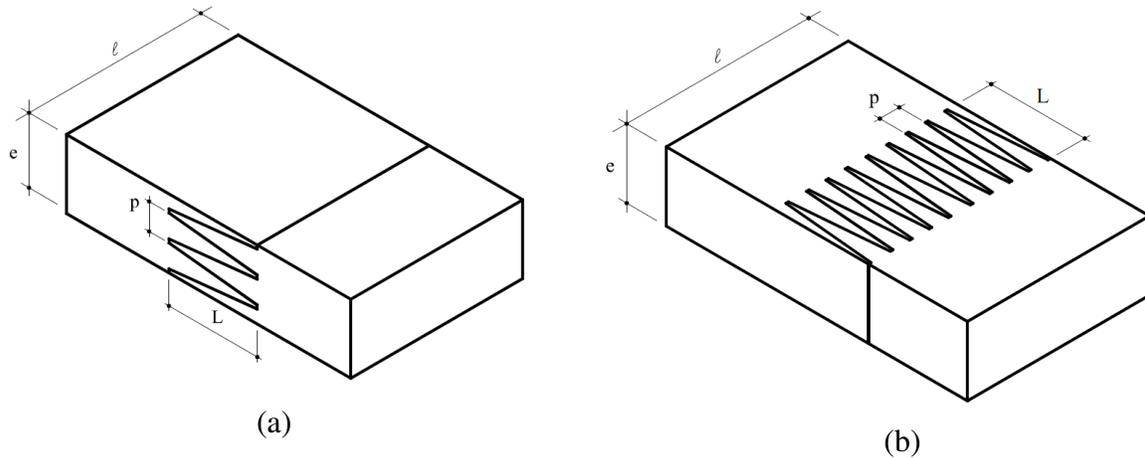


Figura 11 - Dente horizontal (a) e vertical (b)

Quando a espessura da peça (e) for múltipla do passo do dente (p), pode-se ter a junta composta por dentes inteiros e nesse caso há necessidade de produzir-se o conjunto macho-fêmea para cada ligação como mostra a Figura 12(a). O conjunto de fresas que produz o macho (Figura 13) deve ser deslocado meio dente para baixo (ou para cima) para produzir a fêmea quando a espessura da peça não for múltipla do passo do dente pode-se, então, ter uma emenda composta por 1 ou 2 dentes fracionados além dos inteiros. Nesse caso a peça fêmea é idêntica à peça macho, bastando uma rotação de 180° em torno de seu eixo (Figura 12(b)).

No primeiro caso a junta é simétrica em relação ao eixo central e no segundo caso não há eixo de simetria.

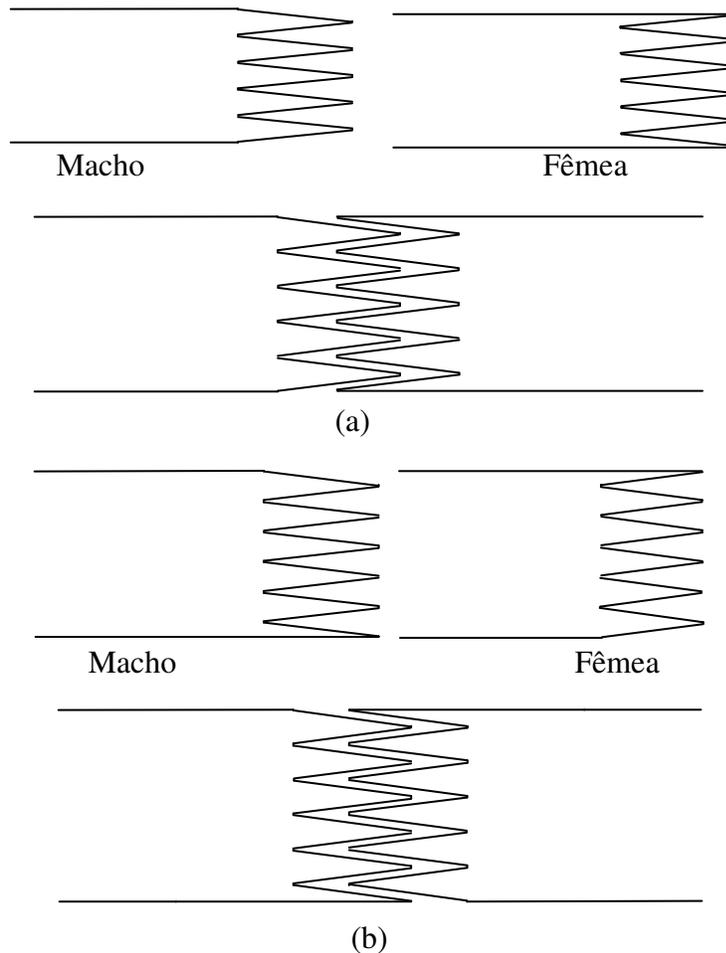


Figura 12 – Perfis macho e fêmea com número inteiro de dentes (a) e perfil macho-fêmea com número de dentes inteiros mais meio dente (b)

A geometria adotada para o dente foi definida em função do conjunto de fresas existente na empresa Matra Madeiras Tratadas e que foi disponibilizado para o ensaio $p=6,1$ mm $L=29,1$ mm (Figura 13(b)).

As peças componentes da ligação dentada foram confeccionadas com madeira de *Eucalyptus grandis*, seca ao ar (umidade aproximada de 12%) com dimensões finais (4,1 x 6,0 x 42) cm. Foi feita uma classificação visual destas peças evitando-se aquelas que apresentavam defeitos como nós, rachaduras e arestas irregulares indesejadas (boleada, esmoada ou quebrada) (Figura 14(a)), em uma extremidade da peça foi produzido o conjunto de machos e na outra extremidade o conjunto de fêmeas (Figura 14(b)).

Foram perfiladas 30 peças e cada uma de elas foi cortada transversalmente na metade do comprimento (Figura 14(c)). As 2 peças resultantes foram usadas para formar uma emenda dentada, produzindo, portanto, 30 corpos-de-prova de união dentada para os ensaios de tração paralela. Como testemunhas foram produzidos 11 corpos-de-prova maciços segundo a norma NBR 7190/97.



(a)



(b)

Figura 13 - Conjunto de fresas perfiladoras dos dentes da união dentada (a); e conjunto de peças de madeira posicionadas na máquina que contém o cabeçote de fresas (b)



(a)



(b)



(c)

Figura 14 – Lote de peças de *Eucalyptus grandis* (a), conjunto macho em uma extremidade da peça e conjunto fêmea na outra (b) e corte transversal de uma peça duplamente perfilada para produção de 2 peças componentes de cada emenda dentada (c)

3.4.1.2 Procedimento de colagem e prensagem

O adesivo foi aplicado com a ajuda de uma peça de madeira perfilada, espalhando-o uniformemente em toda a superfície dos dentes (Figura 15(a)).

As 2 peças de cada emenda foram juntadas pelos dentes e prensados longitudinalmente no dispositivo apresentado na Figura 15(b). As peças foram prensadas sob contenção lateral em uma coluna de seção transversal vazada, sendo a área retangular interna igual à seção transversal da peça trabalhada. Esse procedimento foi adotado para manter o alinhamento longitudinal das peças emendadas (Figura 15(c)).

A pressão de colagem foi de 2,6 MPa aplicada durante três minutos.

Utilizou-se a eq. (5) para calcular o peso necessário para garantir a pressão desejada, com os valores $p=2,6$ MPa; $b=41$ mm, $h=60$ mm e usando valores anteriores **a**, **c** e **d**. O valor encontrado está mostrado na eq. (7).

$$P = \frac{2 \cdot 2,6 \cdot 41 \cdot 60 \cdot 200 - 165 \cdot 2460}{2 \cdot 2000} = 538 \text{ N} \quad (7)$$

A pressão de 2,6 MPa aplicada foi definida em um ensaio exploratório de justaposição completa dos dentes e foi considerada fictícia uma vez que foi calculada dividindo-se a força de compressão aplicada para juntar as peças longitudinalmente pela seção transversal da barra emendada. A pressão efetiva que ocorre perpendicular à superfície colada do dente não foi calculada por que não foi encontrada uma teoria eficaz.

3.4.1.3 Tempo de cura

Os corpos-de-prova emendados colados foram mantidos em condições ambiente durante um período superior a 8 dias, cumprindo com as condições técnicas requeridas no uso do adesivo

Cascophen e com mais folga ainda, no uso do Cascorez (que requer um mínimo de 24 horas) e no uso de Wonderbond (que requer 7 dias).



Figura 15 – Detalhe aplicação do adesivo Cascophen (a), aplicação da pressão de colagem (b) e lote de corpos-de-prova prontos com a emenda dentada na metade do seu comprimento (c)

3.4.2 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração paralela às fibras foram feitos de acordo com o estabelecido na Norma Técnica Brasileira NBR 7190, em uma máquina universal de ensaios (Figura 16).

Com uma velocidade de carregamento de $1,0 \text{ kN/cm}^2/\text{minuto}$. Os lados da seção transversal da barra foram medidos com precisão de $0,01 \text{ mm}$.

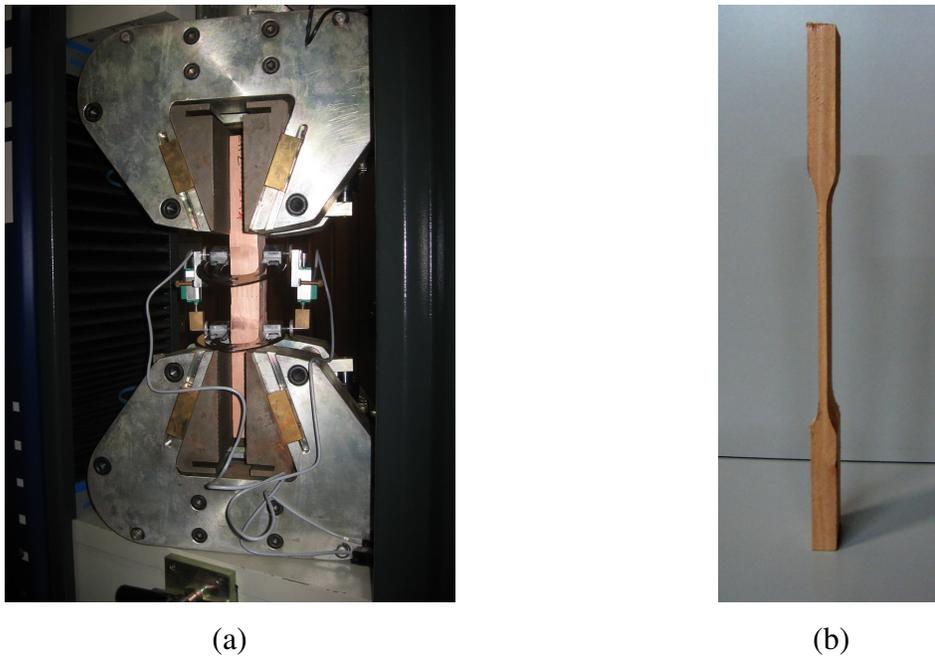


Figura 16 – Ensaio de tração paralela em união dentada (a) e corpo-de-prova para ensaio de tração paralela em madeira maciça (b)

3.4.3 Delineamento Estatístico

Foi adotado o delineamento estatístico inteiramente casualizado, segundo um esquema fatorial de 2 x 3, considerando-se 2 orientações do dente (vertical e horizontal) e 3 adesivos (Cascorez, Cascophen e Wonderbond)

Devido a alguns problemas registrados no desenvolvimento dos ensaios de tração, o número de repetições para cada um dos tratamentos variou entre 4 a 29. A Tabela 10 resume o procedimento estatístico adotado, com os números de repetições especificadas para cada tratamento na Tabela 11.

Tabela 10 - Esquema da Análise da variância para a resistência à flexão (fte) para as emendas dentadas

Causas de variação	Graus de liberdade
Adesivo	2
Orientação do dente	1
A x O	2
(Tratamentos)	(5)
Resíduo	78
Total	83

Tabela 11 – Número de repetições efetivas em cada tratamento

Tratamento	Número de corpos-de-prova
Orientação Horizontal	
Corpos-de-prova colados com Cascorez	4
Corpos-de-prova colados com Cascophen	29
Corpos-de-prova colados com Wonderbond	19
Orientação Vertical	
Corpos-de-prova colados com Cascorez	9
Corpos-de-prova colados com Cascophen	14
Corpos-de-prova colados com Wonderbond	9
Total	84

3.5 Resistência à flexão de lâminas emendadas, vigas maciças e compostas

Foram desenvolvidos ensaios de flexão destrutivos e não destrutivos para madeira maciça, lâminas emendadas e vigas laminadas coladas da espécie *Eucalyptus grandis*.

As peças usadas nesses ensaios foram obtidas de um lote de madeira com características homogêneas, submetidas à secagem natural, apresentando um teor de umidade médio de 12%. Os processos de corte em serra circular, plainas desempenadeira e desgrossadeira, foram efetuados no Laboratório de Máquinas e Engenharia da Madeira.

A confecção dos corpos-de-prova emendados e das vigas laminadas foi realizada na Empresa Matra Ltda. que possui toda a infraestrutura necessária para fabricação de vigas laminadas coladas.

3.5.1 Confecção dos corpos-de-prova

3.5.1.1 Seção transversal simples (monoblocos)

Semi-toras foram maquinadas para obterem-se 35 peças com dimensões (6 x 6 x 150) cm, 5 peças de madeira maciça com dimensões (3 x 6 x 150) cm e 80 lâminas de (3 x 6 x 80) cm. Cada peça desse último lote foi perfilada em uma de suas extremidades e emendadas 2 a 2 sendo então produzidos 40 corpos-de-prova de (3 x 6 x 150) com uma emenda dentada na metade do comprimento, metade desse número foi produzido com dentes horizontais e metade com dentes verticais.

3.5.1.2 Seção transversal composta

Foram montadas 25 vigas laminadas coladas de seção transversal de (6 x 9) cm, composta por uma peça de madeira maciça de (6 x 6) cm e uma lâmina de (6 x 3) cm que trabalha sempre como banda tracionada, compreendendo os seguintes tratamentos.

- * 15 vigas laminadas coladas não solidarizadas entre as duas peças componentes sendo:
 - ** 5 sem emenda na lâmina inferior;
 - ** 5 com emenda no médio do vão e com dentes horizontais;
 - ** 5 com emenda no médio do vão e com dentes verticais;
- * 10 vigas laminadas coladas solidarizadas sendo:
 - ** 5 com emenda na lâmina com dentes horizontais;
 - ** 5 com emenda na lâmina com dentes verticais.

Todas as peças componentes das vigas laminadas coladas foram ensaiadas individualmente à flexão não destrutiva antes da montagem.

O adesivo Wonderbond foi aplicado procurando o espalhamento uniforme deste na totalidade da emenda com uma peça de madeira perfilada, procedendo imediatamente à aplicação da pressão de colagem. O processo de prensagem das peças foi efetuado no equipamento exibido na Figura 17(a).

Uma vez obtidas as peças emendadas, foi efetuada a confecção de 10 vigas laminadas coladas. O adesivo foi espalhado com rolo e procedeu-se ao fechamento e prensado do conjunto laminado na prensa exibida na Figura 17(b); por um tempo de 4 horas.



(a)



(b)

Figura 17 – Prensagem de lâminas emendadas (a); prensagem de vigas laminadas (b)

3.5.2 Tempo de cura pós prensagem

Terminado o processo de prensagem as vigas laminadas coladas foram mantidas durante 7 dias em condições ambientais controladas, com temperatura média de 21°C e umidade relativa de 69%.

3.5.3 Ensaio de Flexão

Os ensaios de flexão a três pontos, foram efetuados com algumas adaptações em relação às recomendações da Norma Técnica Brasileira NBR 7190/97.

Efetuaram-se as medições das dimensões transversais, dos corpos-de-prova com uma precisão de 0.01 mm. Os ensaios foram feitos com o uso dos acessórios da flexão compostos por dois pontos de apoio e um ponto de carga, cujo arranjo está ilustrado na Figura 18. O carregamento foi efetuado com velocidade de 10 MPa por minuto, até a ruptura do corpo nos ensaios destrutivos e para o caso dos ensaios não destrutivos estabeleceu-se o valor de 70% da carga limite de elasticidade estimada nos ensaios não destrutivos. Em alguns ensaios variou-se a relação L/h para verificar-se a real influência do esforço cortante no valor do módulo de elasticidade em função da variação estrutural da madeira.



Figura 18 – Arranjo do ensaio de flexão

3.5.3.1 Ensaio destrutivos em peças maciças

Nesses ensaios foram utilizados 10 corpos-de-prova de (6 x 6 x 150) cm sendo 5 deles ensaiados com vão de 126 cm e 5 com vão de 96 cm (Figura 19).

As 20 peças de madeira maciça usadas posteriormente na confecção das vigas laminadas com seção (6 x 6) cm foram submetidas a ensaios de flexão não destrutivos com uma distância entre apoios de 96 cm obtendo assim o módulo de elasticidade das mesmas.

3.5.3.2 Ensaios destrutivos em peças com emenda no meio do vão

Nesses ensaios foram utilizados 10 corpos-de-prova de (6 x 3 x 150) cm repartidos em igual número em um lote de dentes verticais e em outro de dentes horizontais. Dentro de cada lote de 10 corpos-de-prova metade deles foi ensaiada com um vão de 63 cm e metade com vão de 48 cm (Figura 20) para estudar as relações L/h de 21 e 16 respectivamente.

3.5.3.3 Ensaios não destrutivos em peças maciças e emendadas componentes de vigas de seção composta

Nesse ensaio foram utilizados 25 corpos-de-prova de (6 x 6 x 150) cm ensaiados com vão de 96 cm e 5 corpos-de-prova de (6 x 3 x 150) cm ensaiadas com vão de 48 cm (Figura 21). Em todos os casos a relação L/h foi igual a **16** que foi a relação adotada também para os ensaios de vigas componentes.

3.5.3.4 Ensaios destrutivos em vigas de seção composta

Foram testadas 15 vigas de seção transversal de (6 x 9) cm composta de uma seção de (6 x 6) cm e outra de (6 x 3) cm não solidarizados entre si. A peça de seção menor foi chamada de lâmina e trabalhou sempre à tração na borda inferior das vigas montadas como se fossem vigas laminadas coladas. Desse total de vigas 5 continham lâminas sem emenda e 10 com emenda dentada no meio do vão, sendo 5 com dentes horizontais e 5 com dentes verticais (Figura 22). Em todos os casos a relação L/h foi igual a **16**.

3.5.3.5 Ensaio destrutivo em vigas laminadas coladas

Foram testadas 10 vigas de seção transversal de (6 x 9) cm composta de seção de (6 x 6) cm e outra de (6 x 3) cm solidarizadas entre si com adesivo. As lâminas de (6 x 3) cm foram colocadas na parte inferior da viga laminada colada e com emenda dentada no meio do vão, sendo 5 com dentes horizontais e 5 com dentes verticais (Figura 23).

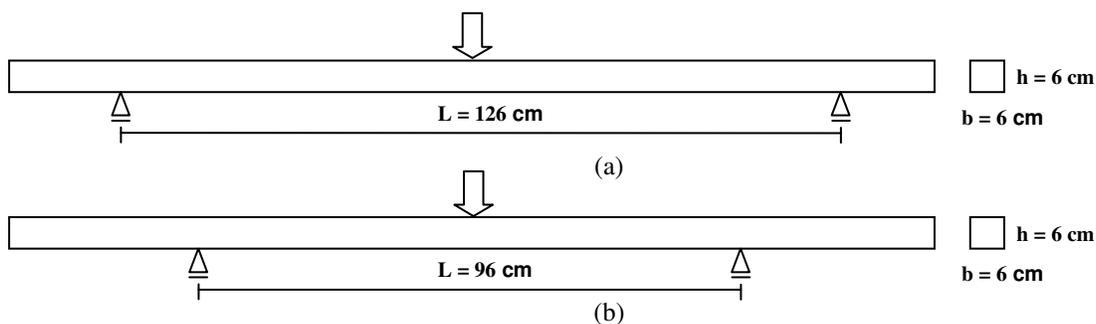


Figura 19 – Tratamentos dos ensaios de flexão destrutivos de corpos-de-prova monoblocos com $L/h = 21$ (a) e $L/h = 16$ (b)

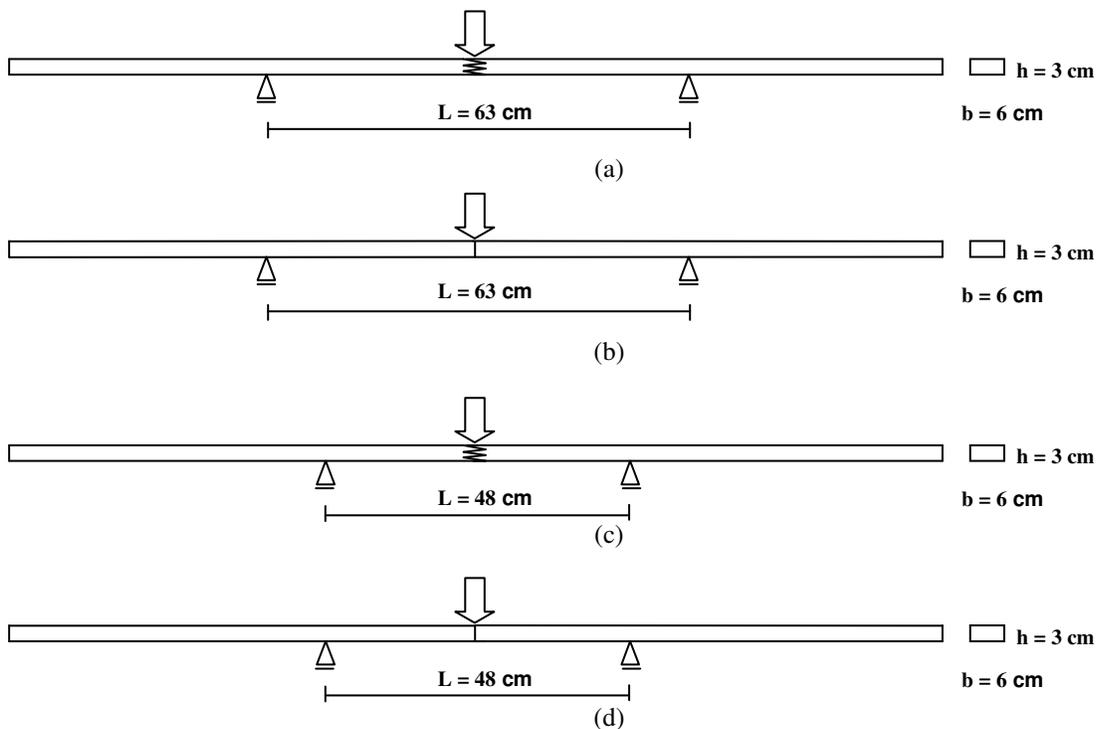


Figura 20 – Tratamentos do ensaio de flexão de peças emendadas com $L/h = 21$ para dentes horizontais (a) e verticais (b) e com $L/h = 16$ para dentes horizontais (c) e verticais (d)

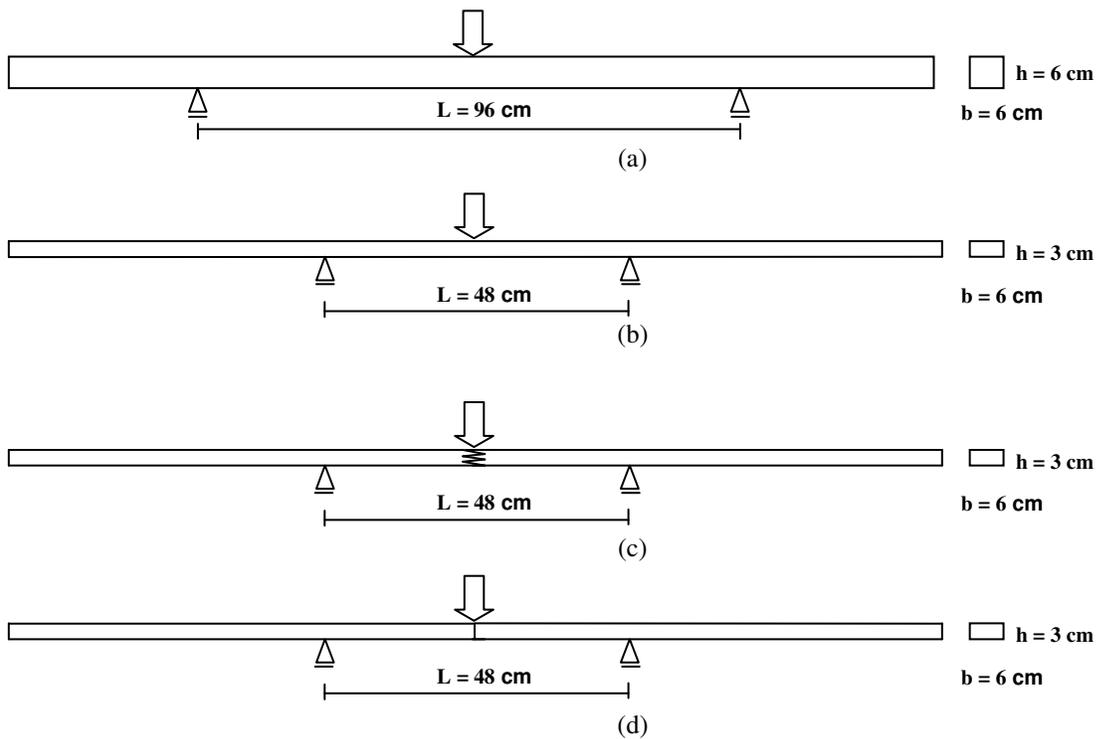


Figura 21 – Tratamentos dos ensaios de flexão não destrutivos com $L/h = 16$ de corpos-de-prova monoblocos (a) e (b) e com emendas dentadas no meio do vão para dentes horizontais (c) e verticais (d).

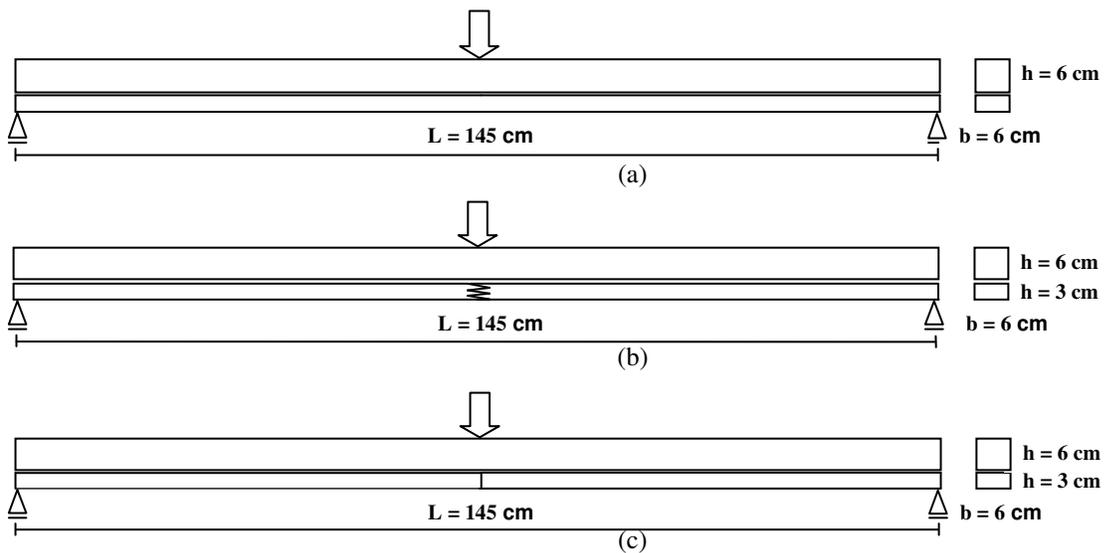


Figura 22 - Tratamentos do ensaio de flexão de vigas compostas não solidarizadas entre peças componentes maciças (a) com dentes horizontais (b) e verticais (c)

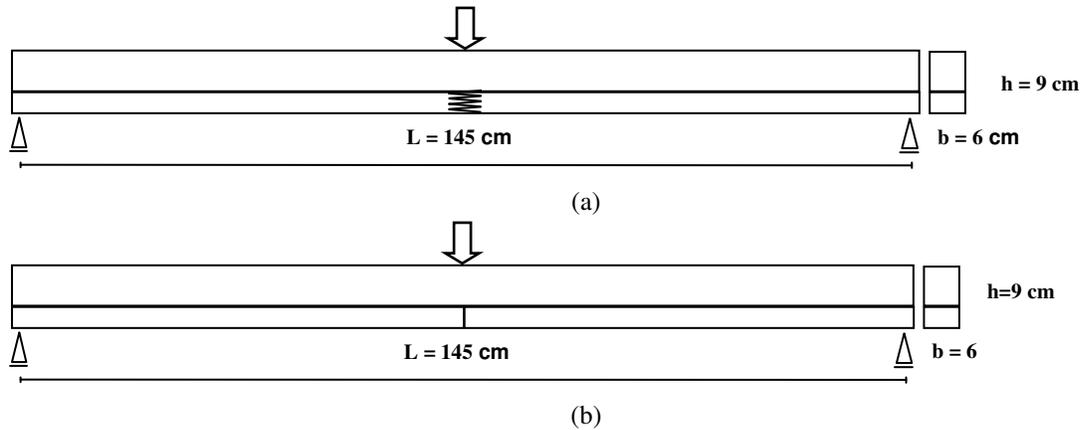


Figura 23 – Tratamentos do ensaio de flexão destrutiva em vigas laminadas coladas solidarizadas entre peças componentes e lâminas com dentes horizontais (a) e verticais (b)

3.5.4 Delineamento Estatístico

Nas Tabelas 12, 13 e 14 estão apresentados os esquemas das análises de variância relativos aos diferentes ensaios de flexão. Para o módulo de elasticidade (MOE) e o módulo de ruptura (MOR).

Tabela 12 - Esquema da análise da variância para MOE e MOR obtidos nos ensaios destrutivos de peças maciças

Causas de variação	Graus de liberdade
Relação L/h	1
Resíduo	8
Total	9

Tabela 13 - Esquema da análise da variância para MOE e MOR obtidos nos ensaios destrutivos de peças com emendas no meio do vão

Causas de variação	Graus de liberdade
Relação L/h	1
Orientação do dente	1
R * O	1
(Tratamentos)	(3)
Resíduo	16
Total	19

Nos ensaios destrutivos em vigas de seção composta foi adotado o delineamento estatístico inteiramente casualizado, segundo um esquema fatorial de 2 x 2, considerando-se 2 orientações do dente (vertical e horizontal) e 2 condições de vinculação entre peças componentes da viga composta, sendo a viga solidarizada com adesivo Wonderbond e a viga não solidarizada.

Tabela 14 - Esquema da análise da variância para MOE e MOR em ensaios destrutivos em vigas de seção composta

Causas de variação	Graus de liberdade
Condições de solidarização	1
Orientação do dente	1
C * O	1
(Tratamentos)	(3)
Resíduo	16
Total	19

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

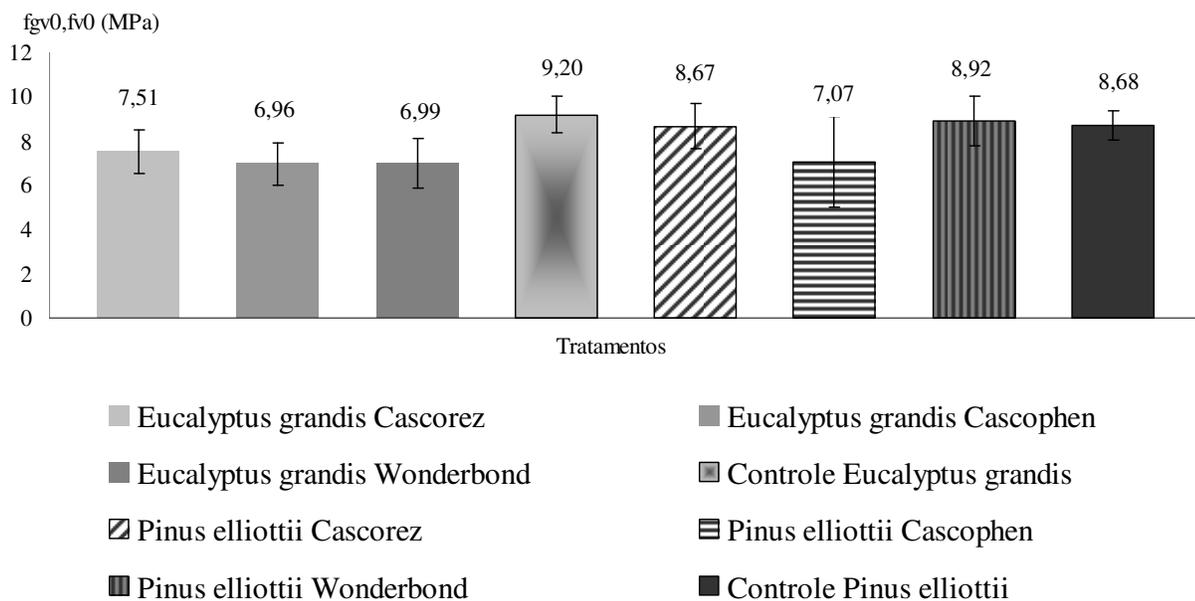
4.1 Resistência ao cisalhamento no plano de cola paralelo às fibras de corpos-de-prova especiais

Neste item estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento efetuados para as espécies *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*, no plano de cola paralelo à direção das fibras onde foram utilizados os adesivos Cascorez, Cascophen e Wonderbond. A Figura 24(a) mostra todos os valores encontrados e permite comparar qualquer dos tratamentos com os demais e a Figura 24(b) mostra a eficiência de cada tratamento em relação ao respectivo controle.

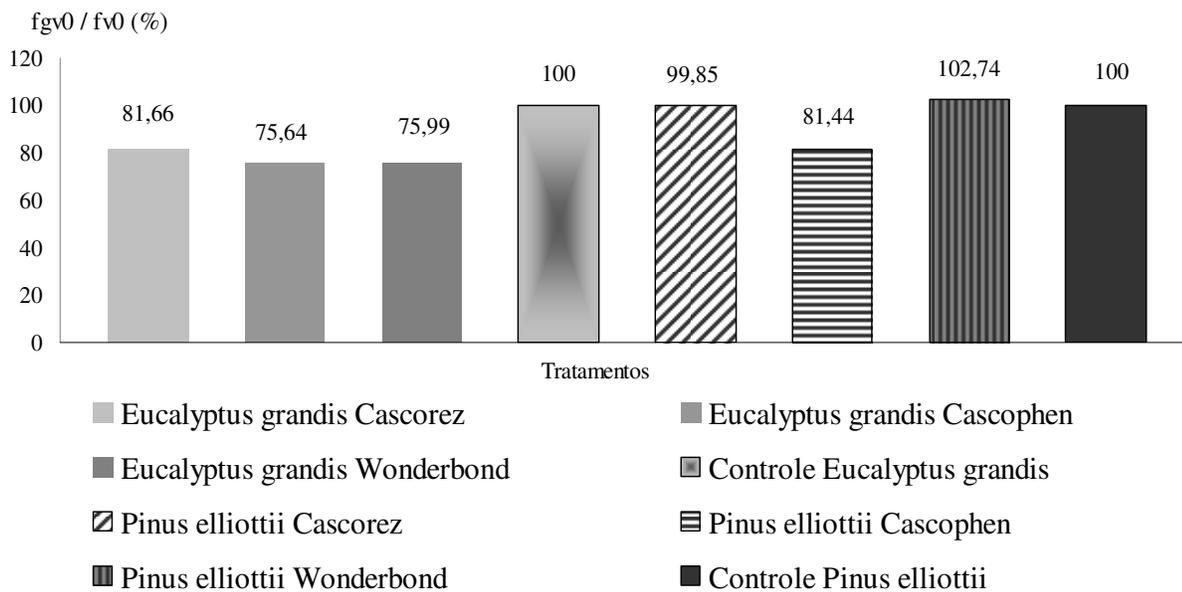
A análise estatística apresentada na Tabela 15 permitiu verificar que não houve diferenças significativas entre espécies e entre adesivos. A interação dupla também não foi significativa indicando que os adesivos mantiveram suas importâncias relativas em qualquer das 2 espécies. O *Pinus elliottii*, no entanto, apresentou valores médios de resistência no plano de cola paralelo às fibras superiores aos do *Eucalyptus grandis* apesar das madeiras maciças terem sido praticamente de mesma resistência. Isso evidenciou uma melhor resposta do *Pinus elliottii* à colagem paralela às fibras.

Tabela 15 - Análise de variância para resistência ao cisalhamento no plano de cola paralelo às fibras de corpos de prova de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii* colados com Cascorez, Cascophen e Wonderbond

Causas de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	Valor de F	Prob >F
Espécie	1	447,83	447,83	0,66	0,42
Adesivo	3	1864,24	621,41	0,91	0,44
Espécie x Adesivo	3	885,23	295,08	0,43	0,73



(a)



(b)

Figura 24 – Valores médios de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras no plano de cola (fgv0) e na madeira maciça (fv0) (a) e eficiências relativas dessas resistências (b)

Na Tabela 16 estão apresentados valores médios de resistência ao cisalhamento no plano de cola de corpos-de-prova de *Eucalyptus* obtidos em diferentes pesquisas, apresentados por

Lima et al. (2008). Foram incluídos dados de Lobão e Gomes (2006) que estudaram a qualidade da adesão para a madeira de *Eucalyptus grandis* e encontraram a maior resistência (9,7 MPa) em corpos-de-prova de massa específica de 0,81 g/cm³ colados segundo a direção paralela às fibras.

Tabela 16 – Valores médios de resistência ao cisalhamento no plano de cola paralelo às fibras da madeira

Adesivos	Média (MPa)	Espécie
Cascorez (PVA)	10.28	<i>Eucalyptus saligna</i>
	13.44	<i>Eucalyptus saligna</i>
	10.62 a 11,72	<i>Eucalyptus saligna e Eucalyptus grandis</i>
Cascophen (Resorcinólico)	8,00	<i>Eucalyptus saligna</i>
	13,52	<i>Eucalyptus saligna</i>
	14,95 a 18,44	<i>Eucalyptus citrodora</i>
	5,6 a 9,7	<i>Eucalyptus grandis*</i>

Fontes: Lima et al. (2008); * Lobão e Gomes (2006), adaptada

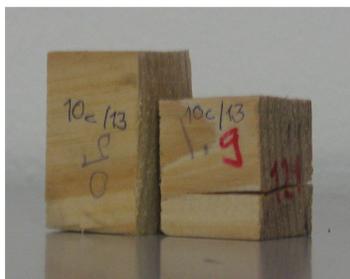
4.2 Resistência ao cisalhamento em função do ângulo de inclinação do plano de cola em relação à direção das fibras

Neste item estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento em 10 ângulos de inclinação do plano de cola em relação à direção das fibras, em corpos-de-prova colados com os adesivos Adespec e Cascorez. A Figura 25 mostra alguns exemplos de falhas observadas.

Os dados considerados como controle corresponderam a corpos-de-prova maciços com ângulos de inclinação das fibras em relação à direção da carga iguais aos colados. Os dados obtidos dos corpos-de-prova maciços com ângulos de inclinação entre 45° e 90° foram desconsiderados porque a ruptura ocorreu pela ação conjunta de forças de compressão, cisalhamento e tração normal. Exemplos de rompimento e esmagamento dos corpos-de-prova maciços estão mostrados na Figura 26.



Falha na cola em *Eucalyptus grandis* colado com Adespec e ângulo do plano de cola de 5°



Falha na cola acompanhada de rachadura longitudinal em *Pinus elliottii* colado com Cascorez e ângulo do plano de cola de 90°



Falha dúctil, em *Eucalyptus grandis* colado com Cascorez e ângulo do plano de cola de 60°



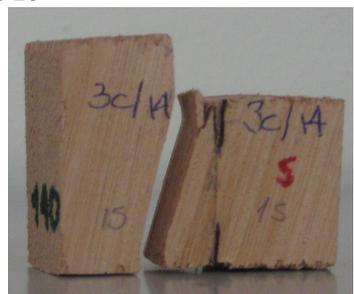
Falha mista de 75% na madeira de *Eucalyptus grandis* colado com Cascorez e ângulo do plano de cola de 20°



Falha mista de 90% na madeira de *Pinus elliottii* colada com Adespec e ângulo do plano de cola de 30°



Falha mista de 20% na madeira de *Pinus elliottii* colada com Cascorez e ângulo de plano de cola de 30°



Falha na madeira de *Eucalyptus grandis* colada com Cascorez e ângulo do plano de cola de 15°



Falha na madeira de *Eucalyptus grandis* colada com Cascorez e ângulo do plano de cola de 30°

Figura 25 – Tipos de falha observados nos ensaios de cisalhamento no plano de cola inclinado em relação à direção das fibras



Figura 26 – Tipos de falha observados nos ensaios de cisalhamento de corpos-de-prova maciços

Na Tabela 17 estão mostrados os resultados da análise de variância, observando-se que houve diferença altamente significativa entre espécies e entre ângulos de inclinação do plano de cola em relação à direção das fibras. Não houve diferença entre adesivos.

As interações espécie-adesivo e ângulo-adesivo não foram significativas, evidenciando o fato de que os 2 adesivos apresentaram o mesmo comportamento nas 2 espécie e nos 10 diferentes ângulos. A interação espécie-ângulo também não foi significativa e, portanto, a influência de cada ângulo ocorreu de forma similar nas 2 espécies.

Tabela 17 - Análise de variância para resistência ao cisalhamento no plano de cola em relação à direção das fibras da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii* e dos adesivos Adespec e Cascorez

Causas de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio	Valor de F	Prob >F
Espécie	1	8591,07525	45,57**	<,0001
Adesivo	1	26,59697	0,14	0,7077
Espécie x Adesivo	1	53,64891	0,8	0,5945
Ângulo	9	18483,68764	10,89**	<,0001
Espécie x Ângulo	9	423,47965	0,25	0,9862
Adesivo x Ângulo	9	1065,78970	0,63	0,7719
Espécie x Adesivo x Ângulo (Tratamentos)	9 (39)	2411,68851	1,42	0,1830
Resíduo	161			
Total	199			

** significativo a 1% de probabilidade.

Efetuuou-se a verificação das pressuposições do modelo estatístico para os dados obtidos nesta fase mediante o teste de normalidade de Shapiro-Wilk, homogeneidade de variâncias pelo teste de Bartlett e a distribuição normal dos resíduos. Verificou-se que as pressuposições da ANAVA não se cumpriam e, portanto, foram utilizadas técnicas de transformação de dados para adequá-los aos requerimentos da estatística. A Tabela 18 mostra, como os resultados da análise de variância feita para os dados transformados, que nada mudou em relação aos resultados da análise anterior.

Tabela 18- Análise de variância feita com o logaritmo da resistência ao cisalhamento no plano de cola enfatizando apenas os fatores principais

Causas de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio	Valor de F	Prob >F
Espécie	1	3.12139955	55.47**	<.0001
Adesivo	1	0.00667076	0.12	0.7310
Ângulo	9	0.75414312	13.40**	<.0001

** significativo a 1% de probabilidade

Efetuando-se o teste de comparação de médias de Tukey foi possível classificar os ângulos em três grupos (Tabela 19) onde letras iguais indicam que não houve diferença significativa entre as médias correspondentes. O grupo A exibiu maior resistência ao cisalhamento e o grupo C apresentou a menor resistência ao cisalhamento. O grupo B foi considerado como um grupo de transição tendo valores parecidos com os do grupo A e outros similares aos do grupo C.

Tabela 19 - Comparação de médias de resistência ao cisalhamento no plano de cola para o conjunto de dados de *Eucalyptus grandis*, *Pinus elliottii*, Adespec e Cascorez

Agrupamento Tukey	Média (MPa)	Número de observações	Ângulo
A	4,19	20	15
A	4,16	20	10
A	4,13	20	5
A B	4,07	20	30
A B	4,06	20	20
A B	4,03	20	45
C B	3,87	20	60
C	3,79	20	80
C	3,73	20	75
C	3,65	20	90

4.3 Análise conjunta da resistência ao cisalhamento nos planos de cola paralelo e inclinado em relação às fibras

A Figura 27 mostra os valores médios de tensão última de cisalhamento para cada uma das espécies, com os diferentes ângulos de inclinação do plano de cola, coladas com os adesivos Adespec e Cascorez.

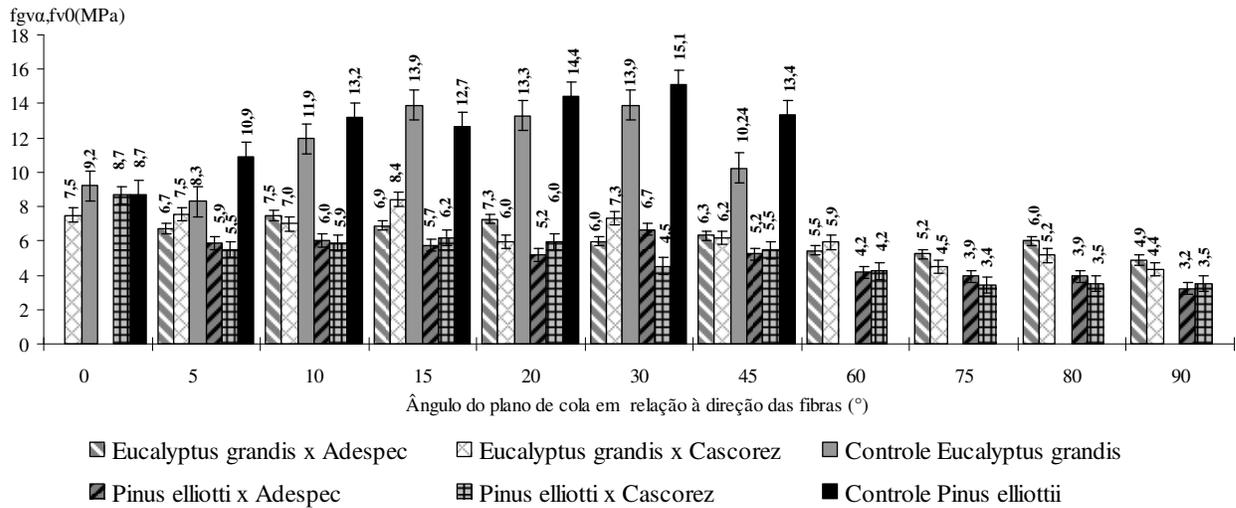


Figura 27 – Resistência média ao cisalhamento no plano de cola ($fgv\alpha$) e em corpos-de-prova maciços ($fv0$) de mesma geometria

Observou-se que a resistência ao cisalhamento de corpos-de-prova maciços tende a aumentar com o ângulo de inclinação das fibras. Exceto no ângulo de 0° a ruptura ocorreu no plano de orientação das fibras e não no plano inclinado onde foi forçada a ocorrer. Acima de 0° as resistências dos controles podem ser consideradas fictícias e sem valor para cálculo estrutural.

A resistência ao cisalhamento no plano de cola tende a diminuir com o aumento do seu ângulo em relação à direção das fibras. No *Pinus elliottii* o decréscimo foi visivelmente mais acentuado do que no *Eucalyptus grandis*, especialmente quando passa de 0° para 5° . A Figura 28 mostra os dados obtidos plotados conjuntamente com as respectivas curvas de Hankinson. Nessa figura também estão mostrados os dados de Petrausky, Lucia e Tinouco (2000) que validaram o modelo de Hankinson na predição da resistência ao cisalhamento em função do ângulo de inclinação das fibras em juntas de madeira de *Eucalyptus grandis* coladas com adesivo à base de resorcinol-formaldeído. A resistência ao cisalhamento decresceu continuamente com o aumento do ângulo de inclinação das fibras.

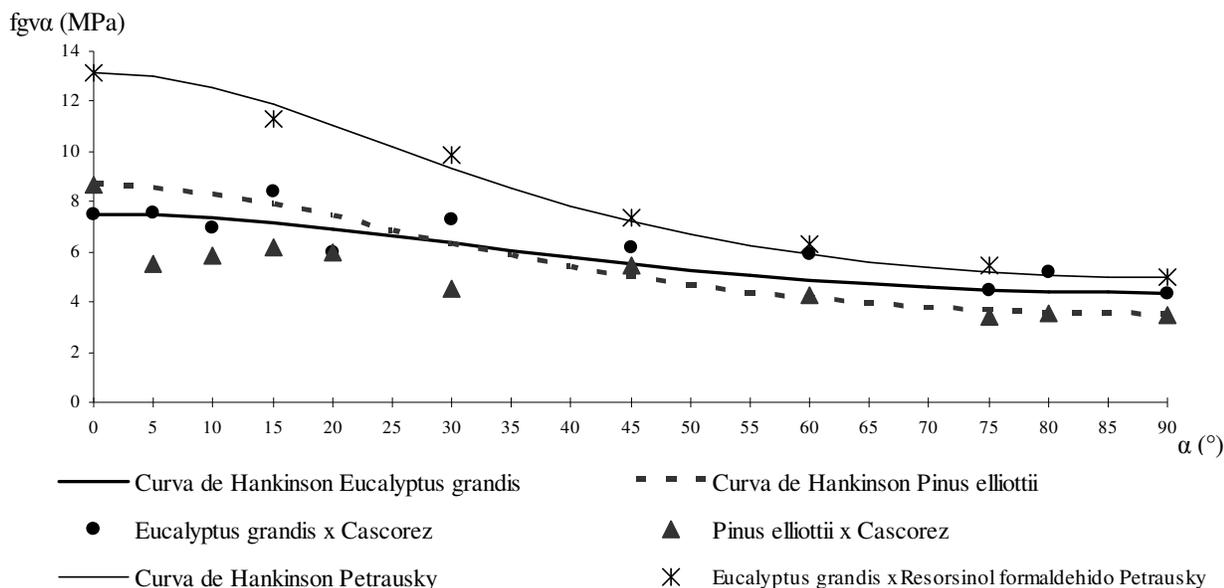


Figura 28 – Curvas de Hankinson referentes aos dados observados e dados de Petrusky, Lucia e Tinouco de resistência ao cisalhamento no plano de cola

Nas Tabelas 20 e 22 estão apresentados os resultados das análises de variância para **fgv0** e **fgvα** em cada uma das espécies avaliadas onde foi possível observar que houve diferenças significativas entre tratamentos.

As correspondentes comparações de médias mediante o teste de Tukey estão mostradas nas Tabelas 21 e 23. Tanto no *Eucalyptus grandis* quanto no *Pinus elliottii* os tratamentos foram classificados em três grupos onde o grupo A incluiu os tratamentos de maior resistência, o grupo C incluiu aqueles de menor resistência e o grupo B que se comportou como grupo de transição com tratamentos que se comportaram como os do grupo A e também como os do grupo C.

Tabela 20 – Análise de variância para resistência ao cisalhamento no plano de cola e na madeira maciça de *Eucalyptus grandis*

Causas de Variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado Médio	Valor de F	Prob >F
Tratamentos	13	12593,44	968,72	4,226**	0,0001
Resíduo	56	12836,88	229,23		
Total	69	25430,33			

** significativo a 1% de probabilidade

Tabela 21 - Comparação de médias de resistência ao cisalhamento no plano de cola e na madeira maciça de *Eucalyptus grandis*

Agrupamento Tukey	Média (MPa)	Tratamento
A	9,20	Madeira maciça
A B	8,41	15° Cascorez
A B C	7,54	5° Cascorez
A B C	7,51	0° Cascorez
A B C	7,33	30° Cascorez
A B C	6,99	0° Wonderbond
A B C	6,99	10° Cascorez
A B C	6,96	0° Cascophen
A B C	6,20	45° Cascorez
A B C	5,97	20° Cascorez
A B C	5,92	60° Cascorez
B C	5,17	80° Cascorez
C	4,49	75° Cascorez
C	4,36	90° Cascorez

Tabela 22 – Análise de variância para resistência ao cisalhamento no plano de cola e na madeira maciça de *Pinus elliottii*

Causas de Variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado Médio	Valor de F	Prob >F
Tratamentos	13	24128,97	1856,07	5,188**	0,0000
Resíduo	56	20033,05	357,73		
Total	69	44162,02			

Tabela 23 - Comparação de médias da resistência ao cisalhamento no plano de cola e na madeira maciça de *Pinus elliottii*

Agrupamento Tukey	Média (MPa)	Tratamento
A	8,92	0° Wonderbond
A B	8,68	Madeira maciça
A B	8,67	0° Cascorez
A B C	7,07	0° Cascophen
A B C	6,20	15° Cascorez
A B C	5,97	20° Cascorez
A B C	5,86	10° Cascorez
A B C	5,49	5° Cascorez
A B C	5,46	45° Cascorez
A B C	4,53	30° Cascorez
C	4,25	60° Cascorez
C	3,53	80° Cascorez
C	3,51	90° Cascorez
C	3,43	75° Cascorez

A Figura 29 ilustra a eficiência da ligação em relação à madeira maciça, no que se refere à resistência ao cisalhamento, para cada tratamento avaliado.

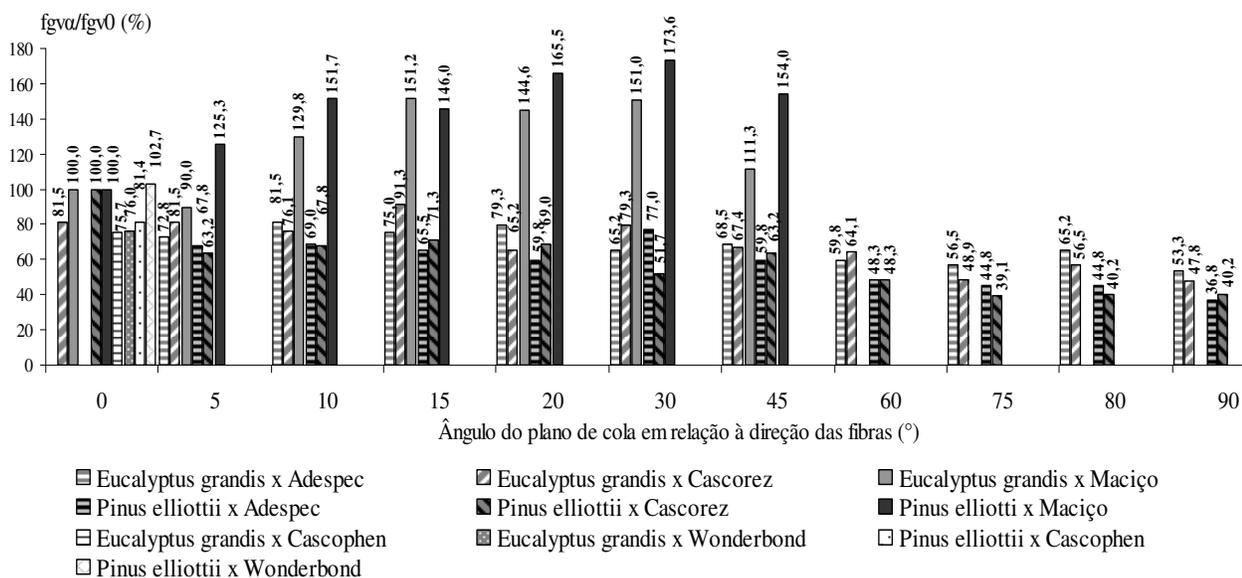


Figura 29 – Eficiência da resistência ao cisalhamento no plano de cola (fgva) em relação à da madeira maciça (fv0)

A espécie *Eucalyptus grandis* exibiu valores médios de resistência ao cisalhamento maiores do que os de *Pinus eliottii*; 6,23 MPa (média de 100 dados) e 4,91 MPa (média de 100 dados), respectivamente. A relação da resistência ao cisalhamento a 5° de inclinação do plano de cola com a resistência da madeira maciça foi de 77,2% para o *Eucalyptus grandis* e de 65,5% para o *Pinus eliottii*. A superioridade do *Eucalyptus grandis* nessa relação manteve-se para os demais ângulos, com exceção do ângulo 0°.

Isso significa que o *Eucalyptus grandis* foi favorecido por pequenos ângulos de inclinação do plano de cola contrariamente ao que aconteceu com o *Pinus eliottii* e, portanto, apresentou maior eficiência na colagem, o que é desejável para viga laminada colada tendo em vista que o ângulo de inclinação da superfície do dente é de aproximadamente 6,12°. A madeira de *Eucalyptus grandis* surge como uma alternativa viável à substituição da madeira de *Pinus eliottii* que é tradicionalmente usada em vigas laminadas coladas.

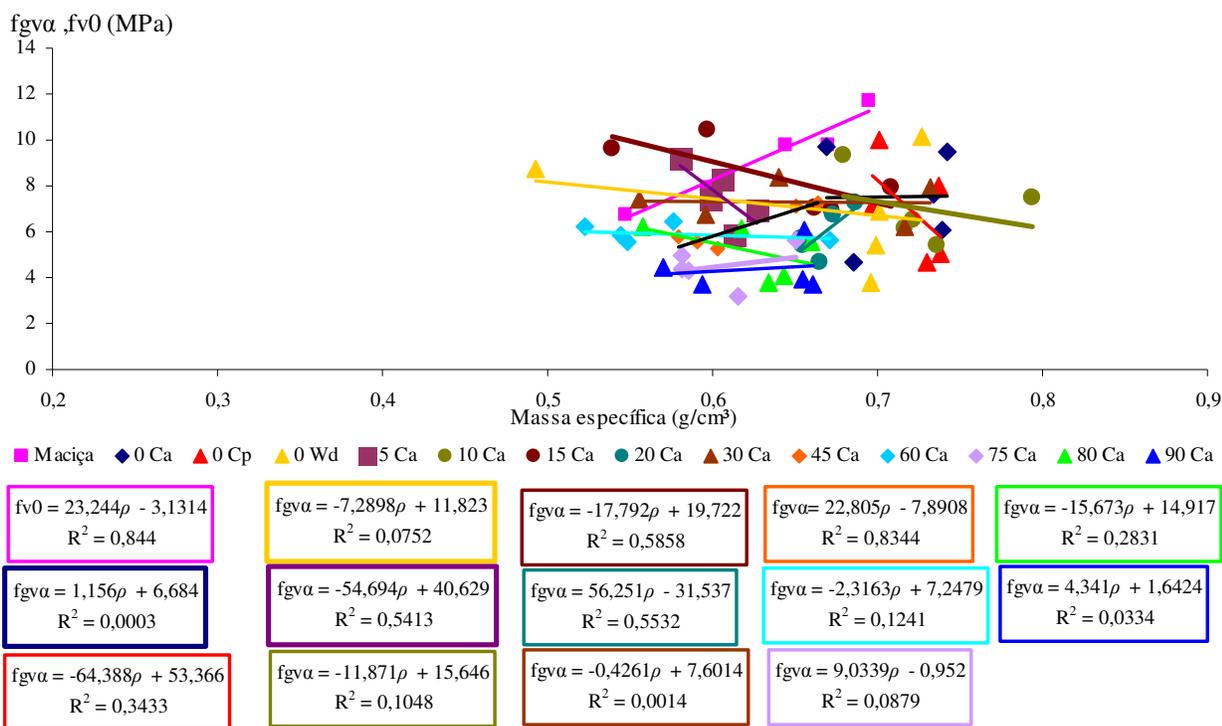
O *Eucalyptus grandis* apresentou maior resistência ao cisalhamento nos corpos-de-prova colados com o adesivo Cascorez, alcançando a máxima eficiência no ângulo de inclinação de 15° (8,4 MPa) correspondente a 91,5% da resistência exibida pela madeira maciça (9,2 MPa).

A máxima resistência ao cisalhamento apresentada pelos corpos-de-prova colados com o adesivo Adespec correspondeu a 81,5% (7,5 MPa) da resistência da madeira maciça no ângulo de inclinação do plano de cola de 10°.

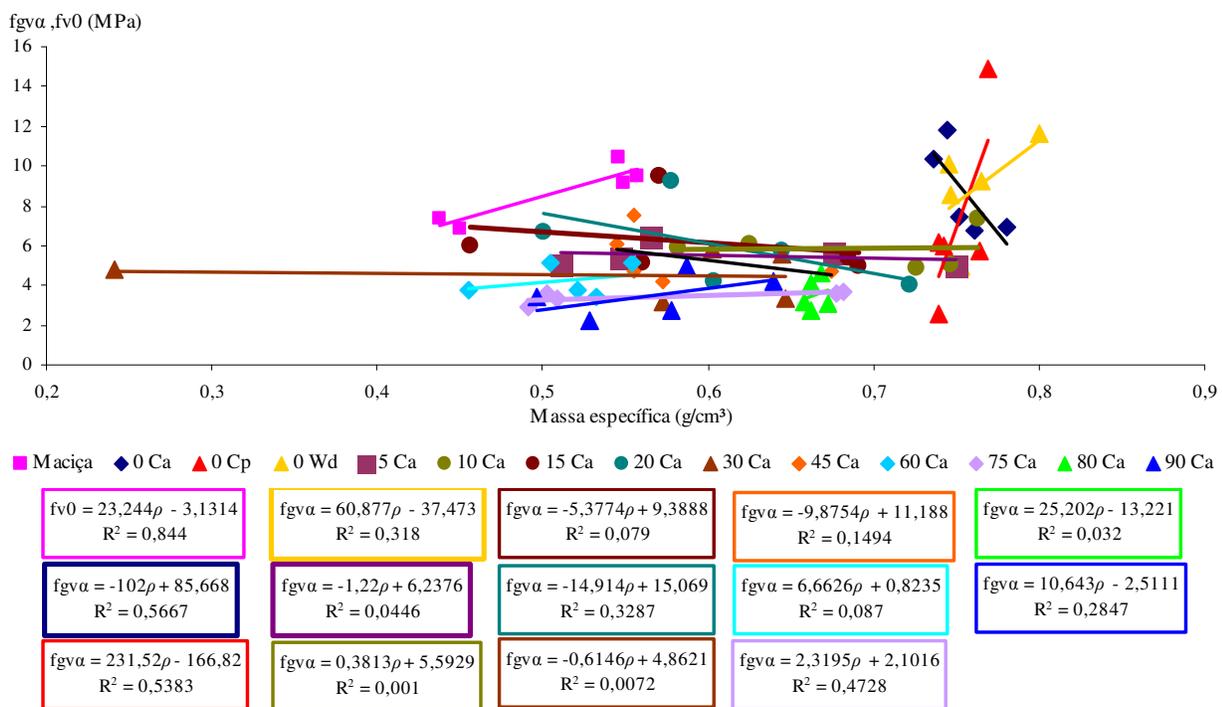
Para o caso da madeira de *Pinus elliottii* a maior eficiência em relação à madeira maciça (8,7 MPa) foi de 77% (6,7 MPa) nos corpos-de-prova colados com o adesivo Adespec no ângulo de inclinação do plano de cola de 30°.

Verificou-se nas Tabelas 21 e 23 que ocorreu uma elevada variabilidade, mesmo dentro de grupos de tratamentos. No grupo A, por exemplo, a resistência ao cisalhamento no plano de cola variou de 9,2 a 5,2 MPa no *Eucalyptus grandis* e de 8,92 a 4,53 MPa no *Pinus elliottii*. Não foi encontrada uma explicação geral para tamanha variabilidade, mas com um estudo dentro de cada tratamento foi possível eliminar duas potenciais causas de variação dentre as muitas que estiveram influenciando nos resultados.

A Figura 30 mostra que em geral a massa específica não influenciou, na faixa trabalhada de 0,45 a 0,8 g/cm³, a resistência ao cisalhamento no plano de cola. Na maioria dos casos o aumento da massa específica prejudicou ligeiramente a eficiência da colagem, contrariamente ao que ocorreu com o cisalhamento da madeira maciça.



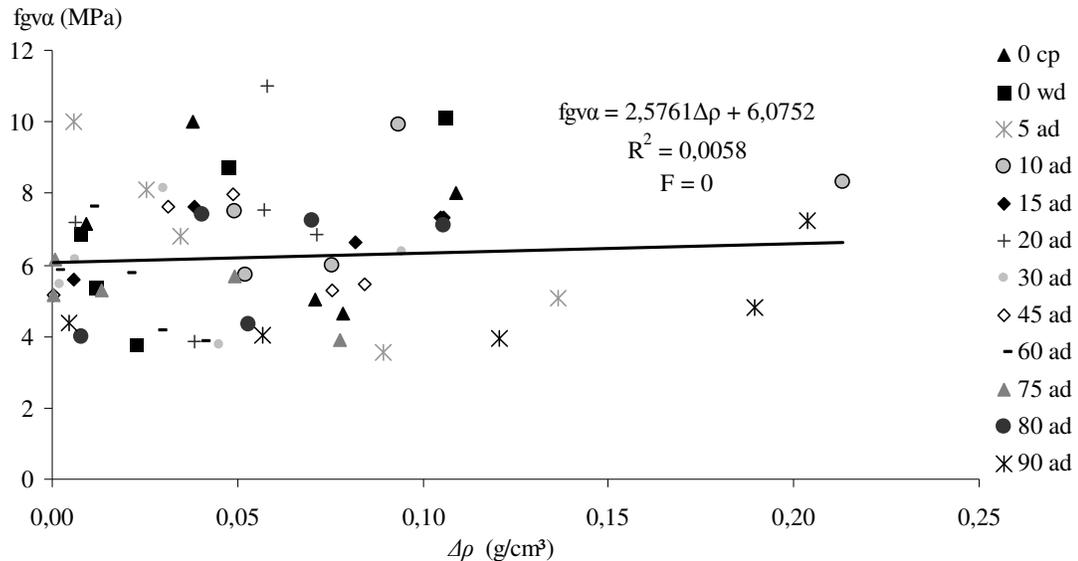
(a)



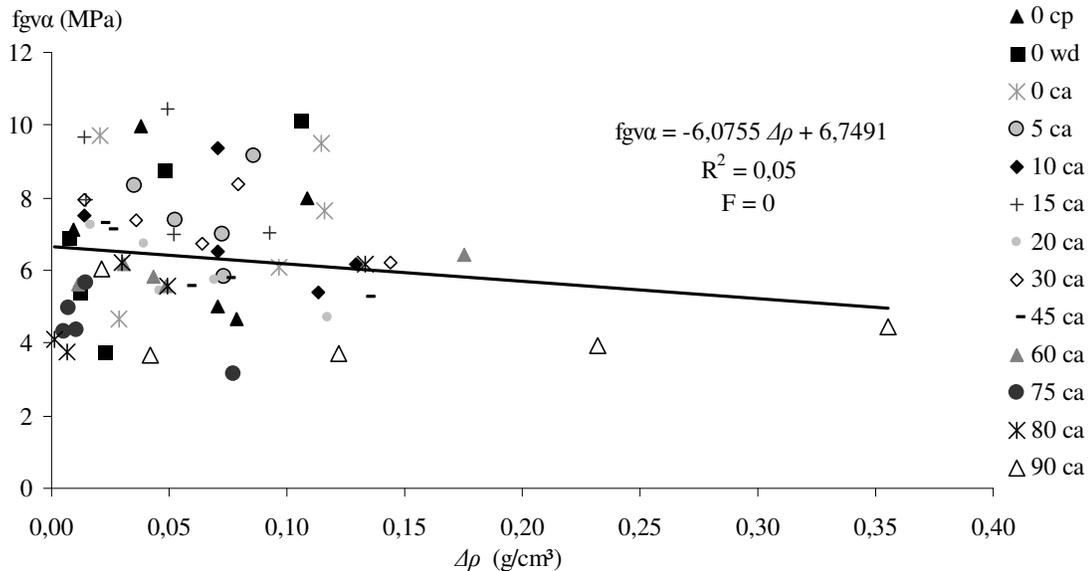
(b)

Figura 30 – Correlação da resistência ao cisalhamento no plano de cola (fgva) e na madeira maciça (fv0) com a massa específica (ρ) de *Eucalyptus grandis* (a) e *Pinus elliotii* (b) colados com os adesivos Cascorez (ca), Cascophen (cp) e Wonderbond (wd)

As Figuras 31 e 32 permitiram verificar que não existiu correlação entre a diferença das massas específicas das partes dos corpos-de-prova que estavam coladas e a resistência ao cisalhamento para nenhuma das espécies avaliadas, considerando os dois tipos de adesivos empregados.



(a)



(b)

Figura 31 – Correlação entre a resistência ao cisalhamento no plano de cola (fgva) e a diferença de massa específica ($\Delta\rho$) entre as partes do corpo-de-prova de *Eucalyptus grandis* que estavam coladas com o adesivo Adespec (a) e Cascorez (b) incluindo as referências Cascophen (cp) e Wonderbond (wd)

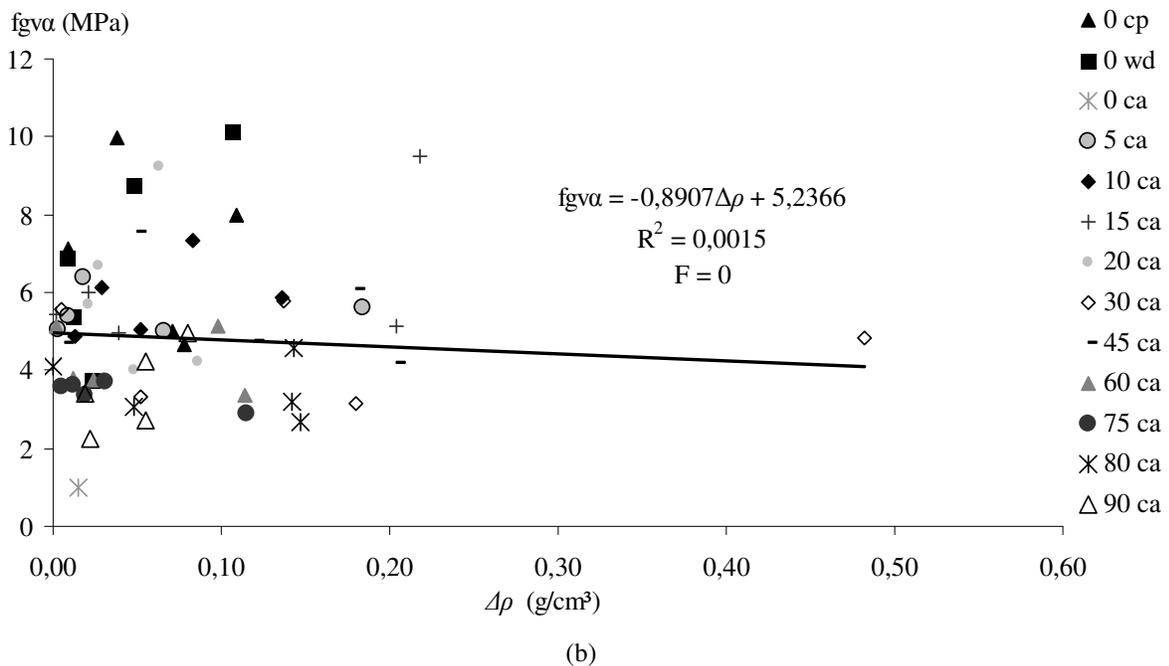
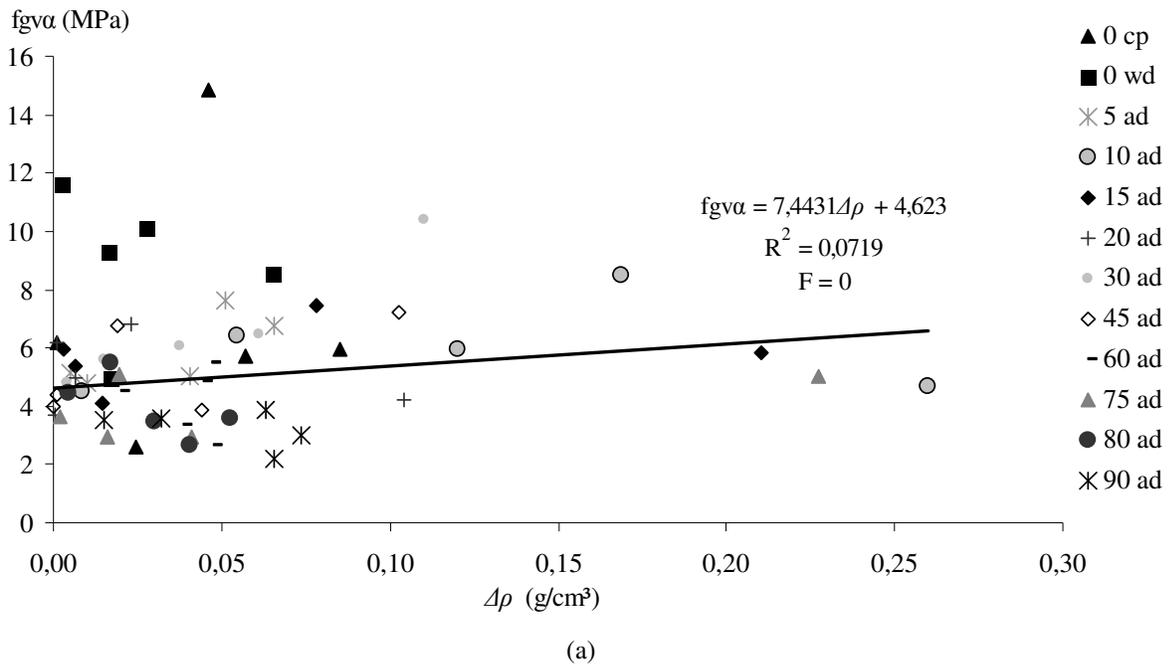


Figura 32 – Correlação entre a resistência ao cisalhamento no plano de cola (fgva) e a diferença de massa específica ($\Delta\rho$) entre as partes do corpo-de-prova de *Pinus elliottii* que estavam coladas com o adesivo Adespec (a) e Cascorez (b) incluindo as referências Cascophen (cp) e Wonderbond (wd)

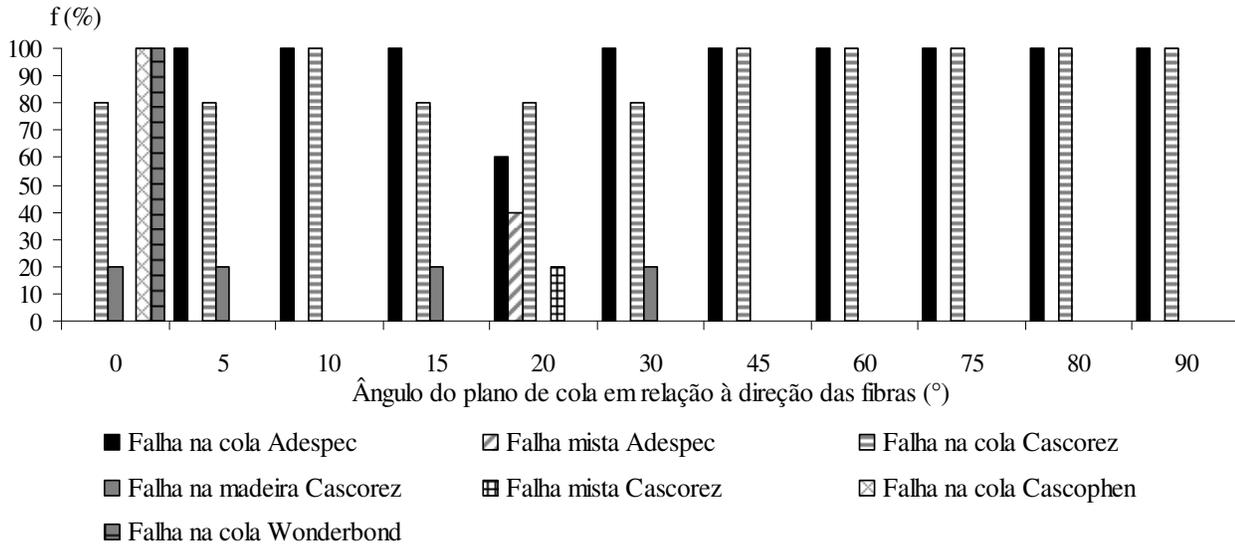
As condições de acabamento de superfícies, doses de adesivos e pressão de colagem foram mantidas em todos os tratamentos, mas não foram precisamente estabelecidas e monitoradas. Admitiu-se, portanto, que podem ter ocorrido algumas causas de variação relacionadas a essas variáveis que interagem entre si e com as características próprias da madeira no complexo fenômeno da adesão.

Os tipos de ruptura de uma emenda colada deveria ajudar na compreensão das possíveis interações entre características da madeira, características dos adesivos e características do processo, mas são ainda de avaliação subjetiva e imprecisa. Nos ensaios de cisalhamento foram observados 3 tipos de falha os quais foram analisados, para melhor compreensão do fenômeno importante da adesão.

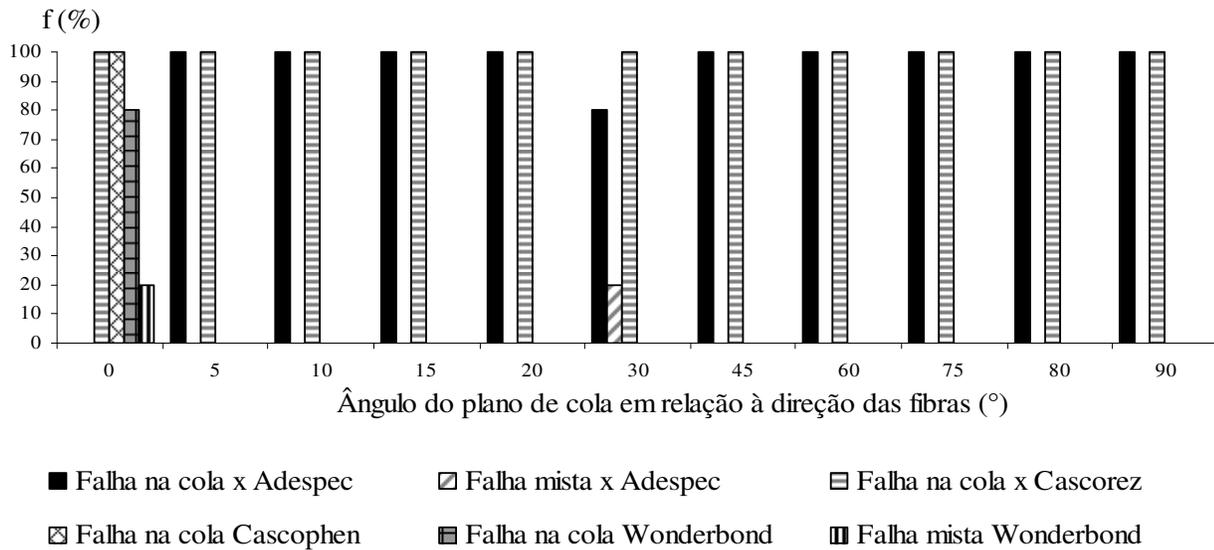
- Falha na cola: a ruptura ocorreu na cola sem envolver fratura na madeira;
- Falha na madeira: a ruptura ocorreu na madeira sem envolver fratura na cola;
- Falha mista a ruptura ocorreu parcialmente na madeira e parcialmente na cola, envolvendo apenas uma ou as duas partes do corpo-de-prova.

Em todos esses tipos ocorreram, majoritariamente fraturas frágeis, mas ocorreram também fraturas dúcteis conseqüentes de deformações não associadas ao cisalhamento.

A Figura 33 mostra a ocorrência desses tipos de falhas onde foi possível verificar que a presença de falhas mistas e falhas na madeira contribuíram para elevar resistência ao cisalhamento. Os ângulos de inclinação do plano de cola que apresentaram esses tipos de falhas exibiram maior eficiência na comparação da resistência ao cisalhamento no plano de cola com a resistência da madeira maciça tanto para o *Eucalyptus grandis* quanto para o *Pinus elliottii*.



(a)



(b)

Figura 33 – Frequências (f) de tipos de falha para cada ângulo de inclinação do plano de cola nas espécies *Eucalyptus grandis* (a) e *Pinus elliottii* (b)

4.4 Determinação de parâmetros geométricos ótimos do dente

Uma vez obtidos os dados de resistência ao cisalhamento no plano de cola ($f_{gv\alpha}$) e tensão última de tração da madeira maciça (f_t) efetuou-se um estudo dos parâmetros geométricos do dente a partir da aplicação da equação de equilíbrio entre forças de cisalhamento e de tração (eq. 8) que influenciam no comportamento da emenda dentada. Esse estudo foi feito para calcular-se o comprimento do dente que é necessário para otimizar a emenda.

Assim, no equilíbrio

$$F_{t0} = F_{cis} \quad (8)$$

A resistência ao cisalhamento no plano de cola ($f_{gv\alpha}$) é dada pela eq. (9) e a área de cisalhamento em uma emenda dentada é dada pela eq. (10)

$$f_{gv\alpha} = \frac{F_{cis}}{A_{cis}} \quad (9)$$

$$A_{cis} = 2ne \frac{L}{\cos \alpha} \quad (10)$$

Substituindo a eq. (10) na (9) obteve-se a força resistente de cisalhamento dada pela eq. (11)

$$F_{cis} = f_{gv\alpha} 2ne \frac{L}{\cos \alpha} \quad (11)$$

Onde:

F_{cis} : força de cisalhamento;

A_{cis} : área de cisalhamento;

n: número de dentes;

e: espessura da peça emendada;

L: comprimento do dente;

α : ângulo de inclinação da superfície colada do dente

A resistência à tração paralela é dada pela eq. (12), donde se obteve a força de tração como mostra a eq. (13a) para o caso da Figura 11(a) ou a eq. (13b) para o caso da Figura 11(b).

$$f_{t0} = \frac{F_t}{A_t} \quad (12)$$

$$F_t = np\ell \cdot f_{t0} \quad (13a)$$

$$F_t = npe \cdot f_{t0} \quad (13b)$$

p: passo do dente

Igualando-se a força resistente de cisalhamento com a força resistente de tração, como mostra a eq. (14), obteve-se uma identidade que permite calcular qualquer variável da emenda dentada em função dos demais parâmetros já conhecidos ou simulados. Admitiu-se neste caso que toda a tensão de tração foi transformada em tensão de cisalhamento na superfície do dente por considerar-se que as tensões normais a essa superfície são muito pequenas. Dependem do ângulo α que é sempre muito pequeno dada a geometria do dente. Esse ângulo depende do comprimento (L) e do passo (p) do dente como mostra a eq. (15).

$$f_{gv\alpha} 2ne \frac{L}{\cos\alpha} = f_{t0} npe \quad (14)$$

$$\cos\alpha = \frac{L}{\sqrt{L^2 + \left(\frac{p}{2}\right)^2}} = \frac{L}{\sqrt{L^2 + \frac{p^2}{4}}} \quad (15)$$

Substituindo a eq. (15) na (14) e eliminando-se os termos comuns obteve-se a identidade dada pela eq. (16), donde se obteve a eq. (17) que fornece o comprimento do dente (L) para se ter uma emenda dentada otimizada em termos de esforços. Observou-se nessa equação que o comprimento do dente depende da resistência à tração da madeira (f_{t0}), da resistência ao cisalhamento no plano inclinado de colagem ($f_{gv\alpha}$) e do passo (p) do dente que é a única variável controlável da emenda. O valor do passo do dente, que coincide com a espessura da fresa, tem sido definida, pelos fabricantes da ferramenta em função de seus processos de fabricação. A eq. (17) permitiu observar que quanto menor for o passo ou maior for a resistência ao cisalhamento

no plano de cola menor será o comprimento do dente necessário para a emenda.

$$f_{t0}p = 2f_{gv\alpha} \frac{L}{\sqrt{L^2 + \frac{p^2}{4}}} = 2f_{gv} \sqrt{L + \frac{p^2}{4}} \quad (16)$$

$$L = \frac{p}{2} \sqrt{\left(\frac{f_{t0}}{f_{gv\alpha}}\right)^2 + 1} \quad (17)$$

Com os valores $f_{t0} = 68 \text{ MPa}$ e $f_{gv5} = 7,5 \text{ MPa}$ obtidos na presente pesquisa para o *Eucalyptus grandis* (EG) colado com Cascorez (ca) e adotando o valor $p = 6 \text{ mm}$ obtido em catálogos de fabricantes de fresas de perfilamento calculou-se o comprimento (L) do dente ideal para essas condições como mostra a eq. (18a). A eq. (18b) mostra o cálculo do comprimento do dente efetuado com o valor de resistência ao cisalhamento no plano de cola inclinado de 5° (f_{gv5}) do Adespec (ad).

Os cálculos do comprimento do dente para Cascophen (cp) e Wonderbond (wd) mostrados nas equações (18c) e (18d) foram feitos com a resistência ao cisalhamento do plano de cola paralelo às fibras (f_{gv0}) com os valores respectivos de 6,96 e 6,99 MPa.

$$L_{EGca} = \frac{6}{2} \sqrt{\left(\frac{68,39}{7,51}\right)^2 + 1} = 27,48\text{mm} \quad (18a)$$

$$L_{EGad} = \frac{6}{2} \sqrt{\left(\frac{68,39}{6,70}\right)^2 + 1} = 30,76\text{mm} \quad (18b)$$

$$L_{EGcp} = \frac{6}{2} \sqrt{\left(\frac{68,39}{6,96}\right)^2 + 1} = 29,63\text{mm} \quad (18c)$$

$$L_{EGwd} = \frac{6}{2} \sqrt{\left(\frac{68,39}{6,99}\right)^2 + 1} = 29,50\text{mm} \quad (18d)$$

Esses valores estão bem próximos do valor de 28 mm recomendado pela ASTM D4688-99 para emendas estruturais. A Norma DIN 68 140 recomenda um comprimento do dente de 20 mm e para esse caso obteve-se pela eq. (17) o passo de 4,39 mm para o *Eucalyptus grandis* com cascorez.

4.5 Resistência à tração de emendas coladas com os adesivos Cascorez, Cascophen e Wonderbond

As Figuras 34 e 35 mostram os valores obtidos para os corpos-de-prova de *Eucalyptus grandis* colados com Cascorez, Cascophen e Wonderbond para dentes horizontais e verticais de 29,1 mm perfilados na empresa Matra que é especializada em fabricação de vigas laminadas coladas. Na Tabela 24 estão mostrados os resultados da análise estatística efetuada. Verificou-se que não houve interação dupla significativa, mas houve diferenças significativas entre adesivos e entre orientações do dente. Todos os adesivos apresentaram o mesmo comportamento relativo em qualquer das orientações do dente.

Tabela 24 – Análise de variância para resistência à tração de emendas dentadas com dentes verticais e horizontais colados com Cascorez, Cascophen e Wonderbond

Causas de Variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado Médio	Valor de F	Prob >F
Adesivo	2	368924,0595	184462,0298	23,67**	<,0001
Orientação dos dentes	1	111233,5610	111233,5610	14,28**	0,0003
Adesivo x Orientação	2	6749,3749	3374,6875	0,43	0,6500

** Significância a 1% de probabilidade

Para o caso das orientações dos dentes, o perfil vertical foi o que apresentou maior resistência à tração da emenda dentada. Essa diferença que tecnicamente não poderia existir foi explicada pela área de colagem individual do dente. No caso do perfil vertical essa área é menor e, portanto, penalizava menos quando havia algum defeito no dente. O defeito mais freqüente foi a redução do comprimento (L) das capas laterais do conjunto fêmea o que significa dizer que os dentes mais externos ficam parcialmente recobertos na sua face mais externa.

A superioridade das emendas com dentes verticais corrobora os resultados de diferentes pesquisas desenvolvidas. Marin (2006) registrou uma diferença levemente superior na resistência à tração em emendas de perfil vertical coladas com Cascophen.

Os adesivos foram classificados em dois grupos sendo o primeiro composto pelo adesivo Cascophen que apresentou resistência superior à do segundo grupo composto pelos adesivos Cascorez e Wonderbond.

A resistência à tração das emendas dentadas coladas com o adesivo Cascophen nos dentes verticais foi de (50,04 MPa) correspondente a 73,18% da resistência da madeira maciça (68,39 MPa).

Os corpos-de-prova colados com o adesivo Wonderbond na direção horizontal apresentaram, com o valor de resistência à tração de 26,53 MPa, a eficiência de 38,80% da resistência à tração na madeira maciça e foi considerada a menor de todas.

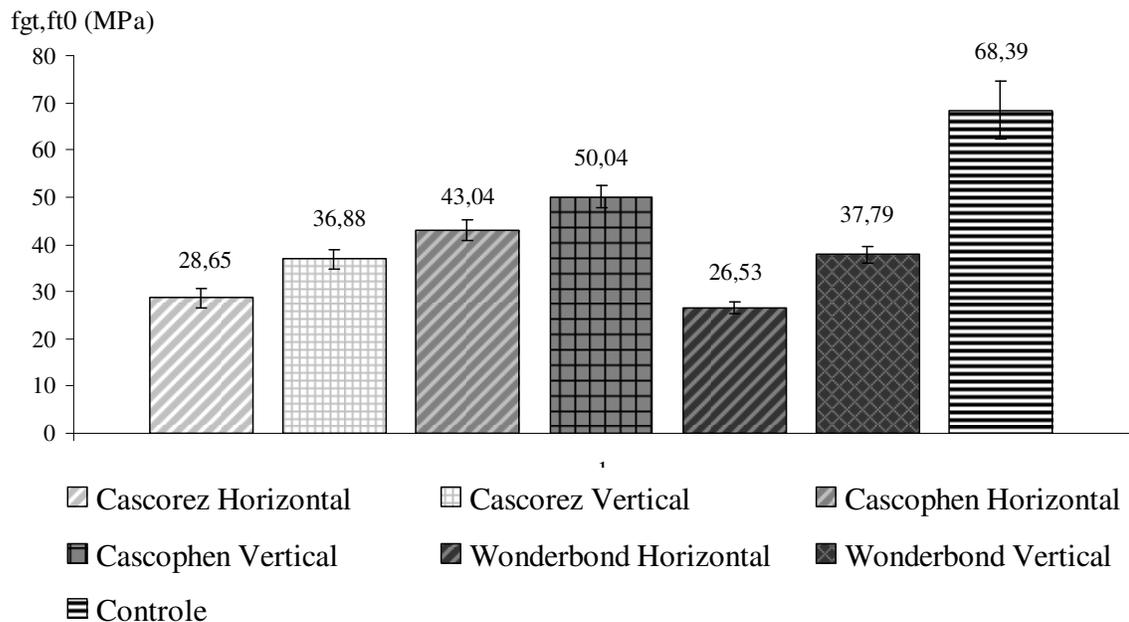


Figura 34 - Valores médios de resistência à tração de emendas dentadas coladas (fgt) e madeira maciça (fto)

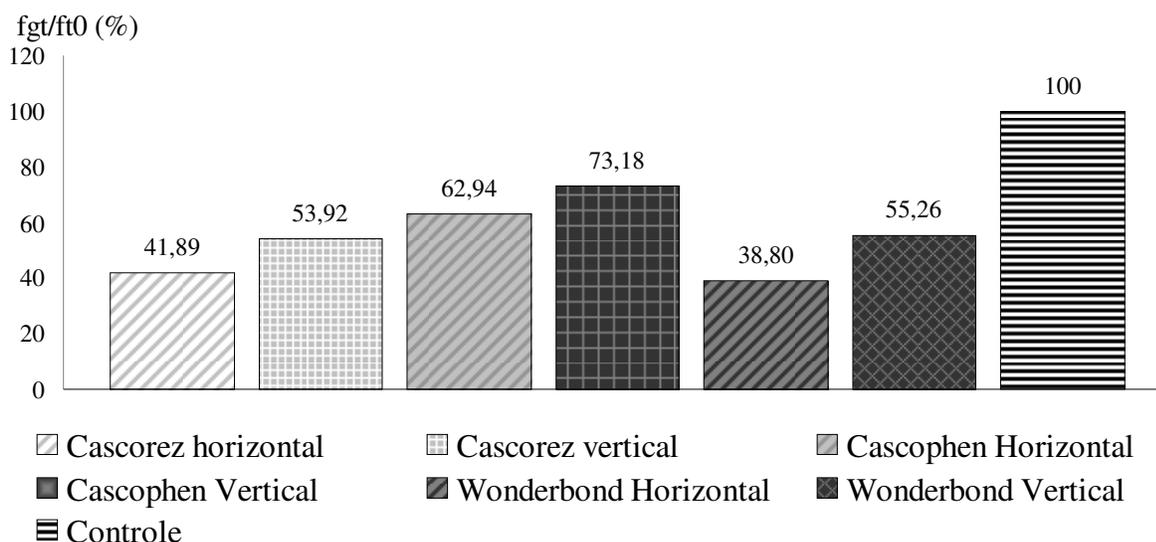


Figura 35 - Eficiência da resistência à tração de emendas dentadas coladas (fgt) em relação à madeira maciça (ft0)

Comparando-se essas eficiências com aquelas do cisalhamento no plano de cola mostrados na Figura 24 verificou-se o ensaio de tração na emenda colada com o Cascophen refletiu com fidelidade o ensaio de cisalhamento no plano de cola. Os outros 2 adesivos foram penalizados por causas incontroladas. Ruptura do tipo 1 que denota má colagem por causa intrínseca do adesivo ou falta de pressão na colagem e ruptura do tipo 5 que evidencia ponto excessivamente fraco ou ponto de concentração de tensões imposta pelas garras da máquina no ensaio de tração da barra ligada. Nos adesivos Cascorez e Wonderbond esses 2 tipos de rupturas foram muito frequentes.

A Tabela 25 apresenta as médias de resistência à tração obtidas para os perfis verticais, comparadas com aquelas geradas no estudo desenvolvido por Oliveira Jr. et al (2006), que utilizou uma pressão de colagem de 10 MPa aplicada durante 30 segundos. Nesse estudo os adesivos Cascorez e Wonderbond apresentaram-se similares e até superiores ao Cascophen e refletiram os resultados dos ensaios de cisalhamento da Figura 24. Isso significa que a resistência à tração de emendas dentadas são muitos dependentes dos procedimentos de execução e precisa ser melhor compreendida tanto na teoria quanto na prática.

Tabela 25 – Resistência à tração de emendas dentadas (fgt_i , MPa) e seus respectivos valores relativos à resistência da madeira maciça ($fgt_i/ft0_i$, %)

	Cascorez	Cascophen	Wonderbond	Controle
fgt_1	36,88	50,04	37,79	68,39
$fgt_1/ft0_1$	53,92	73,17	55,25	100
fgt_2	56,91	56,40	59,77	77,36
$fgt_2/ft0_2$	73,56	72,89	77,26	100

$fgt_1, ft0_1$: Dados da presente pesquisa (2009)

$fgt_2, ft0_2$: Dados tomados de Oliveira Jr. et al (2006)

A Figura 36 exibe a frequência dos modos de ruptura observados nos ensaios de tração e a Figura 37 apresenta exemplos das rupturas ocorridas de acordo com os modos estabelecidos pela Norma ASTM D 4688-99.

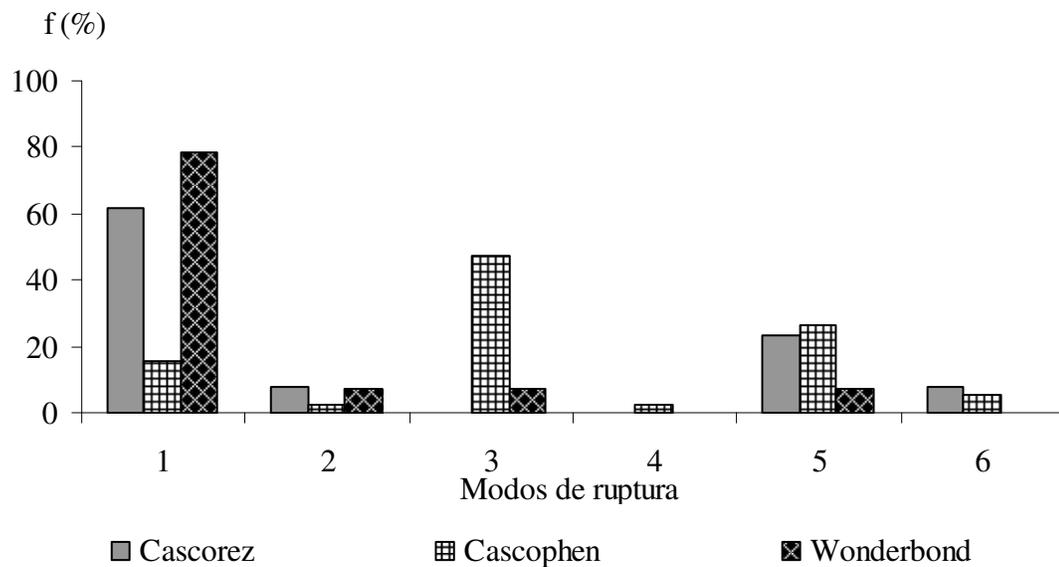
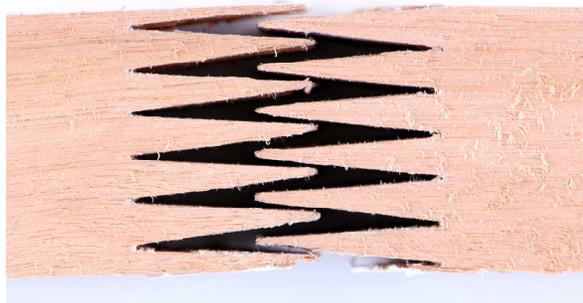


Figura 36 – Frequências (f) de modos de ruptura em emendas dentadas coladas



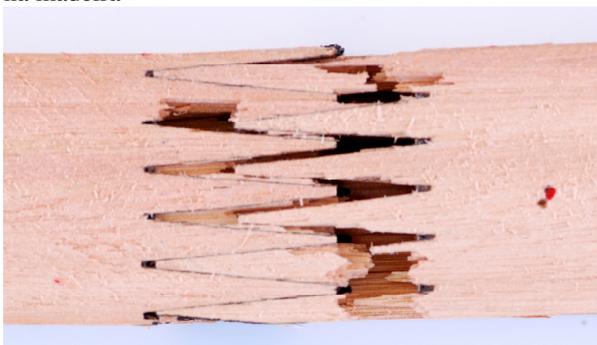
Modo de ruptura 1

Ruptura, na maioria das vezes, ao longo das superfícies da linha de cola com poucas falhas (< 70%) na madeira



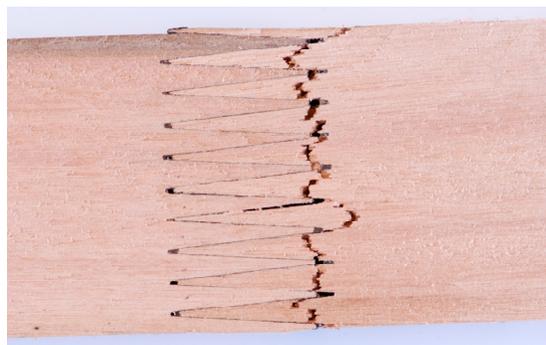
Modo de ruptura 2

Ruptura predominante ao longo das superfícies da linha de cola, com falha na madeira (>70%)



Modo de ruptura 3

Ruptura predominante na superfície da emenda, com algumas falhas na raiz dos dentes e considerável ruptura por cisalhamento em toda a superfície do perfil



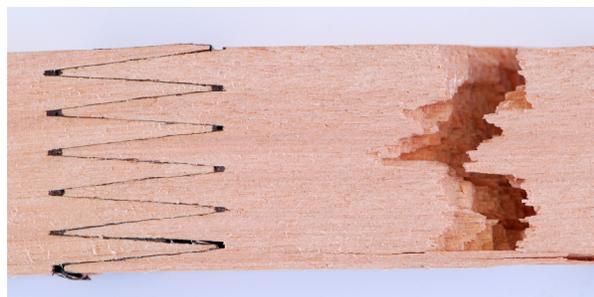
Modo de ruptura 4

Ruptura predominante na raiz da emenda, e pouca falha na superfície dos dentes



Modo de ruptura 5

Ruptura que começa na emenda e se propaga fora dela com praticamente 100% na madeira



Modo de ruptura 6

Ruptura na madeira afastada da emenda e não dependentes

Figura 37 – Modos de ruptura observados no ensaio de tração paralela em emendas dentadas segundo a ASTM D 4688-99

4.6 Resistência à flexão de lâminas emendadas e vigas maciças e compostas

Não tendo sido possível, por limitação de equipamentos, trabalhar com a relação L/h da NBR7190, procedeu-se uma investigação para quantificar 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 $b \times h$.

As equações (19) e (20) originárias do princípio dos trabalhos virtuais fornecem as componentes da flecha total em um dado ponto do comprimento da viga sendo a primeira ($f\sigma$) devida ao momento fletor e a segunda ($f\tau$) ao esforço cortante.

$$f\sigma = \int_L \frac{M_r M_1}{EI} dx \quad (19)$$

$$f\tau = \int_L \frac{c Q_r Q_1}{GS} dx \quad (20)$$

Onde:

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;

I : momento de inércia em relação ao centro de gravidade da seção transversal;

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;

S : seção transversal;

L : comprimento da viga.

Os diagramas de momento e de cortante relativos ao ensaio estão mostrados na Figura 38 e suas funções respectivas foram construídas como apresentadas nas equações (21 a 24).

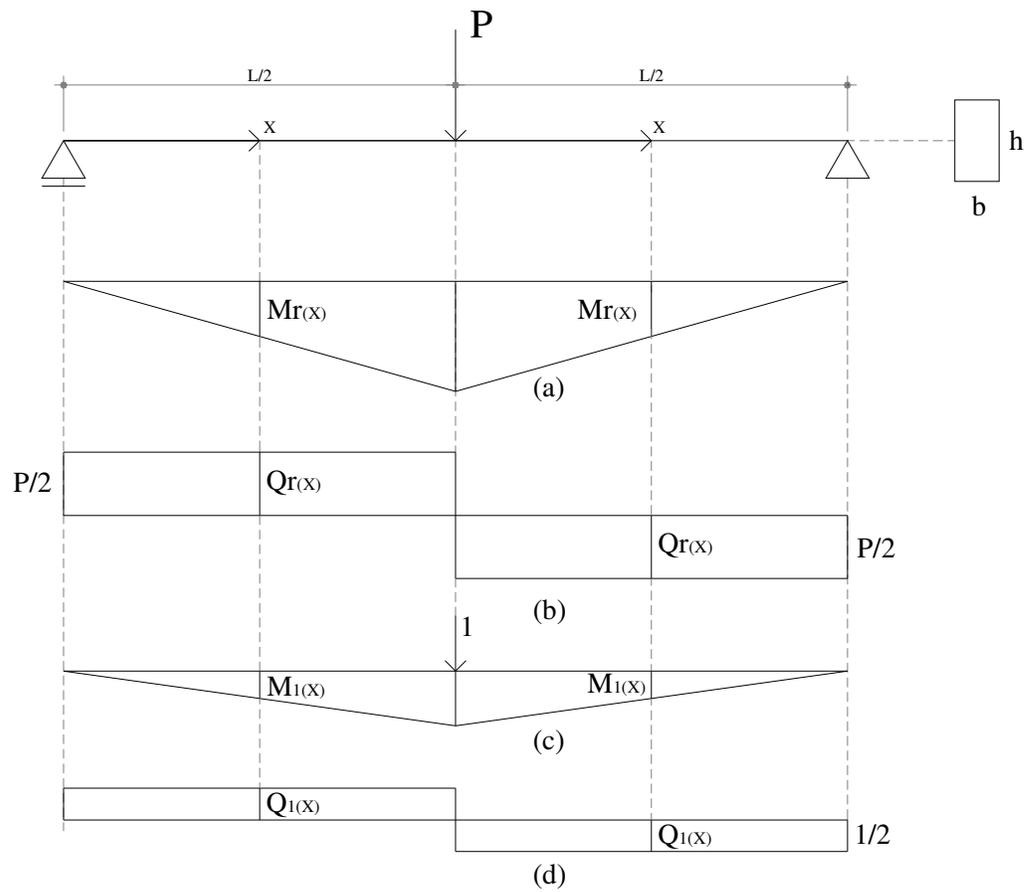


Figura 38 – Diagramas de momentos fletores devidos ao carregamento real (a) e à carga unitária (c) e diagramas de esforços cortantes respectivos (b) e (d)

$$M_r(x) = \frac{P}{2}x \text{ para } 0 \leq x \leq \frac{L}{2} \quad (21a)$$

$$Q_r = \frac{P}{2} \quad (21b)$$

$$M_r(x) = \frac{P}{2}x - P\left(x - \frac{L}{2}\right) = \frac{P}{2}(L - x) \text{ para } \frac{L}{2} \leq x \leq L \quad (22a)$$

$$Q_r = -\frac{P}{2} \quad (22b)$$

$$M_1(x) = \frac{x}{2} \text{ para } 0 \leq x \leq \frac{L}{2} \quad (23a)$$

$$Q_1 = \frac{1}{2} \quad (23b)$$

$$M_1(x) = \frac{1}{2}(L-x) \text{ para } \frac{L}{2} \leq x \leq L \quad (24a)$$

$$Q_1 = -\frac{1}{2} \quad (24b)$$

Substituindo as equações (21a), (23a), (22a) e (24a) na eq. (19) e as equações (21b), (23b), (22b) e (24b) na eq. (20) obtiveram-se as equações (25) e (26) que integradas em todo o comprimento da viga forneceram as equações (27) e (28) que são respectivamente as componentes da flecha devida às tensões normais e às tensões cisalhantes.

$$f\sigma = \int_0^{\frac{L}{2}} \frac{\frac{P}{2}x \cdot \frac{1}{2}x}{EI} dx + \int_{\frac{L}{2}}^L \frac{\frac{P}{2}(L-x) \cdot \frac{1}{2}(L-x)}{EI} dx \quad (25)$$

$$f\tau = \int_0^{\frac{L}{2}} \frac{c \cdot \frac{P}{2} \cdot \frac{1}{2}}{GS} dx + \int_{\frac{L}{2}}^L \frac{c(-\frac{P}{2})(-\frac{1}{2})}{GS} dx \quad (26)$$

$$f\sigma = \frac{PL^3}{48EI} = \frac{P}{4Eb} \left(\frac{L}{h} \right)^3 \quad (27)$$

$$f\tau = \frac{PcL}{4GS} = \frac{Pc}{4Gb} \left(\frac{L}{h} \right) \quad (28)$$

Foi criado, então, o índice de influência do cortante (**IFC**), calculado pelas equações (29), que expressam a contribuição do cortante na flecha total e conseqüentemente no módulo de elasticidade à flexão.

$$\text{IFC} = \frac{f\tau}{f\sigma + f\tau} \quad (29a)$$

$$\text{IFC} = \frac{1}{\left(\frac{L}{h} \right)^2 + 1} \quad (29b)$$

A Figura 39 foi elaborada com a eq. (29b) para mostrar a influência do esforço cortante no módulo de elasticidade à flexão. Verificou-se que o efeito do cortante pode ser desprezado a partir da relação $L/h=12$ acima da qual o IFC pode ser considerado nulo. Essa constatação permitiu fixar-se a relação $L/h=16$ para os ensaios de flexão em lâminas de $h=3$ cm e vigas compostas de $h=9$ cm no mesmo equipamento.

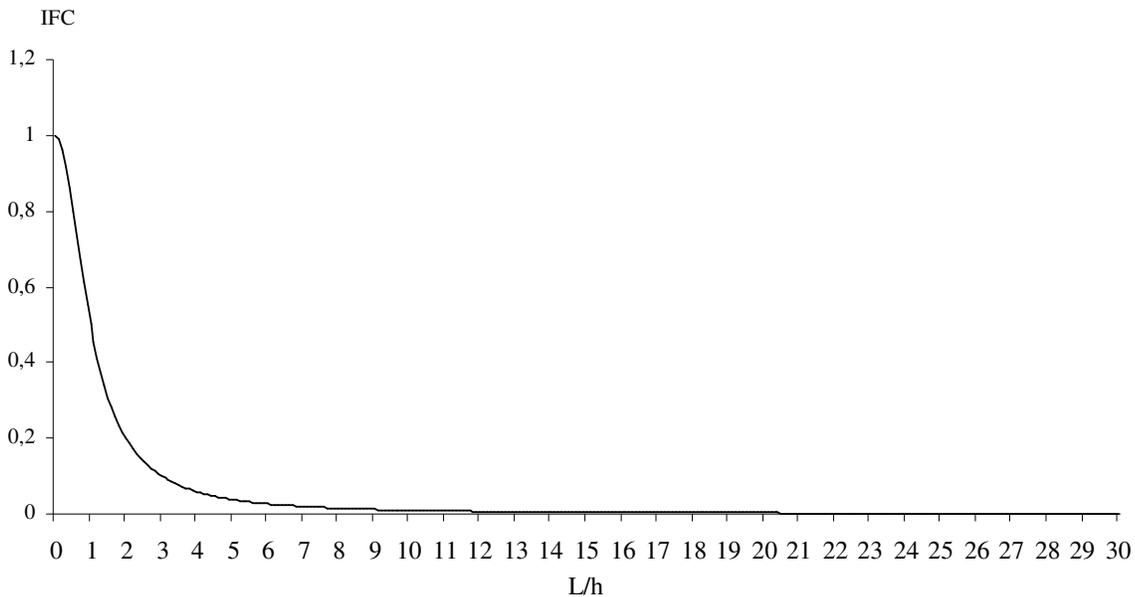


Figura 39 – Índice de influência do esforço cortante (IFC) em função da relação entre o vão (L) e a altura (h) da viga

A Figura 40 apresenta os valores médios de MOE obtidos para cada um dos tratamentos avaliados e as Tabelas 26 e 27 mostram respectivamente a análise de variância e as comparações de médias para essa variável.

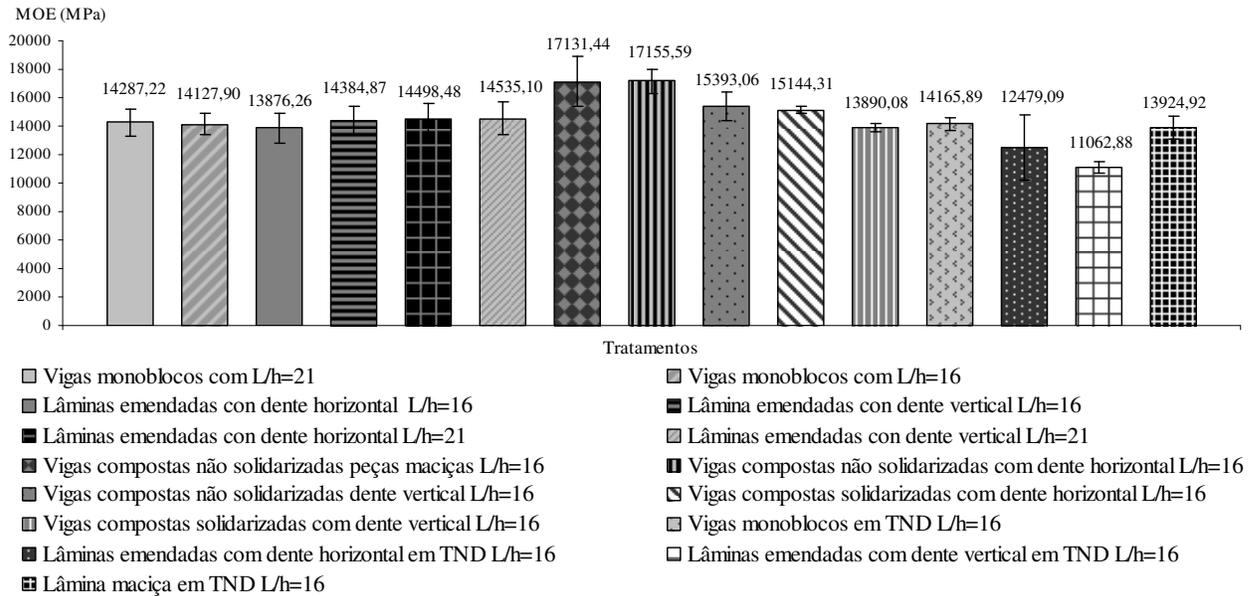


Figura 40 - Valores médios do módulo de elasticidade na flexão (MOE) obtidos nos diferentes ensaios destrutivos e não destrutivos

Tabela 26 - Análise de variância para módulo de elasticidade (MOE) considerando o total de tratamentos incluindo os destrutivos e os não destrutivos

Causas de Variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado Médio	Valor de F	Prob >F
Tratamentos	14	213162884,299	17763573,692	2,952**	0,004
Resíduo	58	300913320,370	6018266,407		
Total	72	514076204,669			

** Significância a 1% de probabilidade

Para o caso dos módulos de elasticidade obtido nos 15 tratamentos avaliados, houve diferença significativa apenas entre o grupo das vigas compostas não solidarizadas e o grupo das lâminas ensaiadas em teste não destrutivos (TND) entre pelo menos dois deles.

Tabela 27 - Comparação de médias do módulo de elasticidade à flexão (MOE) para os 15 diferentes tratamentos

Agrupamento Tukey	Média (MPa)	Tratamento
A	17.155,59	Vigas compostas não solidarizada com dente horizontal
A	17.131,44	Vigas compostas não solidarizada sem emenda
A B	15.393,06	Vigas compostas não solidarizada com dente vertical
A B	15.144,31	Vigas compostas solidarizadas com dente horizontal
A B	14.535,10	Lâminas emendadas dente vertical e L/h=21
A B	14.498,48	Lâminas emendadas dente horizontal e L/h=21
A B	14.384,87	Lâminas emendadas com dente vertical e L/h=16
A B	14.287,22	Vigas monobloco L/h= 21
A B	14.165,89	Vigas monobloco em TND L/h = 16
A B	14.127,90	Vigas monobloco L/h= 16
A B	13924,92	Lâminas maciças em TND L/h = 16
A B	13.890,08	Vigas compostas solidarizadas com dente vertical
A B	13.876,26	Lâminas emendadas com dente horizontal L/h= 16
B	11.062,88	Lâminas com emendadas com dente vertical e L/h=16 em TND
B	10.580,31	Lâminas emendadas com dente horizontal e L/h=16 em TND

O módulo de ruptura foi avaliado para os onze tratamentos destrutivos. A Figura 41 mostra os valores médios dos diferentes tratamentos e a Tabela 28 apresenta a correspondente análise estatística mostrando que houve diferença significativas entre pelo menos 2 tratamentos.

Tabela 28 - Análise de variância para módulo de ruptura (MOR) considerando o total de tratamentos incluindo os destrutivos e os não destrutivos

Causas de Variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado Médio	Valor de F	Prob >F
Tratamentos	10	20632,07600	2063,20760	26,70 **	<.0001
Residuo	42	3244,89896	77,25950		
Total	52	23876,97495			

** Significância a 1% de probabilidade

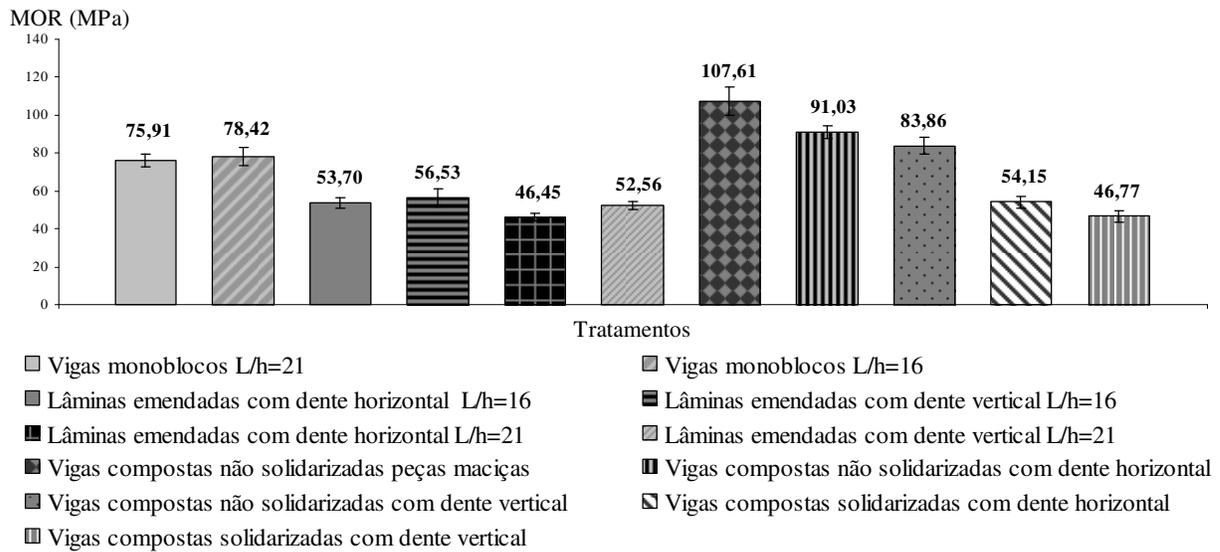


Figura 41 - Valores médios de MOR obtidos nos diferentes ensaios destrutivos

A Tabela 29 apresenta os resultados da comparação de médias pelo Teste de Tukey, onde os tratamentos foram classificados em 4 grupos de acordo com sua resistência à flexão.

Tabela 29 - Comparação entre médias do módulo de ruptura à flexão para os diferentes tratamentos avaliados

Agrupamento Tukey	Média (MPa)	Tratamento
A	107,612	Vigas compostas não solidarizadas e sem emenda
A B	91,031	Vigas compostas não solidarizadas com dente horizontal
B	83,856	Vigas compostas não solidarizadas com dente vertical
B	78,422	Viga monobloco L/h= 16
B	75,906	Viga monobloco L/h= 21
C	56,527	Lâminas emendadas com dente vertical L/h=16
C	54,151	Vigas compostas solidarizadas com dente horizontal
C	53,703	Lâminas emendadas com dente horizontal L/h= 16
C	52,559	Lâminas emendadas com dente vertical L/h=21
C	46,770	Vigas compostas solidarizadas com dente vertical
C	46,453	Lâminas emendadas com dente horizontal L/h=21

Ao analisar os resultados obtidos para o MOE e o MOR em monoblocos de seção transversal (6 x 6) cm com relação L/h=16 e L/h=21, verificou-se que não houve diferença significativas entre elas. Isso permitiu comprovar que não houve influência importante do cortante como já fora previsto anteriormente através do IFC. Nas Tabelas 30 e 31 estão mostrados os resultados das análises estatísticas efetuadas.

Tabela 30 – Análise de variância para módulo de elasticidade (MOE) em madeira maciça com relação L/h=21 e L/h=16

Causas de Variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado Médio	Valor de F	Prob >F
Relação L/h	1	63457,16	63457,16	0,02	0,8971
Resíduo	8	28468772,04	3558596,50		
Total	9	28532229,20			

Tabela 31 - Análise de variância para módulo de ruptura (MOR) em madeira maciça com relação L/h=21 e L/h=16

Causas de Variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado Médio	Valor de F	Prob >F
Relação L/h	1	15,8261	15,8261	0,18	0,6797
Resíduo	8	690,2723	86,2840		
Total	9	706,0984			

As Tabelas 32 e 33 apresentam os resultados das análises efetuadas para lâminas emendadas, com dentes horizontais e verticais com relações L/h=16 e L/h=21. Observou-se que não houve diferenças significativas entre tipos de dente e entre relações L/h, tanto para MOE quanto para o MOR.

Tabela 32 - Análise de variância para módulo de elasticidade (MOE) em lâminas emendadas com relação L/h=16 e L/h=21

Causas de Variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado Médio	Valor de F	Prob >F
Orientação do dente	1	349730,9200	349730,9200	0,07	0,8016
Relação L/h	1	701966,2894	701966,2894	0,13	0,7222
O * R	1	262087,6733	262087,6733	0,05	0,8278

Tabela 33 - Análise de variância para módulo de ruptura (MOR) em lâminas emendadas com relação L/h=16 e L/h=21

Causas de Variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado Médio	Valor de F	Prob >F
Orientação do dente	1	93,7844	93,7844	2,19	0,1596
Relação L/h	1	148,0584	148,0584	3,46	0,0827
O * R	1	12,6762	12,6762	0,30	0,5944

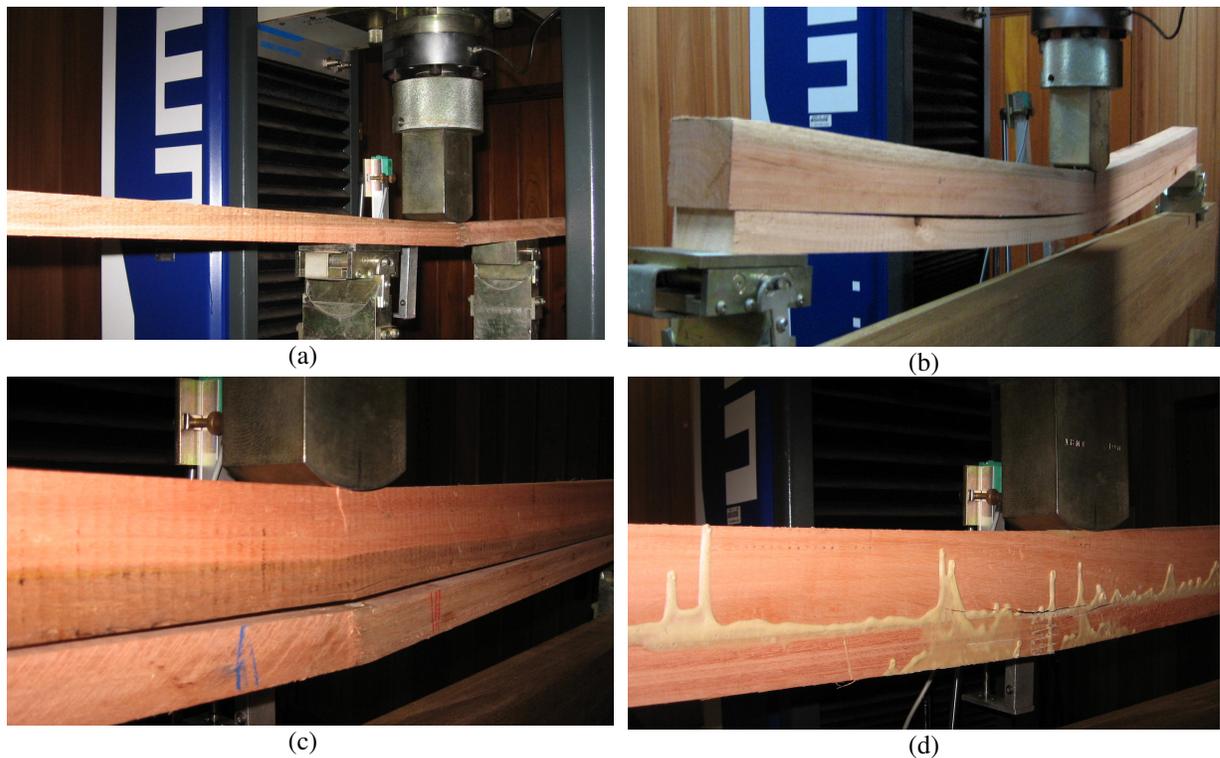


Figura 42 – Exemplo de lâmina com emenda horizontal (a), viga composta de peças maciças não solidarizadas (b), viga composta não solidarizada com lâmina emendada (c) e viga composta com lâmina emendada solidarizada com adesivo Wonderbond (d) ensaiadas à flexão

Ao analisar os resultados obtidos para o MOE na flexão de vigas laminadas solidarizadas e não solidarizadas com lâminas emendadas em perfil vertical e horizontal verificou-se que houve diferenças significativas entre orientações do dente e entre condições de vinculação das lâminas emendadas. Não houve interação entre condição de vinculação e orientação do dente indicando que a orientação do dente apresenta o mesmo comportamento tanto na viga composta com lâminas solidarizadas quanto na viga composta não solidarizada (Tabela 34).

Tabela 34 - Análise de variância para módulo de elasticidade (MOE) em vigas composta de lâminas emendadas e não solidarizadas, com relação $L/h=16$

Causas de Variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado Médio	Valor de F	Prob>F
Condição de vinculação	1	14529462,50	14529462,50	7,31**	0.0164
Orientação do dente	1	10706812,18	10706812,18	5,38**	0.0348
C * O	1	303951,40	303951,40	0,15	0.7013

** Significância a 1% de probabilidade

No caso do MOR (Tabela 35), houve diferenças significativas entre as vigas solidarizadas e as vigas não solidarizadas. Houve também diferenças entre orientação vertical e horizontal do dente. Por meio do teste de comparação de médias de Tukey verificou-se que as vigas não solidarizadas apresentaram um MOR superior (87,44 MPa) ao atingido pelas vigas solidarizadas (50,46 MPa).

No caso das orientações horizontal e vertical do dente encontrou-se que a horizontal exibiu um MOR (72,60 MPa) superior ao da vertical (63,25 MPa).

Tabela 35 - Análise de variância para módulo de ruptura (MOR) em vigas laminadas solidarizadas e não solidarizadas, com relação L/h=16

Causas de Variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado Médio	Valor de F	Prob >F
Condição de vinculação	1	6436,6042	6436,6042	116,89**	<.0001
Orientação do dente	1	249,2855	249,2855	4,53**	0.0504
C * O	1	0,0495	0,0495	0,00	0.9765

** Significância a 1% de probabilidade

A viga composta não solidarizada (**vcns**) apresentou maior resistência do que a da viga maciça, mas a diferença foi entendida como influência do momento de inércia (**I**). Na viga composta não solidarizada o momento de inércia foi tratado como a soma dos individuais, ou seja, como se fossem 2 vigas independentes trabalhando juntas. Isso não ocorreu porque o atrito contribuiu para elevar o momento de inércia global. Refazendo o cálculo utilizando-se o MOE da viga maciça verificou-se que o momento de inércia da **vcns** ficou entre o seu momento de inércia teórico e o momento de inércia teórico da viga maciça de altura equivalente. As equações (31) mostram que o momento de inércia real da **vcns** (I_{Rvcns}) foi **1,21** vezes o **I** teórico da **vcns** (I_{Tvcns}) e a eq. (32) mostra que essa relação subiu para **1,39** quando calculadas pelas resistências.

$$I_{Rvcns} = \frac{E_{vcns} \cdot I_{Tvcns}}{E_{vm}} = \frac{E_{vcns}}{E_{vm}} \cdot \left(\frac{6 \cdot 6^3}{12} + \frac{6 \cdot 3^3}{12} \right) \quad (31a)$$

$$I_{Rvcns} = \frac{E_{vcns}}{E_{vm}} \cdot I_{Tvcns} = \frac{17131,44}{\frac{14287,22 + 14127,90}{2}} \cdot (121,5) = 1,21 \cdot (121,5) = 146,5 \text{cm}^4 \quad (31b)$$

$$I_{Rvcns} = \frac{MOR_{vcns}}{MOR_{vm}} \cdot I_{Tvcns} = \frac{107,61}{\frac{78,42 + 75,91}{2}} \cdot (121,5) = 1,39 \cdot (121,5) = 169,4 \text{cm}^4 \quad (32)$$

A viga composta solidarizada com emenda (**vcse**) apresentou MOE similar ao da viga maciça. O I real dessa viga (I_{Rvcse}) foi igual a **1,02** vezes (eq. 33) o I teórico da viga composta solidarizada com emenda (I_{Tvcse}), calculado com o MOE da viga maciça. Isso mostra que a emenda teve pouca influência na elástica da viga, dada que é de comprimento desprezível quando comparado com o comprimento da viga.

$$I_{Rvcse} = \frac{\frac{15144,31 + 13890,08}{2}}{\frac{14287,22 + 14127,90}{2}} \cdot I_{Tvcse} = 1,02 \cdot I_{Tvcse} \quad (33)$$

A emenda foi mais restritiva na ruptura provocando como mostra a eq. (34) uma significativa redução do momento de inércia.

$$I_{Rvcse} = \frac{MOR_{vcse}}{MOR_{vm}} \cdot I_{Tvcse} = \frac{\frac{54,15 + 46,77}{2}}{\frac{75,91 + 78,42}{2}} \cdot I_{Tvcse} = 0,65 \cdot I_{Tvcse} \quad (34)$$

A lâmina emendada trabalhando como viga apresentou menor eficiência em relação à viga maciça. O módulo de elasticidade não foi afetado pela emenda (eq. 35), mas a resistência foi de **0,68** vezes a resistência da viga maciça (eq. 36).

$$I_{Rle} = \frac{\frac{14535,10 + 14498,48 + 14384,87 + 13876,26}{4}}{\frac{14287,22 + 14127,90}{2}} \cdot I_{Tle} = 1,01 \cdot I_{Tle} \quad (35)$$

$$I_{Rle} = \frac{\frac{56,53 + 53,70 + 52,56 + 46,45}{4}}{\frac{78,42 + 75,91}{2}} \cdot I_{Tle} = 0,68 \cdot I_{Tle} \quad (36)$$

O valor de **0,65** encontrado para a relação entre o I_{Rvcse} e o I_{Tvcse} e o valor de **0,68** encontrado para a relação entre o I_{Rle} e o I_{Tle} foram considerados muito próximos da eficiência da junta colada obtida nos ensaios de cisalhamento e também da eficiência da emenda dentada obtida nos ensaios de tração.

O I real da lâmina emendada (I_{Rle}) foi de **0,98** do I teórico da lâmina (I_{Tle}) quando comparada com a viga composta solidarizada com emenda calculado com os respectivos MOEs, evidenciando que a emenda que contém a linha neutra apresentou comportamento similar ao da emenda localizada abaixo da linha neutra (eq. 37).

$$I_{Rle} = \frac{\frac{13876,26 + 14384,86 + 14535,10 + 14198,48}{4}}{\frac{13890,08 + 15144,31}{2}} \cdot I_{Tle} = 0,98 \cdot I_{Tle} \quad (37)$$

Na comparação das resistências à flexão da lâmina emendada com a viga composta solidarizada com lâmina emendada o I real da lâmina emendada (I_{Rle}) foi **1,03** vezes o seu I teórico (I_{Tle}) como mostra a eq. (38). A lâmina emendada trabalhando como viga sujeita a tensões maiores de tração e compressão apresentou o mesmo comportamento da viga composta solidarizada com lâmina emendada sujeita a apenas tensão de tração também no estado limite último.

$$I_{Rle} = \frac{53,70 + 56,53 + 52,56 + 46,45}{\frac{54,15 + 46,77}{2}} \cdot I_{Tle} = 1,03 \cdot I_{Tle} \quad (38)$$

A Figura 43 apresenta os valores das eficiências, calculadas como a relação entre o momento de inércia real e o momento de inércia teórico para os diferentes tipos de vigas analisadas.

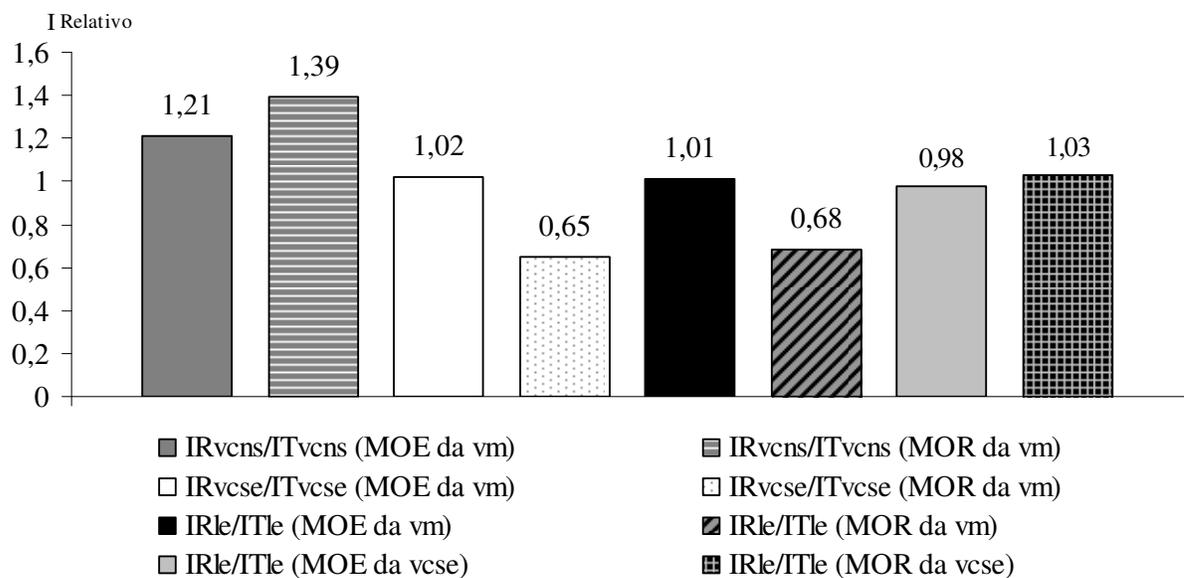


Figura 43 – Eficiências das vigas compostas não solidarizadas (vcns), das vigas compostas solidarizadas com emenda (vcse) e das lâminas emendadas (le) expressas como relações de momento de inércia real (IR) e teórico (IT)

5 CONCLUSÕES

A resistência ao cisalhamento no plano de cola diminui com o seu ângulo de inclinação em relação à orientação das fibras, mas nem sempre a resistência é continuamente decrescente. Pequenos ângulos podem ser favoráveis à resistência ao cisalhamento no plano de cola, como aconteceu no *Eucalyptus grandis*, por favorecer a ancoragem do adesivo na madeira. Há implicações do adesivo, da qualidade da superfície, da pressão de contato e principalmente das características e propriedades da madeira no fenômeno da adesão.

Falha na cola ou falha na madeira não pode qualificar a resistência de uma emenda sujeita a cisalhamento no plano de cola porque a primeira está relacionada com o adesivo e/ou ancoragem deficiente e a segunda porque ocorreu em um ponto de menor resistência da própria madeira. A resistência da emenda deve ser avaliada por falha mista que indica interação madeira-adesivo.

O comprimento do dente depende da resistência à tração, da resistência ao cisalhamento no plano de cola inclinado em relação às fibras e do passo do dente. A força resultante de tração na emenda é menor do que a força resultante de tração na barra porque há sempre uma diferença entre a área da barra e a área projetada dos dentes no plano da seção transversal da barra. Os dentes não preenchem os volumes produzidos para eles. A resistência da emenda dentada deve ser caracterizada por ocorrência alternada de rupturas por cisalhamento misto na superfície do dente e ruptura por tração na seção reduzida.

A resistência à tração da emenda é difícil de ser avaliada, assim como a resistência à tração da madeira maciça. A ruptura pode ocorrer fora da emenda, principalmente nas extremidades do vão de tração. O dente vertical apresenta melhor comportamento do que o dente horizontal, mas admite-se que a diferença é devida a causas de variação não controladas e não à orientação dos dentes. A emenda não é mais fraca do que outros pontos mais fracos da barra que ocorrem por variação intrínseca da madeira ou por concentrações de tensões indesejáveis impostas pelas condições de ensaio.

A influência do esforço cortante na flecha e conseqüentemente no módulo de elasticidade pode ser considerada, do ponto de vista teórico, desprezível para relação vão-altura maior do que 12. Na prática isso ocorre com mais razão ainda por que esse efeito é sensivelmente menor do que a variabilidade natural da madeira e de erros decorrentes de causas não controladas no próprio ensaio de flexão.

Há grande variação no módulo de elasticidade e no módulo de ruptura à flexão de lâminas emendadas ou de vigas laminadas coladas que têm uma lâmina com emenda no meio do vão de ensaio. A lâmina emendada na viga trabalha melhor ou pior do que quando ela é a viga, dependendo das condições de colagem dos dentes nas bordas tracionadas e da propriedade mecânica considerada.

A redução na capacidade de carga de uma viga laminada colada com uma emenda no meio do vão da lâmina mais tracionada é devida a uma redução de momento de inércia.

Há um aumento significativo da capacidade de carga de uma viga laminada com lâminas não solidarizadas em relação à viga maciça porque há um aumento de momento de inércia devido ao atrito entre elas. O atrito introduz um transporte de área que não é considerado na soma simples dos momentos de inércia individuais.

A emenda apresenta pouca influência no módulo de elasticidade à flexão porque a elástica depende de uma integral de esforços em todo o comprimento do dente e a redução de momento de inércia no comprimento da emenda pode ser considerada desprezível. A emenda é crítica na resistência à flexão de lâminas emendadas ou vigas laminadas coladas com emendas na lâmina.

A resistência ao cisalhamento de juntas coladas deve ser refletida na resistência à tração da emenda dentada colada, que por sua vez deve ser refletida na resistência de viga laminada colada à flexão.

REFERÊNCIAS

ALBA QUIMICA. **Boletim Técnico Cascorez**, Boituva, p 1-5, mar. 2007a.

_____. **Cascophen**. Disponível em: <<http://www.albaadesivos.com.br>>. Acesso em: 14 mar.2007b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D4688-99 standard test method for evaluating structural adhesives for finger jointing lumber**. West Conshohocken, 2005. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR7190**: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES E EXPORTADORES DE MADEIRA. Exportações de produtos de madeiras em alta. **SBS dia a dia Sociedade Brasileira de silvicultura**. Disponível em: <<http://www.sbs.org.br/>>. Acesso em: 05 set. 2007.

AYARKWA, J.; HIRASHIMA, Y.; SASAKI, Y. Effect of glue type on flexural and tensile properties of finger-jointed tropical African hardwoods. **Forest Products Journal**, Madison, v. 50 n. 10, p. 59-65, Oct. 2000.

AYARKWA, J.; HIRASHIMA, Y.; SASAKI, Y.; ANDO, K. Effect of finger geometry and end pressure on the flexural properties of finger-jointed tropical African hardwoods. **Forest Products Journal**, Madison, v. 50 n. 11, p. 53-63, Nov. 2000.

AZAMBUJA, M.A. **Estudo experimental de adesivos para fabricação de madeira laminada colada: avaliação da resistência de emendas dentadas, da durabilidade e de vigas**. 2006. 124 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.

BOHN, A.R.; SCÜCS, C.A. Influência da espessura dos anéis de crescimento no comportamento mecânico dos elementos de madeira laminada colada. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 5., 1995, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: EBRAMEM, 1995. 1 CD-ROM.

BUSTOS, A.C. **Optimisation du procédé d'aboutage par entures multiples du bois d'épinette noire**, 2003. Tese (Doctorat en Sciences du Bois)-Université Laval, 2003 Disponível em: <<http://archimede.bibl.ulaval.ca/archimede/files/08ebf5a7-aa7a-4228-b2e4-233246ec8267/21006.html>>. Acesso em: 10 mar. 2007.

CARMONA, R.J; ESPINOSA, F.; BULL, G. Influencia de la densidad de la madera en la encolabilidad de *Pinus radiata* D.Don. **Revista Ciencias Forestales**. Disponível em: <http://revistacienciasforestales.uchile.cl/1997-1998_vol12-13/n1-2a6.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2007.

CARRASCO, E.V.M. **Resistência, elasticidade e distribuição de tensões nas vigas retas de madeira laminada colada**. 1989. 126 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1989.

DEMCOFF, M.L. Vigas laminadas estructurales de madera, su fabricación y empleo In: JORNADAS FORESTALES DE ENTRE RÍOS, 18., 2003, Concordia. **Anais...** Concordia: RITIM, 2006. Disponível em: <www.ritim.org.ar>. Acesso em: 05 mar. 2007.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 68 140 Wood Finger-Jointing**. Berlin, 1971. 3 p.

FIORELLI, J.; DIAS, A.A.; AZAMBUJA, M.A. Proposta de normalização para madeira laminada colada (MLC). **Revista Madeira Arquitetura e Engenharia**, São Carlos, v. 13, p. 1-10, 2004.

FISSETTE, P.R.; RICE, W.W. An analysis of structural finger-joints made from two northeastern species. **Forest Products Journal**, Madison, v. 38 n. 9, p. 40-44, Sept. 1988.

HENRIQUES, J.J.de; CALIL Jr., C.; CHIERICE, G.O. Resistência à tração de emendas dentadas coladas com adesivo poliuretano à base de mamona: Parâmetros de colagem In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 7., 2002, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: EBRAMEM, 2002. 1 CD-ROM.

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, 1998. v. 1, p. 145-152.

HEXION QUIMICA, **Boletim Técnico Wonderbond EPI EL-70**, Curitiba, p.1-4, ago.2006.

INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA. **Variación tecnológica y aptitud de la madera de distintos Orígenes y procedencias de *Eucalyptus grandis*, utilizado comercialmente en Argentina**. Concórdia, 2003. Disponível em: <http://www.inta.gov.ar/concordia/info/documentos/Forestacion/R-caracteristicas_madera.htm>. Acesso em: 10 ago. 2007.

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

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

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

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

MACÊDO, A.N. **Estudo de emendas dentadas em madeira laminada colada (MLC): Avaliação de método de ensaio.** 1996. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

_____. **Fadiga em emendas dentadas em madeira laminada colada.** 2000. 168 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

MARIN, P.C. **Avaliação da resistência de emendas dentadas para madeira laminada colada.** 2006. 92 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

MELOTTO, M.A. **Estudo do tempo de adesão, da temperatura e da pressão de colagem na tensão limite de cisalhamento de uniões de madeira de *Eucalyptus grandis* coladas com adesivos sem solventes.** 2007. 123p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

NASCIMENTO, A.M. **Avaliação experimental de vigas retas de madeira laminada colada, e seus componentes, feitas com madeira de *Pinus spp.* somente e também reforçadas com madeira de *Corybia citridora*.** 2000. 173 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000.

OLIVEIRA, J.T.S.; HELLMEISTER, J.C.; SIMÕES, J.W.; TOMAZELLO FILHO M. Caracterização da madeira de sete espécies de eucaliptos para a construção civil: avaliações dendrométricas das árvores. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 56, p. 113-124, dez. 1999.

OLIVEIRA JUNIOR, S.F.; AZAMBUJA, M.A.; DIAS, A.A. Análise da viabilidade de aplicação de adesivos alternativos em emenda dentada estrutural para espécie *Eucalyptus grandis*. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 10., 2006, São Pedro. **Anais...** São Pedro: EBRAMEM, 2006. 1 CD-ROM.

PETRAUSKI, A.; LUCIA, R.M.D.; TINOCO, H.F.F. Validade do modelo de Hankinson na predição da resistência de juntas coladas, usando *Eucalyptus grandis* como substrato. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 7., 2000, São Carlos. **Anais...** São Carlos: EBRAMEM, 2000. 1 CD-ROM.

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, C.B.; GILLESPIE, R.H. **Wood as an adherend**, New York: Marcel Dekker, Inc. 1991. 238 p.

SERPA, P.N.; VITAL, B.R. Propriedades da madeira de *Pinus elliottii*. **Revista da Madeira**, Curitiba, v. 15 n. 89, abr. 2005. Disponível em: <http://www.remade.com.br/pt/revista_materia.php?edicao=89&id=735>. Acesso em: 15 set. 2007.

SHIMIZU, J.Y. Pinus na silvicultura Brasileira. **Revista da Madeira**, Curitiba, v. 16 n. 99, set. 2006. Disponível em: <http://www.remade.com.br/pt/revista_materia.php?edicao=99&id=952>. Acesso em: 15 set. 2007.

SILVA, J.C. Cresce presença do eucalipto no Brasil. **Revista da Madeira**, Curitiba, v. 15 n. 92, out. 2005. Disponível em: <http://www.remade.com.br/pt/revista_materia.php?edicao=92&id=803>. Acesso em: 15 set. 2007.

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