

MOISÉS SILVEIRA LOBÃO

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE VIGAS COM EMENDAS DE
TOPO COLADAS COM COBREJUNTAS DE MADEIRA DE
EUCALIPTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de "*Magister Scientiae*".

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2002

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

L796a
2002

Lobão, Moisés Silveira, 1975-

Avaliação experimental de vigas com emendas de topo colocadas com cobrejuntas de madeira de eucalipto / Moisés Silveira Lobão. – Viçosa : UFV, 2002
51p. : il.

Orientador: Ricardo Marius Della Lucia
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Viçosa

1. Madeira laminada - Resistência ao cisalhamento. 2. Vigas - Deformações e tensões. 3. Flexão (Engenharia civil). 4. Madeira - Estruturas. 5. Madeira - Juntas. 6. Vigas - Testes. 7. Eucalipto. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDO adapt. CDD 634.9832286

MOISÉS SILVEIRA LOBÃO

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE VIGAS COM EMENDAS DE
TOPO COLADAS COM COBREJUNTAS DE MADEIRA DE
EUCALIPTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *“Magister Scientiae”*.

APROVADA: 18 de Dezembro de 2002

Prof. Benedito da Rocha Vital
(conselheiro)

Prof. Fernando da Costa Baeta
(conselheiro)

Prof. Alexandre M. do Nascimento

Prof^a. Rita de Cássia S. S. Alvarenga

Prof. Ricardo Marius Della Lucia
(Orientador)

Ao Criador.

Aos meus pais, João e Raimunda.

A minha namorada, Jannet.

A todos os camaradas do PC do B.

A todos os meus irmãos, parentes e amigos.

A todos que estiveram colaborando com este trabalho.

AGRADECIMENTO

A Todos que através de suas obras mantêm viva a esperança da construção de uma sociedade livre, fraterna e igualitária.

À sociedade brasileira, representada pela Universidade Federal de Viçosa e pela Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), que através dos seus recursos financiou, e portanto, possibilitou a realização desse trabalho.

Ao Professor Ricardo Marius Della Lucia, por sua orientação com zelo e paciência, e por todo aprendizado repassado durante todo este período.

Aos conselheiros, Professor Benedito Rocha Vital e Fernando da Costa Baeta, pelas suas disposições e pelos seus questionamentos, que muito me ajudaram no aperfeiçoamento da tese.

Aos professores Alexandre M. do Nascimento e Rita de Cássia S. S. Alvarenga, membros da banca examinadora, que muito me auxiliaram na construção da tese.

Ao professor Márcio Sampaio Sarmet Moreira, do Departamento de Engenharia Civil, pelas idéias, sugestões, críticas e pelo acompanhamento das etapas de execução deste trabalho.

A toda equipe do Laboratório de Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira, em especial aos funcionários Osvaldo Ladeira e José Magalhães (in memorian), pela disposição e camaradagem em me auxiliar neste trabalho.

Aos secretários de Pós-graduação em Ciência Florestal, pela orientação sempre prestada com dedicação e presteza.

A todos os camaradas do PC do B, que sempre me deram forças para que eu não desistisse de trilhar este caminho.

Às estagiárias, Helen e Adriana, que muito me auxiliaram neste trabalho e que estiveram ao meu lado durante todas as etapas deste.

À Jannet, minha namorada, que teve paciência nessa fase tão tensa de nossa vida.

A todos colegas de curso, pela camaradagem e amizade.

Ao Movimento Estudantil que me ajudou a tomar iniciativas e a controlar as tensões ao lidar com o público.

A todos aqueles que, de uma forma ou de outra, auxiliaram não só neste trabalho, mas na minha formação para a vida.

BIOGRAFIA

MOISÉS SILVEIRA LOBÃO, filho de João Silvério Lobão e Raimunda Inocência Silveira Lobão, nasceu em 24 de março de 1975, em João Monlevade-MG.

Em março de 1992, iniciou o curso Técnico em Agropecuária, na Central de Ensino e Desenvolvimento Agrário de Florestal, Florestal-MG, obtendo o título de Técnico em Agropecuária em Dezembro de 1994.

Em março de 1995, iniciou o curso de Engenharia Florestal na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, obtendo o título de Engenheiro Florestal em outubro de 2000.

Em outubro de 2000, iniciou o Programa de Mestrado em Ciência Florestal, na Universidade Federal de Viçosa.

CONTEÚDO

	Página
EXTRATO.....	viii
ABSTRACT.....	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. Adesão da Madeira.....	3
2.1.1. Uso da madeira colada.....	4
2.1.2. Ligações de peças estruturais	5
2.2. Adesivos.....	6
2.3. Aspectos Ambientais.....	8
2.4. O Uso do Eucalipto	9
2.5. Estudo de Vigas.....	10
2.6. Determinação de Valores de Tensões Admissíveis em Vigas	14
2.7. Determinação de Valores de Tensões Admissíveis em Vigas coladas.....	15
2.8. Utilização do Quadro de reação.....	18
3. MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1. Caracterização da madeira de Eucalipto	20
3.2. Adesão da madeira em diferentes planos.....	21
3.3. Confecção das vigas de Eucalipto.....	23
3.4. Solidarização das Vigas.....	25
3.5. Caracterização das Propriedades Mecânicas das Vigas	25
4. RESULTADO E DISCUSSÃO.....	27
4.1. Caracterização da madeira de Eucalipto.....	27
4.2. Ensaios de resistência ao cisalhamento da madeira colada.....	29

	Página
4.3. Caracterização das propriedades mecânicas das vigas.....	31
4.3.1. Resistência.....	31
4.3.1.1. Vigas com 1,60 metros de vão.....	31
4.3.1.2. Vigas com 4 metros de vão	33
4.3.2. Rigidez	35
4.3.2.1. Vigas com 1,60 metros de vão.....	35
4.3.2.2. Vigas com 4 metros de vão	35
5. RESUMO E CONCLUSÃO.....	39
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42
APÊNDICES.....	45
APÊNDICE A.....	46
APÊNDICE B.....	47
APÊNDICE C.....	49
APÊNDICE D.....	50
APÊNDICE E.....	51

RESUMO

LOBÃO, Moisés Silveira, M. S., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2002.

Avaliação experimental de vigas com emendas de topo coladas com cobrejuntas de madeira de eucalipto. Orientador: Ricardo Marius Della Lucia.
Conselheiros: Benedito Rocha Vital e Fernando da Costa Baeta.

O trabalho teve como objetivo construir, testar e avaliar o comportamento das vigas de madeira de eucalipto, com emendas de topo ligadas por cobrejuntas inteiramente coladas com adesivo resorcinólico e compará-las com o comportamento de vigas maciças feitas do mesmo material. Para isto, obteve-se um lote de madeira de eucalipto adquirida no mercado local, seca em estufa. Realizou-se primeiramente uma pré-seleção do lote, segregando-o em dois sub-lotes, um de maior densidade (madeira mais pesada) e outro de menor densidade (madeira mais leve), posteriormente, realizou-se a caracterização completa da madeira de acordo com a norma NBR7190/97. Os corpos de prova foram preparados a partir de tábuas retiradas ao acaso em cada um desses dois sub-lotes. Fez-se, portanto, a caracterização em dobro dessa madeira. Obteve-se um valor médio de 575kg/m^3 para a densidade do sub-lote de madeira mais leve, 880kg/m^3 para o de madeira mais pesada e a média dos lotes foi 721kg/m^3 . Quanto aos resultados das propriedades mecânicas da madeira, pôde-se verificar que a resistência da madeira de menor densidade atingiu valores inferiores, em todos os resultados. Outro experimento foi conduzido para testar a eficiência da adesão da madeira em dois diferentes planos (paralelo e perpendicular às fibras) e com madeiras de diferentes densidades (alta, baixa e alta colada à de baixa), utilizando-se o

adesivo resorcinol-formaldeído. Determinou-se a resistência ao cisalhamento longitudinal de corpos-de-prova ensaiados, bem como se avaliou a porcentagem de falha na madeira dessas amostras. Quanto aos resultados, verificou-se que os valores de resistência média ao cisalhamento nos corpos-de-prova de junta, colada com fibras paralelas e com madeira leve, não diferiram significativamente dos valores obtidos nos corpos de prova sólidos de madeira leve. Protótipos menores das vigas foram construídos com tábuas de 10 cm de largura, 3 cm de espessura e 170 cm de comprimento nas testemunhas e 85 cm nas duas partes da alma das vigas a serem coladas com cobrejuntas. Na confecção dos cobrejuntas utilizaram-se pequenas tábuas de 35 e/ou de 43 cm de comprimento e 1,5 cm de espessura. Essas vigas com 1,60 m de vão foram ensaiadas até a ruptura e concluiu-se que a melhor configuração era aquela em que o cobrejunta ocupasse 25% da superfície lateral das tábuas. As vigas de tamanho real foram construídas com as seguintes dimensões: tábuas com 20 cm de largura, 6 cm de espessura e 420 cm de comprimento nas testemunhas e duas tábuas com 210 cm de comprimento e mesma espessura e largura nas vigas com emendas. Estas apresentaram excelente desempenho em termos de resistência, em alguns casos, superando as resistências da viga testemunha. Quanto à rigidez, o desempenho foi considerado adequado, já que os deslocamentos das vigas com cobrejuntas foram bastante inferiores aos da viga testemunha, submetida a uma mesma magnitude de carga, o que proporciona grande vantagem estrutural.

ABSTRACT

LOBÃO, Moisés Silveira, M.S., Federal University of Viçosa, December of 2002.

Experimental evaluation of beams with end-grain joints and side members made of eucalyptus wood. Advisor: Ricardo Marius Della Lucia. Counselors: Benedito Rocha Vital and Fernando da Costa Baeta

The objective of the present work was the construction, testing and evaluation of the behavior of wooden beams made of eucalyptus boards with mid-span end-grain joints. The adhesive utilized was a resorcinol-formaldehyde glue and the joints were covered by side members of the same species of wood. Strength and stiffness of these beams were compared with the results solid beams. Eucalyptus lumber was purchased in the local market for the purpose. It was found, when the shipment arrived, that the whole lot could be segregated into two sub-lots, one of higher specific gravity timber, another of less dense wood. Wood properties were determined for these two sub-samples, according to the recommendations of the Brazilian Association of Testing Standards, NBR 7190/97. It was found that the specific gravity (weight and volume at 12% moisture content) of the less dense lumber was 575 kg/m³ while the denser timber reached 880 kg/m³. The average value of the whole lot was 721 kg/m³. It was concluded that the shipment included at least two species; testing for mechanical properties also yielded quite different results. Glue-bond quality was also determined according to NBR 7190/97 in samples made to represent the two different densities; the shear planes, however, included two possibilities: the two pieces that formed the block had their fibers both parallel or one of the parts had their fibers perpendicular to those of

the other part. Shear strength was determined by compression using these blocks; the percentage of wood failure was also measured. It was found that the low density wood glued well, because the average shear strength of the blocks with fibers of the parts parallel to the direction of the force did not differ from the shear strength of solid wood. High density wood did not glue so well, as well as the samples made with fibers of the parts parallel/perpendicular to the shearing force. Prototype beams were then built to find the best size of the side members that symmetrically covered the joints. These beams had a length of 170 cm, were 3 cm wide and 10 cm deep and were tested to failure using a center load on a 160-cm span. It was found that the 1.5 cm thick side members should cover at least 25% of the two sides of the beam to give the same results of strength and stiffness of solid 170 cm long beams. Larger beams were then built and tested. They had a length of 420 cm and were 20 cm deep and 6 cm wide. Some, the controls, were built of a single piece of lumber; other were made of 210 cm long boards, joined at mid-section by 100 cm long, 3 cm thick side members. These glued beams proved, after tested, to be of similar strength as the solid ones and were, in fact, stiffer than the controls, due to the larger moment of inertia at their central portion.

1. INTRODUÇÃO

A madeira acompanha a humanidade desde os seus primórdios. De início, foi utilizada como fonte de energia e para fabricação de armas. Posteriormente, tornou-se imprescindível na construção de moradias e meios de transporte. Desta forma, ela foi e é elemento decisivo em muitos momentos do desenvolvimento da humanidade.

Com o grande aumento populacional, o consumo de madeira aumentou de forma vertiginosa, causando um forte impacto nos estoques de madeiras nativas, principalmente das florestas tropicais. Hoje, tais recursos vêm se tornando escassos e indisponíveis para o suprimento da demanda. Dentre as utilizações da madeira, o seu uso na forma de serrados requer um grande volume com determinadas características próprias para tal fim. Estas características são encontradas numa grande variedade de essências florestais.

A madeira apresenta excelentes características para emprego em estruturas da construção civil, inclusive naquelas de grandes vãos, principalmente devido a sua elevada resistência específica. Uma das dificuldades práticas destas aplicações consiste na execução de ligações eficientes das peças componentes.

As ligações coladas em áreas limitadas, dependendo da aplicação específica (geometria e ações aplicadas), podem ser solicitadas por diferentes esforços (normal, flexão e cisalhamento) e as superfícies coladas correspondentes, podem ser submetidas a complexos estados de tensões, podendo definir planos preferenciais de ruptura.

Quando se pensa em espécies de rápido crescimento como alternativa na produção de madeira, o gênero *Eucalyptus* se apresenta como uma opção potencial das mais importantes, não somente por sua capacidade produtiva e adaptabilidade a diversos ambientes, mas sobretudo pela grande diversidade de espécies, tornando possível atender aos requisitos tecnológicos dos mais diversos segmentos da produção industrial madeireira .

Poucas décadas de pesquisa começam a mudar a história do eucalipto no Brasil. De madeira de péssima qualidade e de vilão da natureza, acusado de extenuar os solos, consumir água em demasia, afugentar a fauna e impedir o consorciamento com outras culturas, o eucalipto vem se transformando em alternativa de madeira de qualidade para aplicação na indústria de móveis, na marcenaria em geral e na construção civil, pois hoje cresce a preocupação ecológica a fim de se reduzir as pressões sobre as florestas nativas, principalmente da Amazônia.

Apesar das incessantes pesquisas realizadas para melhorar a qualidade da madeira de eucalipto, ainda se está longe de atingir níveis adequados para obtenção de peças de grandes dimensões livres de defeitos. Sendo assim, se faz necessário um estudo de alternativas que viabilizem o uso da madeira do eucalipto para a confecção de peças estruturais para a construção civil.

Segundo PANSKIN & DE ZEEUW (1980), a resistência da madeira expressa sua capacidade de suportar cargas e forças e esta propriedade está intimamente relacionada com a sua densidade.

Nesse contexto, o principal objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento das vigas de madeira de eucalipto ligadas por cobrejuntas coladas à alma da mesma com adesivo resorcinol e compará-las com o comportamento de vigas maciças do mesmo material. Experimentos auxiliares foram feitos com objetivos específicos para consecução do trabalho, que compreenderam a caracterização do lote da madeira, a adesão desta em diferentes planos, a confecção, solidarização e caracterização das propriedades dos protótipos e das vigas em tamanho real.

2- REVISÃO DE LITERATURA

2.1. ADESÃO DA MADEIRA

A função de um adesivo, além de aderir dois substratos, é fluir e preencher espaços vazios entre as juntas a serem coladas, diminuindo a distância entre as elas, gerando interações entre o próprio adesivo e o substrato (PIZZI, 1994). De acordo com esse autor, no processo de adesão de uma junta de madeira interagem vários tipos de adesão, nos quais as principais são a química, a mecânica e a específica. Ainda relatou que uma superfície rugosa pode aumentar a adesão entre as juntas colada. TSOUMIS (1991), relata também que pode haver a penetração do adesivo nas paredes celulares (entre as microfibrilas), permitindo, assim o engajamento mecânico em várias posições.

Segundo MARRA 1992, o adesivo, antes de se tornar resistente numa junta colada, quando espalhado sobre a superfície da madeira em sua forma líquida, passa por cinco estágios:

1. Movimento lateral para formar um fluxo contínuo.
2. Transferência de uma superfície na qual o adesivo foi espalhado para a parte onde não havia.
3. Penetração para dentro da madeira.
4. Molhabilidade da superfície da madeira.
5. Solidificação do adesivo dentro da madeira

Os três primeiros estágios de movimentação dependem dos fatores que envolvem a molhabilidade do adesivo.

O quarto estágio depende da mobilidade da reação química entre o adesivo e a madeira e da condição da superfície desta. A capacidade de um líquido molhar uma superfície depende da atração elétrica e química entre as moléculas da superfície da madeira e do adesivo, e das condições do adesivo (PANSWIN et.al, 1952). O mesmo autor comenta, ainda, que o processo de cura da cola na madeira ocorre da passagem do seu estado líquido à formação de um complexo sólido e estável sob a influência de uma determinada pressão. Muitos adesivos necessitam, para o seu endurecimento, de uma certa quantidade de catalisador que ajuda na cura do processo.

A madeira no meio técnico é considerada um material de fácil colagem, pois permite o desenvolvimento de linha de cola eficaz, conforme visto acima. A razão de considerar madeira de alta densidade de difícil colagem pode ser explicada num desses aspectos, pois uma madeira mais dura apresenta uma impenetrabilidade maior da cola, bem como uma perda maior da cola pelas bordas da peça a ser colada, ocasionando uma linha de cola menos eficaz (BRADY e KAMKE, 1988). TSOUJIS (1991) e MARRA (1992) afirmaram que as madeiras de alta densidade são de difícil colagem pela pouca penetração do adesivo, diminuindo, assim, um bom desenvolvimento de uma linha de cola, ocasionando, portanto, uma junta de má qualidade.

2.1.1 . Uso da madeira colada

A madeira colada, por ser estruturalmente versátil e passível de assumir qualquer seção e de se adaptar às mais variadas situações, presta-se a todo tipo de construção; por isso ela é extensamente empregada nos países escandinavos, no Chile e Japão. Esse material usado para fins estruturais pode ser utilizado, economicamente ,tanto em situações onde é necessário vencer grandes vãos, quanto em casos onde a dimensão da estrutura seja um determinante menos relevante (FREAS & SELBO, 1954).

Segundo MOODY (1997), citado por ABRAHÃO (1999), as características que podem ser tomadas como positivas no uso da madeira colada, comparada à madeira sólida, bem como a outros materiais estruturais, são:

- Possibilidade de confecção de elementos estruturais, de grandes dimensões, a partir de madeira serrada de dimensões comerciais com bitolas menores;

- possibilidade de utilização de madeiras de reflorestamento, serradas precocemente, para construção de peças estruturais;
- possibilidade de se minimizar o aparecimento de rachaduras e outros defeitos de secagem, quase sempre associados ao emprego de peças maciças de madeira serrada de grandes dimensões;
- possibilidade de projetar estruturas com base em valores de resistência e rigidez para a madeira seca, com racionalização das propriedades do material, o que garante a sua economia; e
- possibilidade de se impor variações às seções transversais dos elementos ao longo de seu comprimento, tornando-se um fator de economia de material e de redução de peso próprio das estruturas.

2.1.2. Ligações de peças estruturais

As peças de madeira bruta têm o comprimento limitado pelo tamanho das árvores, meios de transporte, etc. As peças de madeira serrada são fabricadas em comprimentos ainda mais limitados, geralmente de 4 a 5 metros(PFEIL, 1989).

A colagem é utilizada em larga escala, nas fábricas de peças de madeira laminada e madeira compensada. Nas peças laminadas de grande comprimento, as lâminas individuais são emendadas com cola, empregando-se uma seção denteada ou plana enviesada.(PFEIL, 1989).

Quanto aos critérios de dimensionamento, por serem as emendas coladas bastante rígidas, seu dimensionamento se faz por um critério de resistência: tensão admissível igual à tensão experimental de ruptura dividida pelo coeficiente de segurança (PFEIL, 1989).

De acordo com a NBR 7190 (1997), para peça composta por elementos justapostos solidarizados continuamente, pode ser verificada a sua estabilidade como se ela fosse uma peça maciça com as restrições que serão detalhadas no item 2.5.

Segundo WANGAARD (1978), citado por PETRAUSKY (2000), ligações ao longo do comprimento das peças (ligações de extremidade) têm sido feita por meio de ligações em bisel ou “finger joints”. Entretanto, a colagem de juntas, segundo planos perpendiculares ao eixo longitudinal, chamadas colagens de topo, geram, via de regra, juntas de baixo desempenho. Segundo PFEIL (1989), a colagem não é comumente empregada como meio de união das peças maciças, espessas pela dificuldade no

controle da umidade; conseguem-se vigas coladas de melhor qualidade, colando-se lâminas finas (em geral, inferiores a uma polegada de espessura, podendo eventualmente ir até duas polegadas).

De acordo com a NBR 7190/97, em peças laminadas coladas com lâminas adjacentes de espessura t , as emendas devem estar afastadas entre si de uma distância pelo menos igual a $25 t$ (espessura) ou à altura h da viga. Todas as emendas contidas em um comprimento igual à altura da viga são consideradas como pertencentes à mesma seção resistente reduzida, calculada por

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

Os termos A_{red} e A_{ef} significam respectivamente, área reduzida e efetiva e o coeficiente α_r pode assumir os seguintes valores:

- Emendas dentadas (finger joints) $\alpha_r = 0,9$;
- emendas em cunha com inclinação de 1:10 $\alpha_r = 0,85$; e
- emendas de topo $\alpha_r = 0$.

A madeira tem boa resistência à tração na direção das fibras, podendo ser utilizada como peça sujeita à tração axial. O ponto crítico para o dimensionamento fica nas emendas de ligações de extremidade das peças. O esforço admissível de tração é igual à área líquida multiplicada por uma tensão admissível (PFEIL, 1989).

O emprego de cola nas ligações deve obedecer a prescrições técnicas, provavelmente satisfatórias. Somente podem ser coladas madeiras secas ao ar livre ou em estufa. A resistência da junta colada deve ser no mínimo igual à resistência ao cisalhamento longitudinal da madeira(NBR 7190/97).

O dimensionamento dos elementos de ligação, no estado limite último, deve obedecer a condições de segurança do tipo:

$$S_d \leq R_d,$$

em que R_d é o valor de cálculo da resistência dos elementos da ligação e S_d o valor de cálculo das solicitações atuantes. Em princípio, o estado limite último da ligação pode ser atingido por deficiência de resistência da madeira estrutural ou do elemento de ligação(NBR 7190/97).

2.2. ADESIVOS

A utilização de adesivos para madeira foi essencial no desenvolvimento e crescimento da indústria de produtos florestais e é um componente relevante na

utilização eficiente dos recursos madeireiros, principalmente na construção de estruturas para construções (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999).

A AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM 1994) define um 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 líquido tem que umedecer e se espalhar livremente nas superfícies para que se estabeleça um contato íntimo entre elas.

Para se testar o desempenho de um adesivo, deve-se submetê-lo a testes de carregamento específico, como de cisalhamento na linha de cola, para prever a eficiência do adesivo na união das lâminas sob uma determinada temperatura e condições de umidade durante um tempo específico (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999).

Os adesivos à base de resorcinol-formaldeído são desejados quando se necessita ter resistência à água ou quando se atendem a condições especiais de uso, como, por exemplo, exposição prolongada às intempéries (CECAE, 2001).

Produtos colados com adesivos de fenol-resorcinol-formaldeído, testados durante um longo período, mostraram ser bastantes resistentes em ambientes expostos ao tempo sendo, por isso, indicados para este tipo de uso; já adesivos à base de polivinil acetato e proteínas mostraram não resistir à exposição prolongada ao tempo ou a ciclos de alta e baixa umidade sendo, portanto, indicadas para o uso em estruturas utilizadas em interiores (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999).

Os adesivos de resina fenólica são baseados no fenol e seus derivados, como o resorcinol, e são aldeídos ou cetonas condensadas. São termoestáveis e exigem um tempo de cura para polimerização completa, o seu principal emprego está na colagem de madeira (CECAE, 2001).

A resina de resorcinol tem sido usada desde aproximadamente 1943. Apesar dela possuir algumas desvantagens em relação a outras resinas, por ter cor escura, ser bastante abrasiva e de ser mais cara, ela possui vantagens em suas propriedades que são insubstituíveis, como a facilidade de fixar bem até sob baixas temperaturas, ter uma reatividade mais alta que a da resina fenólica, “pois o resorcinol, apesar de ser uma substância fenólica, possui dois grupos hidroxílicos na posição meta, que são mais ativos que os grupos CH₃ encontrados no m-cresol” (KOLLMANN et. al, 1975) e, finalmente, por resistir a grandes diferenças de umidade e temperatura.

Vários métodos têm sido testados com o objetivo de redução do custo na utilização de colas à base de resorcinol. Um método efetivo é a mistura de certa quantidade de fenóis que possibilitam uma redução significativa na quantidade de resina à base de resorcinol, ao mesmo tempo em que garantem a permanência das propriedades positivas da resina.

A cola à base de resorcinol é bastante influenciada pelo valor de pH. O valor de pH da cola líquida mostra ser quase neutra, variando de 7 e 8. Assim, podem ser obtidas colas com vida de armazenamento bastante longa (aproximadamente 1 ano).

2.3. ASPECTOS AMBIENTAIS

Têm sido travadas, em todo o mundo muitas discussões, nas quais são comparados os impactos ambientais do uso da madeira, do aço, do alumínio, do concreto e de outros materiais estruturais. Os resultados dessas discussões parecem indicar que a madeira laminada colada é um material ambientalmente mais vantajoso que os demais materiais utilizados para fins estruturais (ABRAHÃO, 1999).

Vários pesquisadores já defendem o caráter renovável e reciclável da madeira. O baixo consumo de energia para a sua produção, o seu beneficiamento e a sua inerente capacidade de armazenamento de carbono são argumentos que a colocam em uma posição privilegiada frente a qualquer outro material de construção.

Apesar de serem os fatores estéticos e econômicos os maiores determinantes da escolha do uso de cobrejuntas como material de construção, as vantagens ambientais têm assumido uma influência crescente em tal escolha. O uso de emendas com cobrejuntas possibilita o uso de peças serradas de pequenas bitolas que, normalmente, no uso da madeira maciça, seriam descartadas em forma de resíduo, provocando graves problemas ambientais

Segundo cálculos do Laboratório de Produtos Florestais do IBAMA, estima-se que, no Brasil, até o produto final, são desperdiçados cerca de 80% da madeira, transformada em resíduos durante os processamentos primários nas serrarias, e secundário, nas fábricas. Destes, cerca de 20% perdem-se no processamento secundário durante a fabricação dos produtos finais, sendo que estes teriam grande potencial para serem transformados em pedaços de lâminas que podem ser coladas como cobrejuntas para reforçar as emendas em peças estruturais e o restante, em

energia elétrica alternativa. (Revista da Madeira, 1995; citada por MENDES et al., 1997).

Shield (1995), citado por Carvalho (2000), mostrou que têm sido feitos vários estudos para a busca de mercados diferenciados para a madeira produzida pela floresta. O mesmo autor comenta que na conversão da floresta algumas tecnologias são aplicáveis para a utilização de madeiras de pequenas dimensões, oriundas de toras finas, para a manufatura de uma ampla gama de produtos, tais como: molduras, tábuas para assoalhos, tacos e mosaicos, painéis e componentes para móveis, lambris, painéis para paredes e peças laminadas coladas.

2.4. O USO DO EUCALIPTO

A crescente demanda de madeira de folhosas, no Brasil, principalmente na região Centro-Sul do País, evidencia o uso de eucalipto como principal fonte de abastecimento para este setor. Entretanto, como o eucalipto no Brasil vem sendo pesquisado e plantado, principalmente para atender as demandas dos setores de polpa de papel e celulose e carvão vegetal, informações consistentes ainda não são disponíveis sobre produtos sólidos desse material.

Vários pesquisadores dizem que as espécies do gênero *Eucalyptus* poderão substituir as espécies nativas, tradicionais na construção civil, porém a sua utilização racional depende do conhecimento mais detalhado de sua constituição química e anatômica, que influenciam nas suas propriedades físicas e mecânicas, para a adequação nas mais variadas formas de utilização.

O laminado colado de eucalipto, por ser hoje essa madeira abundante no Brasil e ainda pouco explorada pela construção civil, poderá preencher o mercado consumidor de Paraju e outras madeiras que já estão escassas no mercado, tendo assim de ser substituídas por madeiras de reflorestamento (seja este na base da monocultura clonada ou não) (OLIVEIRA,1997).

Hoje, a consciência ecológica não pesa nas decisões do mercado, mas a opção pelo eucalipto será uma tendência inevitável, tanto em termos de disponibilidade de madeiras quanto de custo. Com a recente baixa dos preços do coque no mercado mundial, as grandes siderurgias - que são também as grandes reflorestadoras - estão, agora, importando esse mineral e procurando dar saída para um passivo que tem um mercado restrito à confecção de mourões e 'pallets' (OLIVEIRA,1997).

O laminado colado, feito a partir de lâminas de madeiras de reflorestamento, tem sido objeto de pesquisa de vários Instituições de Pesquisa. O uso de *E. grandis* e *E. saligna* para fabricação de estruturas laminadas tem sido mostrado promissor, tanto técnica quanto economicamente (ABRAHÃO,1999).

As evidências experimentais indicam que, havendo controle do processo, o *Eucalyptus grandis*, associado à resina resorcinol, pode produzir juntas colada com desempenho estrutural satisfatório (PETRAUSKY, 2000).

2.5. ESTUDO DE VIGAS

Para o entendimento do comportamento estrutural das vigas é necessário que se entenda o comportamento físico-mecânico de peças fletidas. De acordo com a NBR 7190/97, nas peças fletidas considera-se o vão teórico como o menor dos seguintes valores:

- A distância entre os eixos dos apoios;
- o vão livre, acrescido da altura da seção transversal da peça no meio deste, não se considerando o acréscimo maior que 10 cm.

Segundo essa mesma norma, nas barras submetidas a momento fletor cujo plano de ação contém um eixo central de inércia de seção transversal resistente, a segurança fica garantida pela observância simultânea das seguintes condições:

$$S_{c1,d} \cdot f_{cd}$$

$$S_{t2,d} \cdot f_{td},$$

em que f_{cd} e f_{td} são as resistências de cálculo à compressão e à tração, respectivamente, e $\sigma_{c1,d}$ e $\sigma_{t2,d}$ são, respectivamente, as tensões atuantes de cálculo nas bordas mais comprimidas e mais tracionadas da seção transversal considerada, calculada pelas expressões

$$S_{c1,d} = M_d/W_c$$

$$S_{t2,d} = M_d/W_t,$$

em que M_d é o valor de cálculo do momento fletor atuante e W_c e W_t são a compressão e a tração, respectivamente dos módulos de resistência que podem ser calculados pelas expressões

$$W_c = I/g_{c1}$$

$$W_t = I/g_{t2},$$

sendo I o momento de inércia da seção transversal, resistente em relação ao eixo central de inércia perpendicular ao plano da ação do momento fletor atuante e γ_{c1} e γ_{t2} são as respectivas distâncias entre a linha neutra e a borda mais comprimida e a borda mais tracionada.

As vigas fletidas, de acordo com a NBR 7190/97, além de respeitarem as condições expostas acima, devem ter sua estabilidade lateral verificada por teoria, cuja validade tenha sido comprovada experimentalmente. Dispensa-se essa verificação quando forem satisfeitas as seguintes condições:

- Os apoios de extremidade da viga impedem a rotação de suas seções extremas em torno do eixo longitudinal da peça;
- existe um conjunto de elementos de travamento ao longo do comprimento L da viga, afastados entre si de uma distância não maior que L_1 , que também impede a rotação dessas seções transversais em torno do eixo longitudinal da peça; e
- nas vigas de seção transversal retangular, de largura b e altura h medida no plano de atuação do carregamento.

$$L_1/b \leq E_{c0,ef}/(\beta_M f_{c0,d}),$$

em que L_1 é o vão teórico, $E_{c0,ef}$ é o módulo de elasticidade efetivo à compressão paralela às fibras, $f_{c0,d}$ é o valor de cálculo da resistência à compressão paralela às fibras e o coeficiente β_M é dado no Quadro abaixo: para $\gamma_f = 1,4$ (coeficiente de ponderação das ações) e para o coeficiente de correção $\beta_E = 4$.

Quadro 1 - Coeficiente de correção β_M

h/b	b_M	h/b	b_M	h/b	b_M
1	6	8	30,3	15	55,8
2	8,8	9	34	16	59,4
3	12,3	10	37,6	17	63
4	15,9	11	41,2	18	66,7
5	19,5	12	44,8	19	70,3
6	23,1	13	48,5	20	74
7	26,7	14	52,1		

FONTE (NBR 7190, 1997)

Em relação à estimativa da rigidez, segundo a norma NBR 7190/97, nas verificações de segurança que dependem dessa propriedade da madeira, o módulo de elasticidade, paralelamente às fibras, deve ser tomado com o valor efetivo

$$E_{c0,ef} = k_{mod1} \times k_{mod2} \times k_{mod3} \times E_{c0,m},$$

em que os k_{mod} são os coeficientes de modificação que vêm especificados no item 2.6. e $E_{c0,m}$ é o módulo de elasticidade médio à compressão paralela às fibras.

Nas peças em que $L_1/b > E_{c0,ef}/\beta_M f_{c0,d}$, também se dispensa a verificação da segurança em relação ao estado limite último de instabilidade lateral, desde que sejam satisfeitas as exigências descritas acima com

$$S_{ctd} = E_{c0,ef} / (L_1/b)b_M,$$

em que σ_{ctd} é a tensão atuante na borda mais tracionada da peça.

As vigas compostas por elementos justapostos, solidarizados continuamente, podem ser consideradas como se fossem maciças. A NBR 7190/97 recomenda, na falta de verificação específica da segurança em relação à estabilidade da alma, o emprego de enrijecedores perpendiculares ao eixo da viga, com espaçamento máximo de duas vezes a altura total da viga. Além disso, nas peças de madeira laminada colada, a mesma norma recomenda que elas devem ser formadas por lâminas com espessuras não superiores a 30 mm de madeira de primeira categoria, coladas com adesivo à prova d'água, à base de fenol-formaldeído sob pressão, em processo industrial adequado que solidarize permanentemente o sistema. As lâminas podem ser dispostas com seus planos médios, paralelamente ou perpendicularmente, ao plano de atuação das cargas.

De acordo com a NBR 7190/97, no ensaio de estruturas submetidas à flexão, deve-se tomar precauções cuidadosas para se eliminar o atrito nos apoios, para que as forças aplicadas não provoquem esmagamento por compressão normal, com a possibilidade de no ensaio atuarem forças normais não previstas. Além disso, para que as deformações da viga não afetem os resultados, o comprimento da viga ensaiada, deve ser feita com pelo menos oito alturas da seção transversal da mesma.

No cisalhamento longitudinal em vigas submetidas à flexão com forças cortantes, segundo a NBR 7190/97, a condição de segurança em relação às tensões tangenciais é expressa por

$$t_d \leq f_{v0,d},$$

em que $f_{v0,d}$ é o valor de cálculo da resistência ao cisalhamento e τ_d é a máxima tensão de cisalhamento atuando no ponto mais solicitado da peça. Em vigas de seção transversal retangular, de largura b e altura h , tem-se

$$\tau_d = 3/2 (V_d / bh),$$

em que V_d é o valor de cálculo da resistência ao cisalhamento.

Na falta de determinação experimental específica, admite-se $f_{v0,d} = 0,12 f_{c0,d}$ para coníferas e $f_{v0,d} = 0,10 f_{c0,d}$ para dicotiledôneas.

Essa mesma norma determina que nas vigas de altura h que recebem cargas concentradas e que produzem tensões de compressão nos planos longitudinais a uma distância, que deve ser $.2h$ do eixo do apoio, o cálculo das tensões de cisalhamento pode ser feito com uma força cortante reduzida de valor

$$V_{red} = V(a/2h).$$

Outra exigência da norma se refere à estabilidade da estrutura, quando submetida ao trabalho de flexão. Para isto, impõe-se um dimensionamento que depende da esbeltez da peça, definida pelo seu índice de esbeltez

$$l \quad L_0 / I_{min} ,$$

em que L_0 é um comprimento teórico de referência e I_{min} é o raio de giração mínimo de sua seção transversal. No caso de peças de comprimento efetivo L em que ambas as extremidades sejam indeslocáveis por flexão, adota-se $L_0 = L$, não se considerando qualquer redução em virtude da eventual continuidade estrutural da peça.

Quanto à excentricidade acidental mínima, causada devido às imperfeições geométricas das peças, a norma 7190/97 exige que seja respeitado pelo menos o valor $e_a = L_0 / 300$.

Deve-se, também, verificar o estado limite de deformações excessivas que possam afetar a utilização normal da construção ou seu aspecto estético, considerando-se apenas as combinações de ações de longa duração, que vêm especificadas no item 2.6.

A flecha efetiva U_{ef} , determinada pela soma das parcelas atribuídas à carga permanente (U_g) e à carga acidental (U_Q), não pode superar $1/200$ dos vãos, nem $1/100$ do comprimento dos balanços correspondentes.

2.6. DETERMINAÇÃO DE VALORES DE TENSÕES ADMISSÍVEIS EM VIGAS

Segundo a norma brasileira 7190/97, os valores característicos G_k dos pesos próprios das estruturas são calculados com as dimensões nominais da estrutura e com o valor médio do peso específico do material considerado. A madeira é considerada com umidade $U= 12\%$. Para outras ações permanentes, que não o peso próprio da estrutura, podem ser definidos dois valores, o valor característico superior $G_{k,sup}$ maior que o valor médio G_m , e o valor característico inferior $G_{k,inf}$ menor que o valor médio G_m . Em geral, no projeto é considerado apenas o valor característico superior.

Nas construções correntes, as verificações da segurança em relação aos estados limites de utilização, são feitas admitindo-se apenas os carregamentos usuais correspondentes às combinações de longa duração, são expressos por

$$F_{d,útil} = \sum F_{gik} + \sum Y_{2j} F_{Qjk},$$

em que :

$F_{d,útil}$ é o valor de carregamento correspondente às combinações de longa duração

$\sum F_{gik}$ é o somatório dos valores característicos das ações permanentes.

$\sum Y_{2j} F_{Qjk}$ é o somatório dos valores das combinações de ações variáveis.

A estimativa da resistência característica, segundo esta norma, deve ser obtida através da investigação direta da resistência de lotes homogêneos, cada lote não deve ter volume superior a $12m^3$. Os valores específicos devem ser corrigidos para um teor de umidade de 12%. O valor característico da resistência deve ser estimado pela expressão

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

em que os resultados devem ser colocados em ordem crescente $f_1 f_2 \dots f_n$, desprezando-se o valor mais alto se o número de corpos de prova for ímpar, não se tomando para f_{wk} valor inferior a f_1 , nem a 0,70 do valor médio.

$$G_{ef} = E_{c0,ef}/20$$

Segundo a NBR 7190/97, o projeto das estruturas de madeira deve ser feito admitindo-se uma das classes de umidade especificadas na Quadro 2 que vem a seguir.

Quadro 2 - Classes de umidade da madeira

Classes de umidade	Umidade relativa do ambiente (U_{amb})	Umidade de equilíbrio da madeira (U_{eq})
1	.65%	12%
2	65% < U_{amb} 75%	15%
3	75% < U_{amb} 85%	18%
4	$U_{amb} > 85%$ durante longos períodos	25%

FONTE:(NBR 7190, 1997).

Para exemplificar, nas situações duradouras de projeto para carregamentos de longa duração ($K_{mod,1}=0,7$), usando-se madeira serrada de segunda categoria ($K_{mod,3}= 0,8$), nas classes de umidade (1) e (2), os valores de K_{mod} são $0,7 \times 1,0 \times 0,8 = 0,56$ e, nas classes de umidade (3) e (4), $K_{mod} = 0,7 \times 0,8 \times 0,8 = 0,45$.

2.7. DETERMINAÇÃO DE VALORES DE TENSÕES ADMISSÍVEIS EM VIGAS COLADAS

A aproximação básica para determinar a geometria de uma estrutura laminada colada é feita por intermédio da avaliação do índice de tensão e de fatores de modificação desta. Os valores de índice de tensão são os mesmos utilizados para as propriedades de madeiras sólidas livres de defeitos, exceto em algumas propriedades caracterizadas pela redução de resistência, onde se necessita utilizar fatores de modificação da tensão (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999).

Muitas das equações básicas de engenharia, usadas para madeira serrada, são aplicadas para vigas e colunas laminadas coladas, com alguns ajustes. Exemplos desses ajustes podem ser encontrados, nas normas da ANSI/AITC (AITC, 1992).

A norma AITC 117 é utilizada para espécies de madeira de coníferas e é composta de duas partes: produção, que prevê detalhes para as variadas configurações de madeiras coladas, classificadas tanto no visual quanto mecanicamente, e o projeto, que prevê tabelas com valores estruturais de tensão e rigidez dessas combinações de madeira colada. Já a norma AITC 119 faz o mesmo para espécies de madeira de folhosas. Esses padrões são baseados na aplicação direta de uma força aos membros, lateralmente, contendo estes um grau de umidade de 12%. Para membros fletidos, os valores estruturais são baseados assumindo-se uma referência de tamanho de 305mm

de profundidade, 130mm de largura e 6,4 metros de comprimento (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999).

os valores de projeto tabelados são os seguintes:

F_b tensão admissível de flexão

F_t tensão admissível de tração paralela à grã

F_v tensão admissível de cisalhamento paralelo à grã

F_{c-perp} tensão admissível de compressão perpendicular à grã

F_c tensão admissível de compressão paralela à grã

E módulo de elasticidade admissível

F_{rt} tensão admissível de tração radial perpendicular à grã

Os fatores de ajuste levam em consideração as condições de uso final da viga laminada colada. Descrever-se-ão abaixo os valores de projeto que requerem ajuste:

Volume – o fator C_v (volume) leva em consideração uma certa redução na resistência quando o comprimento, a largura e a profundidade da estrutura laminada colada aumentam.

Este fator de ajuste do volume é dado no National Design Specification for Wood Construction (AF&PA 1997), na forma

$$C_v = \frac{(305)^{0,10} (130)^{0,10} (6,4)^{0,10}}{(d)^{0,10} (w)^{0,10} (L)^{0,10}}$$

sendo d a espessura, w a largura e L o comprimento da viga.

Teor de umidade – o fator C_M (umidade) leva em consideração a redução da resistência quando o teor de umidade aumenta. Este fator de ajuste para a umidade é dado tanto na ASTM D3737 (ASTM 1997b) quanto na AITC 117- Design (AITC 1992).

$C_M = 1$ para teor de umidade menor ou igual a 16%.

Para teor de umidade maior que 16%, como quando a madeira está em contato com o chão e muitas outras condições externas, usa-se o valor de C_M mostrado abaixo:

Quadro 3- O fator C_M (umidade)

	F_b	F_t	F_v	F_{c-perp}	F_c	E
CM	0,8	0,8	0,875	0,53	0,73	0,833

FONTE:(ASTM 1997b)

Carregamento – um ajuste do tipo de carregamento do membro é necessário porque os fatores de volume são derivados, assumindo-se um carregamento uniforme. Esta modificação fator de carregamento C_L é recomendado no National Design Specification for Wood Construction (AF&PA 1997) na forma:

$C_L = 1,00$ para carregamento uniforme num vão único

$C_L = 1,08$ para carregamento no ponto central num vão único

$C_L = 0,92$ para tensão constante em todo o comprimento.

Para outras condições, valores de C_L podem ser estimados usando a proporção do comprimento da viga sujeitas a até 80% ou mais de tensão máxima L_0 na forma que é dada abaixo

$$C_L = \frac{(0,45)^{0,1}}{(L_0)^{0,1}}$$

Laminação tracionada - pesquisas passadas têm mostrado que requerimentos especiais são necessários para a laminação tracionada de uma viga colada para o projeto específico de resistência à flexão. Fatores de laminação tracionada C_T podem ser achados na ASTM D3737 e (ASTM 1997), tendo os valores abaixo :

$C_T = 1,00$ para laminação tracionada como classificada pela AITC 117

= 0,85 com laminação tracionada sem classificação e para profundidade menor ou igual a 380mm.

= 0,75 com laminação tracionada sem classificação e para profundidade maior que 380mm.

Uso plano - o fator de uso plano é aplicado para valores de projeto de flexão quando membros são carregados paralelamente à largura da face das laminações e são menores que 305mm na altura. Ele pode ser achado no National Design Specification for Wood Construction (AF&PA 1997), na forma do Quadro 4.

Quadro 4 - Dimensão do membro, paralela à largura da face da laminação

Dimensão do membro, paralela à largura da face da laminação	Cfu
273 ou 267 mm	1,01
222 ou 216 mm	1,04
171mm	1,07
130 ou 127 mm	1,10
79 ou 76 mm	1,16
64 mm	1,19

FONTE:(AF&PA 1997)

Estabilidade lateral - o fator de estabilidade lateral é aplicado para valores de projeto à flexão que levam em consideração a quantidade de apoio lateral aplicado aos membros fletidos. Membros profundos e fletidos que não são bem apoiados ao longo da superfície de topo são sujeitos à torção lateral, podendo haver diminuição no valor do projeto a flexão. Membros que são completamente apoiados têm um ajuste ($C_L = 1,0$).

2.8 – UTILIZAÇÃO DO QUADRO DE REAÇÃO

O Quadro de Reação existente nas dependências do Laboratório de Propriedades Físicas e Mecânicas da madeira, do Departamento de Engenharia Florestal da UFV, consiste em um quadro retangular de concreto armado, enrijecido por viga central. Nesse Quadro, as estruturas são ensaiadas deitadas, apoiadas sobre a laje de piso por meio de rolamentos. Esses rolamentos devem permitir a livre deformação da estrutura sob teste na direção do carregamento.

Segundo PETRAUSKY e DELLA LUCIA (1998), o Quadro de Reação objetiva viabilizar uma estrutura física apta ao teste de estruturas de madeira em escala real ou reduzida e que, embora exija uma área em planta da ordem de 80 m quadrados, tem custo de implantação significativamente menos oneroso do que a aquisição de uma máquina de ensaios de grande porte.

O quadro foi submetido a uma carga máxima da ordem de 116kN quando do teste de estruturas de 8 m de vão e uma carga máxima de 140 kN quando do teste de estruturas de sete metros de vão. Não apresentou fissuras visíveis quando a

deformação sob teste já era da ordem de 10 cm. Portanto, seu desempenho foi considerado plenamente satisfatório quando em uso (PETRAUSKY e DELLA LUCIA, 1998).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira, do Departamento de Engenharia Florestal da UFV, que dispunha do equipamento necessário para caracterização das propriedades físicas e mecânicas do lote da madeira, e da confecção e testes de flexão das vigas com emendas e cobrejuntas coladas.

3.1. CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA DE *Eucalyptus*

Utilizou-se, neste trabalho, a madeira de Eucaliptos, adquirida no mercado local seca em estufa e aclimatizada em Viçosa.

A densidade aparente foi determinada, segundo VITAL (1984), pelo método de imersão em água e determinação do volume ($U=12\%$) da amostra pelo empuxo do líquido, registrado em balança.

A caracterização completa das propriedades de resistência da madeira para projeto de estruturas foi feita de acordo com os métodos de ensaio especificados na NBR 7190(1997), que exige a determinação dos seguintes valores, a serem referidos à condição-padrão de umidade ($U=12\%$):

Resistência à compressão paralela às fibras, determinada por ensaios de compressão uniforme, com duração de 3 a 8 min, de corpos-de-prova com seção transversal quadrada de 5 cm de lado e com comprimento de 15 cm;

- resistência à compressão perpendicular às fibras, determinada em um ensaio de compressão uniforme, com mesma duração do teste anterior, de corpos-de-prova com seção transversal quadrada de 5 cm de lado e com comprimento de 10 cm;
- resistência à tração paralela às fibras, determinada em ensaios de tração uniforme, com mesma duração dos testes anteriores, de corpos-de-prova alongados, com trecho central de seção transversal uniforme de área 1 cm^2 e comprimento de 50 cm, a fim de garantir a ruptura no trecho principal do corpo;
- resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, ou seja, a tensão máxima de cisalhamento que pode atuar na seção crítica de um corpo de prova prismático; e
- resistência à flexão, determinada pelo ensaio de flexão simples, como especificados no anexo B da NBR 7190 (1997).

A caracterização e rigidez da madeira foi medida pelo valor médio do módulo de elasticidade determinado na fase de comportamento elástico-linear. Para isto, respeitaram-se os métodos de ensaio especificados na NBR 7190 (1997).

Quando do recebimento do lote de madeira, pôde-se perceber uma grande diferença no peso das tábuas que o constituíam, indicando uma possível variação na densidade da madeira.

Esta madeira foi pesada, onde comprovou-se a grande variação na densidade desse lote. Após este procedimento, retirou-se ao acaso 30 tábuas de todo o lote. Estas foram, então, segregadas em dois sub-lotes: um formado por tábuas com densidade de até 700 g/cm^3 e outro de tábuas mais pesadas com densidade acima de 700 g/cm^3 . Os corpos-de-prova foram preparados a partir de tábuas retiradas ao acaso de cada um desses dois sub-lotes. Fez-se, portanto, a caracterização em dobro dessa madeira.

3.2. ADESÃO DA MADEIRA EM DIFERENTES PLANOS

Anteriormente à colagem das vigas, foram realizados ensaios com o intuito de verificar a qualidade da adesão da madeira com o adesivo resorcinol-formaldeído. Nesses testes de colagem foram utilizados corpos-de-prova que constituíam seis tratamentos, em que se variou a densidade e a direção das fibras das madeiras que constituíam as duas tabuinhas das juntas, todos eles recebendo adesivo na proporção de 300 g/m^2 e sendo submetidos à pressão aproximada de 1MPa durante 8 horas.

A Figura 1 ilustra o formato e a disposição das fibras nos corpos-de-prova produzidos e ensaiados.

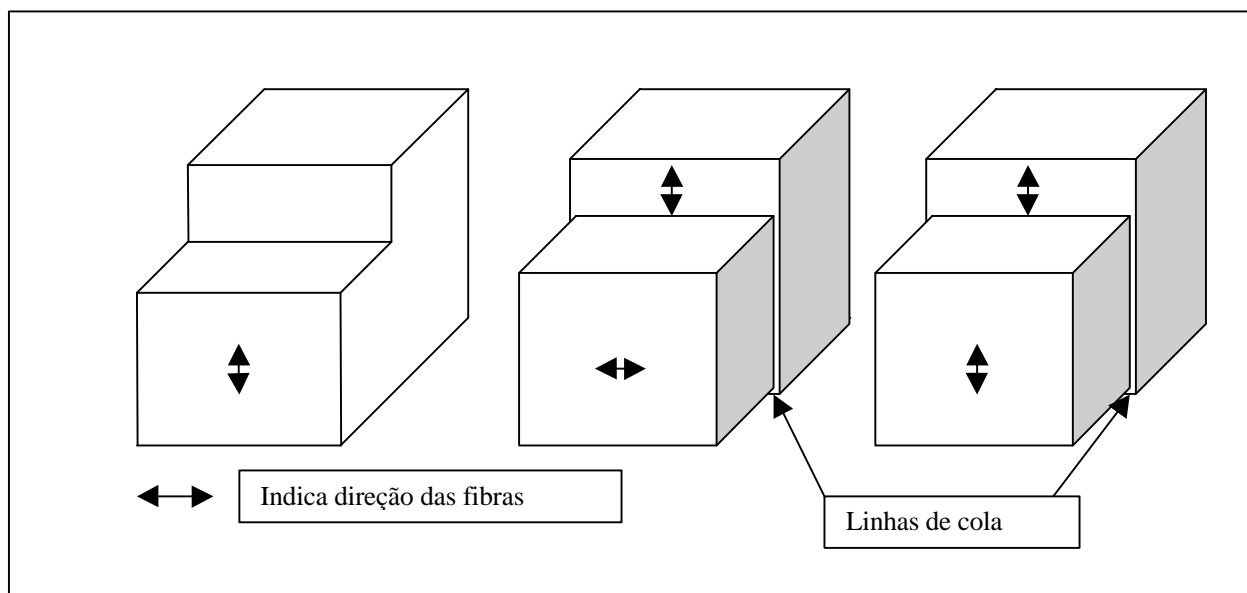


Figura 1- Geometria e orientação das fibras nos corpos-de-prova de cisalhamento da madeira sólida e da colada.

Quadro 5 -Tipos de tratamentos dos testes de adesão da madeira em diferentes planos.

RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	Orientação das Fibras e	Número de repetições
	Densidade	
Na madeira sólida	Paralela madeira leve	12
	Paralela madeira pesada	12
Na linha de Cola	Paralela madeira leve	12
	Paralela madeira pesada	15
	Paralela madeira leve com pesada	13
	Perpendicular madeira leve	21
	Perpendicular madeira pesada	18
	Perpendicular madeira leve com pesada	21

O teste foi conduzido segundo as variáveis que compreenderam, respectivamente, à resistência ao cisalhamento na madeira sólida ou na linha de cola da madeira colada, fibras paralelas ou perpendiculares entre si e se o corpo de prova era composto por madeira leve, pesada ou leve com pesada. Foram preparados, no mínimo, 12 corpos de prova de cada tratamento, totalizando um total de 124 corpos de prova ensaiados. Determinou-se a densidade e o teor de umidade de cada uma das

duas partes dos corpos-de-prova, depois de levados à ruptura para determinação da resistência.

Após a determinação da densidade e do teor de umidade, as partes pertencentes ao mesmo corpo-de-prova foram reunidas para avaliação do percentual de falha na madeira. Utilizou-se uma série de lâminas transparentes, previamente quadriculada, e com dimensões que atendessem a variabilidade observada para as dimensões dos corpos-de-prova. O quadriculado das lâminas dividiu o plano cisalhado em 25 partes, de modo que cada quadrícula representava 4% da área em análise. Considerou-se como falha na madeira a fratura profunda, com o arrancamento de partes de madeira, mas também a falha rasa, desde que com presença visível de fibras na superfície da ruptura.

Depois da determinação da porcentagem de falha na madeira, os dados foram submetidos à análise estatística. O desempenho da propriedade de resistência na linha de cola dos tratamentos foi avaliado por meio da análise de variância da resistência média apresentada, já o percentual de falha na madeira foi avaliada apenas através da média de falha apresentada. A resistência foi avaliada pelos critérios da norma NBR/7190, que estabelece que a resistência média das juntas coladas deve ser no mínimo igual a resistência característica da madeira ao cisalhamento, no teor de umidade padrão de 12%.

3.3 CONFECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DAS VIGAS DE EUCALIPTO

Após secas, as tábuas foram desempenadas e cortadas com cerca de 10 cm de largura, 3 cm de espessura e 170 cm de comprimento para as vigas testemunhas e 85 cm para as duas lâminas da alma das vigas com cobrejuntas. Para a confecção dos cobrejuntas utilizou-se peças de 35 e 43 cm de comprimento e 1,5 cm de espessura, que serviram para reforçar a colagem da emenda das lâminas da alma das vigas com cobrejuntas. Essas diferentes configurações de vigas com 1,60 m de vão foram ensaiadas até a ruptura. Realizados esses ensaios preliminares nos protótipos, as melhores configurações quanto às características de resistência foram utilizadas para a confecção de vigas em escala real.

Todas as vigas de 4 m de vão (tamanho real) tiveram aproximadamente as seguintes dimensões: lâminas de 20 cm de largura, 6 cm de espessura e 420 cm de comprimento para alma da testemunha e com 210 cm de comprimento para as vigas com cobrejuntas. Estas últimas foram feitas com 1 m de comprimento e com a mesma largura da alma e espessura de aproximadamente 3 cm para reforçar as emendas entre as lâminas de 210 cm de comprimento.

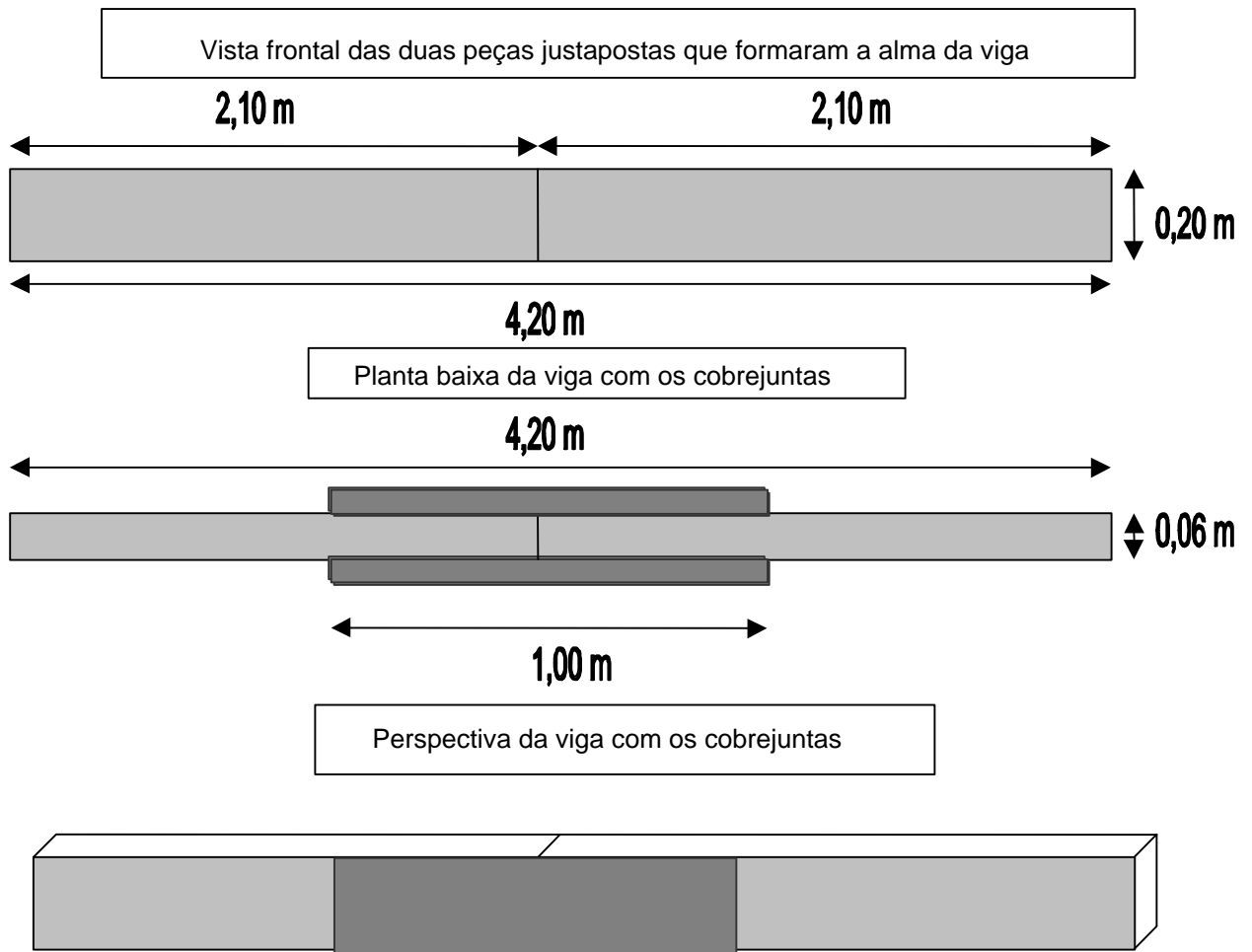


Figura 2- Geometria, dimensões e os detalhes das vigas com emendas e cobrejuntas.

3.4. SOLIDARIZAÇÃO DAS VIGAS COM ADESIVO RESORCINÓLICO

O adesivo resorcinólico se apresentava em dois componentes, sendo um a resina de cor marrom avermelhada, e o outro, o endurecedor (Preparado Endurecedor), que se apresentava na forma de pó bege.

Os dois componentes foram misturados nas proporções de 5/1 (5 partes de resina para 1 de catalizador) até se conseguir uma solução homogênea, sem vestígio de material não disperso; depois se aplicou o adesivo com pincel nas superfícies dos laminados a serem colados. Logo após, estas peças foram unidas umas às outras e encaminhadas à prensa, onde ficaram sob uma pressão de 1 MPa até a cura do adesivo (aproximadamente 8 h).

A peça assim fabricada não foi submetida a nenhum tipo de esforço até que se completasse pelo menos 8 dias após a sua colagem.

3.5. CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS VIGAS

Segundo a norma da ABNT (NBR 7190/97), a caracterização das propriedades mecânicas de vigas coladas deverá ser avaliada por flexão simples, como se fossem peças maciças de seção retangular, considerando-se que o vão teórico seja menor que a distância entre os eixos de apoio.

Os testes de flexão nos modelos, tanto em escala reduzida quanto no de tamanho real, foram conduzidos no quadro de reação, localizado nas dependências do laboratório de Propriedades Físicas e Mecânicas da madeira – Campus da UFV.

Estas vigas foram ensaiadas em quadro de reação, com cargas aplicadas por intermédio de um cilindro hidráulico e lidas por intermédio de duas células de carga, localizadas nos apoios. Durante os ensaios, procurou-se acompanhar os deslocamentos de flexão das peças sob carga crescente para se obter o módulo de rigidez das vigas. Em todos os casos, uma carga concentrada foi aplicada no ponto central do vão da viga, ou seja, no ponto da viga onde as distâncias da aplicação da carga em relação aos apoios se igualavam. O sistema utilizado para realização dos testes vem esquematizado na figura que encontra-se no Apêndice C.

Foram determinados, em cada ensaio, a carga de ruptura das vigas, além de terem sido tomadas medidas de deformação para cálculo da rigidez das peças.

Os resultados foram analisados para determinar as diferenças entre a viga maciça e as vigas com cobrejuntas colados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO

A madeira foi previamente caracterizada de acordo com a norma ABNT (NBR 7190/97), quando se obtiveram os resultados médios, bem como os coeficientes de variação das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus*, que são apresentados nos quadros 6 e 7 a seguir.

Como discutido anteriormente, o lote de madeira como adquirido parecia constituir-se de duas populações de tábuas de densidades diferentes. Determinadas as densidades de corpos-de-prova, preparados e ensaiados de acordo com a norma, pôde-se constatar que a “densidade aparente” da madeira do sub-lote menos denso era de 575 kg/m^3 , ao passo que a do segundo lote atingia 880 kg/m^3 , um valor 53% superior. Os dois valores médios são estatisticamente diferentes ($p < 0,01$) e podem indicar a presença de uma espécie de madeira que não *E. grandis* nos lotes de toras que a empresa fornecedora vem serrando.

O Quadro 7 mostra os valores médios e característicos encontrados nos diversos ensaios de propriedades mecânicas a que a madeira foi submetida. Pode-se verificar que a madeira de menor densidade atingiu valores inferiores, em todos os resultados, quando comparada com a de densidade mais elevada, demonstrando a forte relação existente entre a densidade da madeira e suas propriedades mecânicas

Quadro 6 - Valores médios experimentais e desvio padrão das propriedades físicas da madeira de eucalipto comercial

Propriedades Físicas	Valor médio	Desvio Padrão
“Densidade aparente”		
Do sub-lote “pesado”	880 kg/m ³	66,59 kg/m ³
Do sub-lote “leve”	575 kg/m ³	71,07 kg/m ³
De todo o lote	721 kg/m ³	167,74 kg/m ³
Umidade		
Do sub-lote “pesado”	12,48 %	2,29%
Do sub-lote “leve”	12,47 %	1,08 %
De todo o lote	12,475 %	1,75 %

Nos testes de cisalhamento obteve-se, nas madeiras de baixa densidade, uma resistência média 28,68 % menor em relação à de alta densidade. Na compressão paralela, a resistência foi de 20,67 % para menos; nos testes de compressão perpendicular foi, em média, 44,61% menor. Na madeira de baixa densidade, a resistência média à flexão foi 27,32% inferior. Apesar da densidade da madeira influenciar sua rigidez, essa relação mostrou-se ser influenciada, também, por outras propriedades, porquanto os resultados obtidos não seguiram a mesma tendência marcante observada nos de resistência.

Nos testes de compressão paralela, o módulo de elasticidade médio, obtido para a madeira de baixa densidade, foi apenas 5,47 % inferior ao de alta densidade. O módulo de elasticidade obtido nos testes de compressão perpendicular atingiu um valor inferior à metade do módulo médio da madeira de alta densidade. Nos ensaios de flexão, o módulo de elasticidade da madeira de baixa densidade ficou 18,56% abaixo do módulo da madeira mais densa.

Na tração paralela, verificou-se novamente a dependência da resistência em relação à densidade. A resistência das amostras de baixa densidade mostrou um valor médio 19,55% menor que a resistência média da madeira de alta densidade. Já o módulo de elasticidade à tração paralela médio do lote corrigido atingiu 18.793 MPa, com grande variabilidade nos resultados individuais, tanto no lote de baixa quanto no de alta densidade. A média do módulo de elasticidade à tração paralela do sub-lote de baixa densidade foi, porém, apenas 9,68% menor que a de alta densidade.

QUADRO 7 - Valores médios experimentais (com desvio padrão entre parênteses), valores corrigidos para o teor de umidade de 12% e valores característicos experimentais das propriedades mecânicas da madeira de eucalipto.

Propriedades mecânicas	Densidade ¹	Valor médio (MPa)	Valor Médio corrigido (MPa) U=12%	Valor característico (MPa)
Compressão paralela às fibras (f_{c0})	Baixa	49,5 (3,57)	49,5	46,5
	Alta	62,4 (4,31)	62,4	61,9
	Lote	55,9 (5,47)	55,5	54,2
Compressão perpendicular às fibras (f_{c90})	Baixa	3,6 (0,65)	3,6	3,1
	Alta	6,4 (0,86)	6,5	5,7
	Lote	4,9 (1,59)	4,9	4,4
Cisalhamento (f_v)	Baixa	8,3 (0,96)	8,7	7,8
	Alta	12,1 (1,45)	12,2	10,6
	Lote	10,2 (0,65)	10,2	9,2
Tração paralela às fibras (f_{t0})	Baixa	75,3 (23)	75,3(17,5)	56,96
	Alta	93,6 (28)	93,6(26,5)	73,74
	Lote	84,5 (28)	84,5(23,85)	65,35
Flexão (f_b)	Baixa	64,7 (9,56)	65,7(10,6)	54,7
	Alta	88,0 (12,60)	90,4(11,5)	76,1
	Lote	76,35 (16,18)	78,0(15,65)	65,4
Módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras (E_{c0})	Baixa	18.342 (4765)	18.412(4.904)	10.270
	Alta	19.933 (2667)	19.479(2.399)	16.510
	Lote	19.137 (3863)	18.947(3863)	13.390
Módulo de elasticidade à compressão perpendicular às fibras(E_{c90})	Baixa	392 (107)	388(112)	264
	Alta	772 (119)	786(109)	684
	Lote	564 (223)	565(229)	474
Módulo de elasticidade à tração paralela às fibras (E_{f0})	Baixa	16.154 (2079)	17.837(2353)	13.111
	Alta	17.827 (4465)	19.749(5019)	13.532
	Lote	16.990 (3512)	18.793(3956)	13.321
Módulo de elasticidade à flexão (E_f)	Baixa	13.772 (1732)	13.910(1.638)	11.747
	Alta	16.778 (2117)	17.080(1.181)	15.634
	Lote	15.275 (2436)	15.596(2.019)	13.690

¹Como definida no Quadro 6, anterior

4.2. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DA MADEIRA COLADA

No Quadro 8 estão especificados os tipos de tratamentos a que foram submetidos os corpos de prova, com os respectivos valores de resistência média à ruptura e os valores corrigidos para o teor de umidade de 12 %, bem como a densidade média do lote e a média do percentual de falha na madeira, com os respectivos desvios padrão. Para efeito de comparação, incluiu-se no quadro a resistência ao cisalhamento da madeira “sólida”.

Vê-se que os resultados de resistência à ruptura, por cisalhamento das juntas coladas, variaram de acordo com cada tratamento. Há diferença sempre significativa ($p < 0,05$) entre os valores médios dos tratamentos em que foram coladas tábuas com as

fibras nos sentidos perpendicular e paralelo ao esforço (7,9 vs. 3,3 MPa; 9,7 vs. 8,0 MPa; 5,6 vs. 3,2 MPa). Duas tábuas coladas com as fibras paralelas ao esforço não mostraram diferença significativa entre seus valores médios de resistência e a média da madeira sólida, para a classe de baixa densidade. Colar tábuas de densidades muito diferentes produziu juntas com resistência menor à da madeira menos densa e, portanto, não favoreceu o incremento da resistência desses corpos de prova. Nesses corpos de prova, a ruptura se deu sempre na madeira menos densa, como observado após os ensaios. A porcentagem de falha na madeira foi, em todos os casos, superior a 69 %, indicando facilidade de adesão da madeira utilizada e corroborando às conclusões acima, isto é, que as diferenças observadas devem ser, de fato, atribuídas às diferenças de densidade ou de orientação das fibras e não à técnica de adesão.

Quadro 8 - Valores médios da resistência ao cisalhamento das juntas coladas e da porcentagem de falha na madeira, com respectivos desvios-padrão (entre parênteses)

RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO		Valor Médio (MPa)	Valor corrigido para U=12% (MPa)	Densidade Média da madeira no ensaio (kg/m ³)	Média da Falha na madeira (%)
SITUAÇÃO					
Madeira "sólida"	Baixa densidade	8,3 (0,96)	8,7	533	-
	Alta densidade	12,1 (1,45)	12,2	809	-
Junta colada	Fibras paralelas Baixa densidade	7,7 (2,18)	7,9	582	84
	Fibras Paralelas Alta densidade	9,6 (2,33)	9,7	823	82
	Fibras Paralelas Baixa com Alta densidade	5,2 (2,80)	5,6	532	69
	Fibras Perpendiculares Baixa densidade	3,2 (1,05)	3,3	626	75
	Fibras Perpendiculares Alta densidade	7,7 (1,82)	8,0	759	71
	Fibras Perpendiculares Baixa com Alta densidade	3,1 (0,70)	3,2	554	75

O quadro com teste de médias(T-students) para amostras independentes, comparando-se as médias de resistência ao cisalhamento entre os tratamentos das

juntas coladas e o quadro de análise de variância dos efeitos dos tratamentos de adesão estudados (direção das fibras paralela versus perpendicular) vêm no anexo B deste trabalho.

Os resultados dos testes de cisalhamento na linha de cola serviram para subsidiar a confecção dos cobrejuntas, principalmente no que se refere à resistência ao cisalhamento na linha de cola. Analisando-se os resultados obtidos, viu-se que o valor mais elevado de resistência foi o do tratamento do corpo colado com madeiras de alta densidade e com as fibras paralelas entre si, atingindo uma resistência média, corrigida para a umidade de 12 %, de 9,7 MPa, seguido dos tratamentos com madeiras de alta densidade coladas com as fibras perpendiculares entre si, atingindo uma resistência média, corrigida, de 8,0 MPa, e com madeiras de baixa densidade coladas com as fibras paralelas entre si, que atingiram média de 7,9 MPa. Outro dado importante foi que o tratamento do corpo colado com madeiras de baixa densidade com fibras perpendiculares entre si e o constituído por madeira de alta e baixa densidade, com fibras também perpendiculares, atingiram praticamente a mesma resistência média de 3,2 e 3,3 MPa, respectivamente. Após a análise desses dados, concluiu-se que a melhor opção para se empregar os cobrejuntas seria solidarizando-os na viga com as fibras paralelas às da alma.

4.3. CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS VIGAS

4.3.1. RESISTÊNCIA

4.3.1.1. Vigas com 1,60 metros de vão

Foram confeccionadas, inicialmente, três vigas com 1,60 m de vão e com cobrejuntas de 35 cm de comprimento, 10cm de largura e 1,5 cm de espessura, correspondendo a cerca de 20 % da área total das faces da viga. Posteriormente, seis outras vigas foram confeccionadas, também de 1,60 m de vão, mas com cobrejuntas de 43 cm de comprimento e com largura e espessura igual a viga anterior, atingindo cerca de 25 % da área da face lateral da viga. O quadro 9 descreve as cargas atingidas quando da ruptura das vigas.

Vê-se, no quadro 9, que houve uma certa variabilidade nas “resistências” das vigas, o que já se poderia esperar, por ser a madeira um material tão heterogêneo. As vigas com cobrejuntas de 35 cm de comprimento atingiram uma “resistência” média de 60,87 MPa; aquelas com cobrejuntas de 43 cm de comprimento atingiram uma “resistência” média de 66,45 MPa, enquanto a média das vigas testemunha foi de 60,43

MPa. Portanto, analisando-se as médias das “resistências”, vê-se que as vigas com emendas com cobrejuntas se mostraram tão eficientes quanto as testemunhas. As de 25 % de recobrimento mostraram, de fato, uma resistência média até superior, cerca de 9,96 % maior, que a média de resistência das testemunhas e das vigas com cobrejunta de 35 cm de comprimento.

Verificou-se comportamento dos cobrejuntas quanto à ruptura, isto serviu para subsidiar na decisão da escolha do protótipo a ser confeccionado em tamanho real. Viu-se que o cobrejunta deveria ter pelo menos 25 % do comprimento da viga. Esta informação pode subsidiar outros tipos de projetos estruturais, como por exemplo, na construção de uma ponte de madeira, cujo tabuleiro consista de tábuas colocadas lateralmente. Se as tábuas sofrem interrupções, uma interrupção deve estar distante de pelo menos 25 % do comprimento uma da outra.

Como se poderá verificar a seguir, quando da descrição das falhas ocorridas, esse incremento evitou, também, que o rompimento se iniciasse por cisalhamento entre o cobrejunta e a alma, mas sim, que se desse por tração e compressão da alma, o que demonstrou a eficiência do cobrejunta como membro de ligação também em elementos fletidos.

Quadro 9. Carga de ruptura e resistência das vigas de 1,6 metros de vão ensaiadas.

Vigas	CARGA DE RUPTURA (N)	“RESISTÊNCIA” (MPa)
Testemunhas		
Número 1	9.030	71,6
Número 2	5.550	44,5
Número 3	7.740	65,2
Valores médios	7.440	60,43
Com cobrejuntas de 35 cm		
VIGA 1	7.800	64,5
VIGA 2	6.510	53,6
VIGA 3	7.830	64,5
Valores médios	7.380	60,87
Com cobrejuntas de 43 cm		
VIGA 1	5.630	45,2
VIGA 2	6.270	50,7
VIGA 3	11.360	92,3
VIGA 4	10.420	84,7
VIGA 5	7.010	56,1
VIGA 6	8.300	69,7
Valores médios	8.165	66,45

Quadro 10 - Descrição das rupturas nas vigas de 1,60 metros de vão

Viga	Caracterização da ruptura	OBS
Testemunha 1	Rompimento por tração e compressão	
Testemunha 2	Rompimento por tração e compressão	
Testemunha 3	Rompimento por tração e compressão	
Cobrejunta 1 (35cm)	Rompimento se deu por cisalhamento na linha de cola entre a alma e o cobrejunta	
Cobrejunta 2 (35cm)	Rompimento se deu por cisalhamento na linha de cola entre a alma e o cobrejunta	
Cobrejunta 3 (35cm)	Rompimento se deu por cisalhamento na linha de cola entre a alma e o cobrejunta	
Cobrejunta 1 (43cm)	Verificou-se uma ruptura no cobrejunta por tração e compressão.	Não houve sinal de cisalhamento entre o cobrejunta e a alma
Cobrejunta 2 (43cm)	Verificou-se uma ruptura no cobrejunta 7por tração e compressão no membro esquerdo da alma.	Houve inicio de cisalhamento entre o cobrejunta e a alma com ruptura da alma.
Cobrejunta 3 (43cm)	Verificou-se inicialmente uma ruptura no cobrejunta por tração.	Houve inicio de cisalhamento entre o cobrejunta e a alma.
Cobrejunta 4 (43cm)	Verificou-se inicialmente uma ruptura no cobrejunta por tração e compressão	Houve inicio de cisalhamento entre o cobrejunta e a alma.
Cobrejunta 5 (43cm)	Verificou-se uma ruptura no cobrejunta por tração e compressão	Houve inicio de cisalhamento entre o cobrejunta e a alma.
Cobrejunta 6 (43cm)	Verificou-se inicialmente uma ruptura no cobrejunta por tração e compressão	Houve inicio de cisalhamento entre o cobrejunta e a alma.

4.3.1.2. Vigas com 4 m de vão

A viga de dimensão real, ou seja, de 4 m de vão e cobrejuntas de 1 m de comprimento foi testada, utilizando-se o mesmo sistema dos protótipos.

O quadro 11, a seguir, descreve os valores de resistência à flexão das vigas de tamanho real ensaiadas e as cargas atingidas quando da ruptura.

Quadro 11- Cargas de ruptura e resistências à flexão das vigas de 4 metros de vão ensaiadas.

VIGA	CARGA DE RUPTURA (N)	“RESISTÊNCIA” (MPa)
TESTEMUNHA	27.950	65,80
VIGA 1	28.870	66,99
VIGA 2	25.410	60,06
VIGA 3	25.180	62,05
Valores Médios ¹	26.487	63.03

¹Valores médios das vigas com cobrejuntas

Vê-se que as vigas com cobrejuntas têm carga de ruptura um pouco superior (mais 3,29 %) ou um pouco inferior (10 %), quando comparadas com a viga testemunha sem emendas. Assim, é possível que os cobrejuntas que ocupam 25% da área central possam ser utilizadas na confecção de vigas que substituirão as vigas sólidas. Os modos de ruptura provocados por essas cargas estão descritos no quadro 12.

Quadro 12 - Descrição das rupturas nas vigas de 4 metros de vão

Viga	Caracterização da ruptura	OBS
Testemunha 1	Rompimento por tração e compressão.	
Cobrejunta 1	Verificou-se uma ruptura no cobrejunta por tração e compressão e por cisalhamento no cobrejunta.	O cisalhamento se prolongou até o membro esquerdo da alma.
Cobrejunta 2	Rompimento se deu por cisalhamento na linha de cola entre a alma e cobrejunta	
Cobrejunta 3	Verificou-se uma ruptura no cobrejunta por tração e compressão e por cisalhamento no cobrejunta.	O cisalhamento se prolongou por toda a seção transversal dos cobrejuntas.

As imagens mostrando os detalhes das rupturas das vigas de 4 metros vem no apêndice E deste trabalho.

4.3.2. RIGIDEZ

4.3.2.1. Vigas com 1,60 metros de vão

O quadro 13 descreve os valores dos módulos de elasticidade das vigas de 1,6 m de vão ensaiadas. Estes módulos foram obtidos utilizando-se a fórmula

$$E = \frac{PL^3}{48\Delta I}$$

Onde:

E= Módulo de elasticidade

P= Força ou carga

L= Vão ou distância entre os apoios

Δ = Deslocamento

I= Momento de inércia (considerou-se nas vigas com cobrejuntas uma seção transversal constante).

Quadro 13 - Vigas de 1,6 m de vão com suas respectivas cargas de ruptura e módulos de elasticidade aparentes

VIGA	CARGA DE RUPTURA (N)	"E" (MPa)
<u>Testemunhas</u>		
Número 1	9.030	10.172
Número 2	5.550	8.985
Número 3	6.720	11.220
Valores Médios	7.100	10.
<u>Cobre juntas de 35 cm</u>		
VIGA 1	7.800	13.747
VIGA 2	6.510	14.185
VIGA 3	7.830	13.889
Valores médios	7.380	13.940
<u>Cobrejuntas de 43 cm</u>		
VIGA 1	5.630	9.759
VIGA 2	6.270	11.090
VIGA 3	11.360	11.271
VIGA 4	10.420	10.842
VIGA 5	7.010	13.412
VIGA 6	8.300	14.398
Valores médios	8.165	11.795

4.3.2.2. Vigas com 4 m de vão

O quadro 14, a seguir, descreve as vigas ensaiadas com suas dimensões e as cargas atingidas quando da ruptura.

Quadro 14 – Carga de ruptura e módulos de elasticidade aparentes vigas de 4 metros de vão.

VIGA	CARGA DE RUPTURA (N)	“E” (MPa)
TESTEMUNHA	27.950	10.831
VIGA 1	28.870	14.387
VIGA 2	25.410	13.124
VIGA 3	25.180	12.897
Valores médios ¹	26.487	13.469

¹ Valores médios das vigas com cobrejuntas.

Vê-se que as vigas com cobrejuntas apresentaram uma rigidez superior à apresentada pela testemunha, uma vez que esta possuía uma inércia maior em 25 % do seu comprimento. Em média, a rigidez das vigas com cobrejuntas e com 4 m de vão foi 24,5 % superior a rigidez da viga testemunha de mesma dimensão, sendo que a viga 1 (com cobrejuntas) chegou a atingir um valor de rigidez 33 % maior que a testemunha, embora na viga 3 ela tenha sido apenas 19 % maior.

De modo geral, nota-se que a viga com o cobrejunta apresenta uma eficiência bastante superior à testemunha na propriedade de rigidez, o que a habilita a ser utilizada como corpo fletido submetido a grandes vãos.

O quadro 15 mostra a comparação dos deslocamentos por flexão ocorridos nas peças, em diferentes pontos, ao longo do vão das vigas.

Quadro 15 – Deslocamentos por flexão em diferentes pontos ao longo do vão das vigas, quando submetidas a uma carga de 6740 N.

Posição na viga (m) a partir do apoio esquerdo	Deslocamento (cm)				
	Testemunha	Viga 1	Viga 2	Viga 3	Teórico Da testemunha*
0,5 m (relógio comparador)	0,7941	0,7603	0,8354	0,5010	0,668
1,0 m (relógio comparador)	1,3158	1,0184	1,1839	1,2916	1,250
1,5 m (relógio comparador)	1,6360	1,0874	1,3275	1,4567	1,662
1,75 m (relógio comparador)	1,7992	1,2668	1,3943	1,5056	1,777
2,0 m (transdutor de deslocamento)	1,8216	1,4120	1,4748	1,6057	1,818

*Valores obtidos, utilizando-se a equação da linha elástica.

Na Figura 3 pode-se visualizar a eficiência dos relógios comparadores na leitura dos deslocamentos, pois vê-se que os deslocamentos por deflexão em diferentes pontos ao longo do vão das vigas, quando submetidas a uma carga de 6740 N, são muito semelhantes aos obtidos utilizando a fórmula clássica

$$\ddot{A} = \frac{PL^3}{48EI}$$

ONDE:

\ddot{A} = deformação específica

P = Força ou carga de 6740 N

E = Módulo de elasticidade médio

L = Vão ou distância entre os apoios da viga

I - Momento de inércia (considerou-se nas vigas com cobrejuntas uma seção transversal constante).

Vê-se que as vigas com emendas e cobrejuntas tiveram um deslocamento sempre inferior ao da viga testemunha, quando submetidas a uma carga de mesma magnitude. Estas diferenças nos deslocamentos podem ser mais facilmente visualizadas na figura a seguir (figura 4).

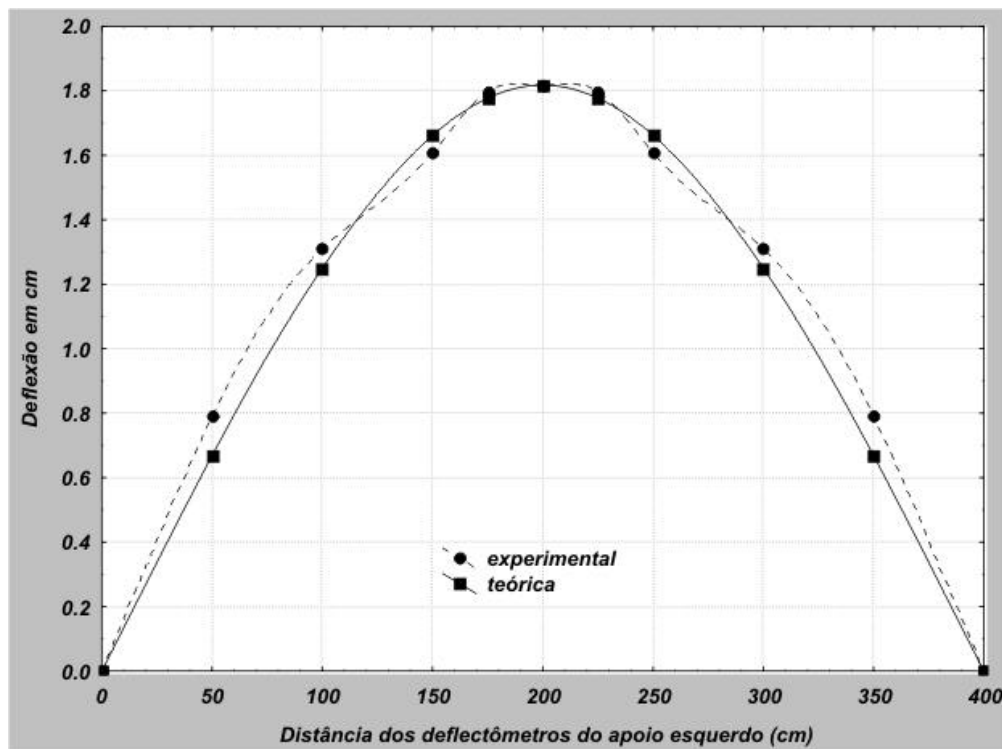


Figura 3- Deslocamentos por deflexão em diferentes pontos, ao longo do vão da viga testemunha (experimental) e os pontos calculados pela fórmula clássica(teórica), quando submetidas a uma carga de 6740 N.

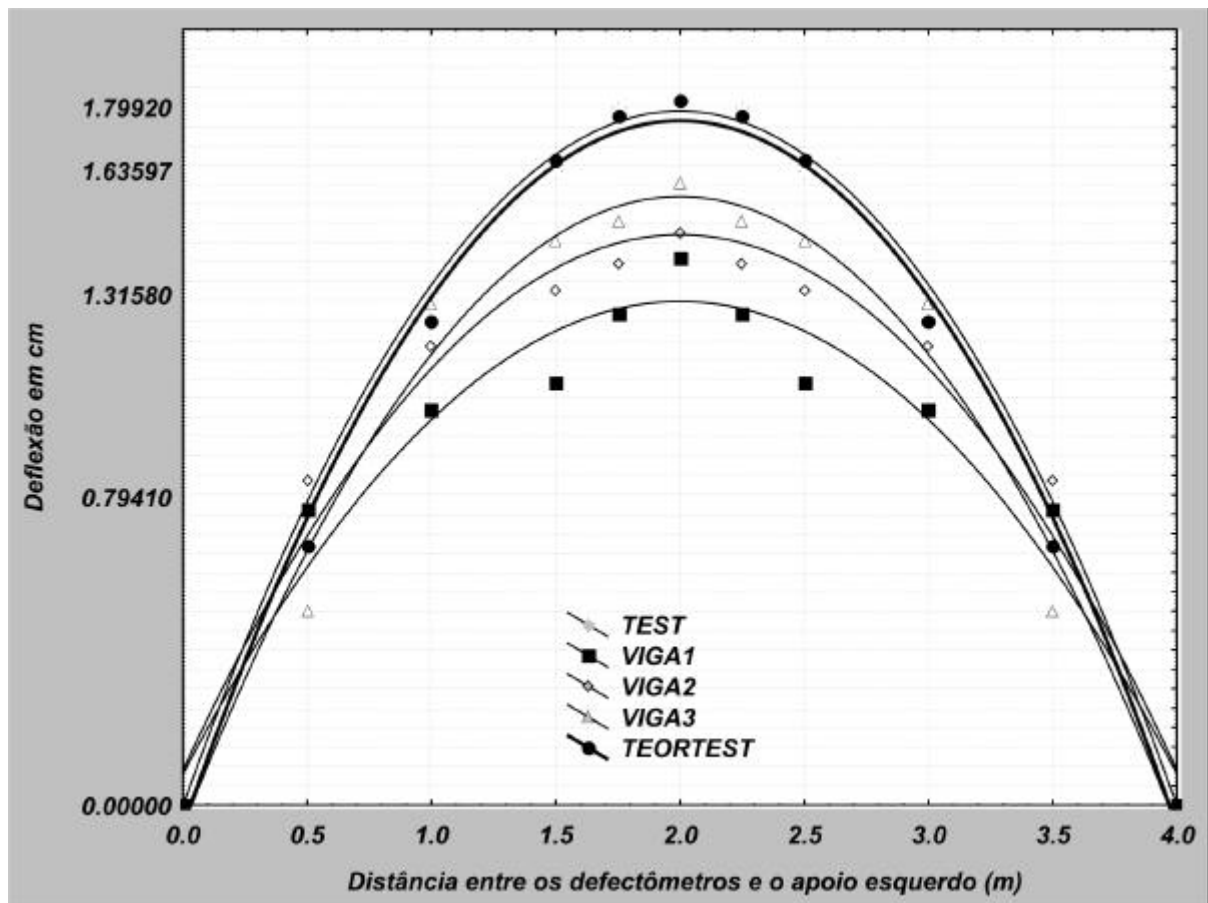


Figura 4 - Deslocamentos por deflexão em diferentes pontos ao longo do vão das vigas quando submetidas a uma carga de 6740 N.

O diagrama da viga testemunha de 4 m, com as tensões e o seu respectivo deslocamento, bem como o seu cálculo, se encontra no apêndice A.

5. RESUMO E CONCLUSÃO

O presente trabalho teve o objetivo de construir, testar e avaliar o comportamento das vigas de madeira de eucalipto, cuja alma foi formada por duas peças emendadas por cobrejuntas, inteiramente coladas à mesma com adesivo resorcinólico, a fim de consolidar o conjunto da viga.

Primeiramente, obteve-se, para a fabricação das vigas, um lote de madeira comercial de eucalipto de uma empresa brasileira. Anteriormente à fabricação das vigas, foram obtidas do mesmo lote de madeira, amostras para realização da investigação direta das propriedades características da madeira. Realizou-se uma pré-seleção, separando-se o lote em dois sub-lotes, um de maior densidade (madeira mais pesada) e outro de menor densidade (madeira mais leve). Depois foi feita a caracterização da madeira, quando foram obtidas as seguintes informações: teor de umidade, densidade, resistência à compressão normal e paralela às fibras, à tração paralela às fibras, ao cisalhamento e à flexão estática. Também se obtiveram os módulos de elasticidade à compressão paralela e perpendicular às fibras, à tração e à flexão. O valor da densidade aparente médio, obtido no sub-lote de madeira leve, foi de 575 kg/m³; já o de madeira mais pesada foi de 880 kg/m³ e de todo o lote foi de 721 kg/m³, conclui-se que tratavam-se portanto, de dois sub-lotes de propriedades bastante distintas.

Os resultados das propriedades mecânicas da madeira de eucalipto, obtidos do sub-lote de madeira mais leve, mostraram valores semelhantes aos apresentados no anexo E da NBR/7190 referentes às madeiras de *Eucalyptus grandis*, os resultados da madeira mais pesada eram superiores. Isto mostra a necessidade da empresa que

comercializa essa madeira de realizar uma pré-seleção da mesma para que ela possa ser utilizada de forma mais racional.

Outro experimento foi conduzido para testar a eficiência da adesão da madeira em dois diferentes planos (paralelo e perpendicular às fibras) e com madeiras de diferentes densidades (alta, baixa e alta colada à de baixa), utilizando-se o adesivo resorcinol-formaldeído. Determinou-se a resistência ao cisalhamento longitudinal dos corpos-de-prova ensaiados, bem como, avaliou-se a porcentagem de falha na madeira dessas amostras.

Quanto aos testes de adesão, verificou-se que os corpos-de-prova submetidos ao cisalhamento foram bastante satisfatórios. Notou-se, quanto ao critério de resistência, que nas madeiras mais leve não houve diferença significativa entre os valores de resistência obtidos nos corpos de prova sólidos e da junta colada. Já na de alta, ficou difícil prever, uma vez que na junta colada, os resultados de resistência se aproximaram mais aos valores médios de resistência da madeira sólida mais leve que aos valores de resistência da madeira sólida mais pesada. Em parte à obtenção deste último resultado, pode ser explicado, conforme conclusões exposta por vários autores que descrevem que madeiras de alta densidade são de difícil colagem, por essas permitirem pouca penetração do adesivo, ocasionando assim, uma junta de má qualidade. Portanto, concluiu-se que o melhor tratamento na solidarização dos cobrejuntas à alma das vigas seria a utilização de madeira menos densa colada paralelamente às fibras,

Protótipos das vigas desejadas foram construídos com tábuas de cerca de 10 cm de largura, 3 cm de espessura e 170 cm de comprimento nas testemunhas de madeira inteiriça e 85 cm nas duas partes da alma das vigas a serem coladas com cobrejuntas. Na confecção dos cobrejuntas utilizaram-se pequenas tábuas de 35 ou de 43 cm de comprimento e 1,5 cm de espessura. Essas vigas de 1,60 m de vão foram ensaiadas até a ruptura. Realizados esses ensaios preliminares nos protótipos, decidiu-se que a melhor configuração era aquela em que o cobre-juntas ocupasse 25 % da superfície lateral das tábuas.

Todas as vigas de tamanho real tiveram, aproximadamente, as seguintes dimensões: tábuas de 20 cm de largura, 6 cm de espessura e 420 cm de comprimento, nas testemunhas e duas tábuas com 210 cm de comprimento e mesma espessura e largura, nas vigas com emendas. Estas últimas foram feitas com cobrejuntas de 1 m de comprimento e com a mesma largura da alma e espessura de aproximadamente 3 cm para reforçar as emendas entre as lâminas de 210 cm de comprimento.

Os testes de todas as vigas, tanto dos protótipos quanto das de escala real, foram realizados em quadro de reação, no qual as vigas foram submetidas a teste de flexão simples, com uma carga concentrada no ponto central do vão, ponto este que coincidia com a emenda da viga. Durante esse ensaio, foram tomadas leituras em 4 relógios comparadores e um transdutor, instalados em pontos específicos da face inferior da viga, de modo a registrar os deslocamentos por deflexão da viga sob carga crescente. Os resultados de desempenho das unidades construídas foram analisados pela resistência e pela rigidez apresentadas.

No que se refere aos ensaios com os protótipos das vigas com vão de 1 m e 60 cm, utilizando-se dois comprimentos de cobrejuntas (35 e 43 cm), concluiu-se que os protótipos com cobrejuntas de 43 cm mostraram valores médios de resistência e rigidez semelhantes aos da testemunhas (viga sólida), e além disso, esse comprimento mostrou ser mais eficiente, pois o rompimento se iniciou por tração e compressão, assemelhando-se aos modos de ruptura das testemunhas; já o protótipo com cobrejuntas de 35 cm apresentou várias fraturas por cisalhamento, o que levou-se a optar por cobrejunta que recobrisse 25 % da face do comprimento total da viga.

As vigas de tamanho real construídas apresentaram excelente desempenho em termos de resistência, em alguns casos superando as resistências da viga testemunha. Quanto à rigidez, o desempenho delas foi considerado adequado, já que os deslocamentos das vigas com cobrejuntas se apresentaram bastantes inferiores quando comparados ao da viga testemunha, submetida a uma mesma magnitude de carga, o que proporciona grande vantagem estrutural a este novo tipo de viga, já que as limitações das flechas objetivavam, entre outros aspectos, evitar elevadas deformações da estrutura que podem provocar o estado de fluência plástica e conseqüentemente o seu colapso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAHÃO, C. P. **Efeito da redução da área colada no comportamento de vigas e colunas de madeira laminada de *Eucalyptus grandis***. 1999., 60p. Dissertação (mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- AMERICAN FOREST & PAPER ASSOCIATION (AF&PA) **National design specification for wood construction**. Washington, DC: 1997. 174P.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Annual book of A.S.T.M. Standards**. Philadelphia: A.S.T.M., 1994. 608P. (Parte 4.10, wood).
- AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION (AITC). **Timber Construction Manual**. Washington , D.C. A.I.T.C., 1992. 430p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Projetos de estruturas de madeira – NBR 7190**. Rio de Janeiro: A.B.N.T. ,1997. 107P.
- BRADY, D. A., F. A. KAMKE.. **Effects of hot-pressing parameters on resin penetration**. Forest Prod. J. 38 11/12: 1988 63-68. Disponível no site <http://scholar.lib.vt.edu> em setembro de 2002.
- CARVALHO, A. M. **Valorização da madeira do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* através da produção conjunta de madeira serrada em pequenas dimensões**. Tese de Mestrado, ESALQ-USP São Paulo-SP 2000. Disponível no site: < <http://www.ipef.br> >. Acesso em 12 dezembro 2001.
- CECAE - Coordenadoria Executiva de Cooperação Universitária e de Atividades Especiais – USP **Informações sobre cola para compensados de madeira**. Disponível em <<http://www.cecae.usp.br>>. Acesso em: 12 dezembro 2001.

- DELLA LUCIA, R. M., VITAL, B. R. **Propriedades físicas e mecânicas da madeira de eucalipto**. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v.12, n.141, p.71-74, 1986.
- FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood Handbook: wood as an engineering material**. Madison, Wi: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 1999. 463 p.
- FREAS, A. D., SELBO, M. L. **Fabrication and design of glued laminated wood structural members**. Department of Agriculture – Washington, U.S.D.A.,1954. 220p.
- KOLLMANN, F .F. P.,KUENZI, E. W., STAMM, A. J. **Principles of wood science and tecnologia** – Wood based materials, New York - vol II. 1975, 703p.
- MARRA, A. A. **Technology of wood bonding: Principles in practice**. Van Nostrand Reinhold, 454pp. New York, NY. 1992.
- MENDES, L. M.; SILVA, J. R. M. da; TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T. **Técnicas corretas de secagem da madeira de eucalipto ao ar livre**. In: Conferência IUFRO sobre Silvicultura e Melhoramento de Eucaliptos, Salvador, 1997. Anais. Colombo: EMBRAPA, v. 3, 1997.p. 373-380.
- NASCIMENTO, A. M. **Avaliação experimental de vigas retas de madeira laminada colada e seus componentes, feitas de madeira de Pinus spp. somente e também reforçadas com madeira de Corymbia (Eucalyptus) citriodora**, 2000, 137p. Tese de doutorado., UFV, Viçosa.
- OLIVEIRA, JOSÉ TARCÍSIO DE. **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil**. Escola Politécnica da USP, tese doutorado, 1997. 450 p.
- PANSHIN, A. J., BROWN, H. P and FORSAITH, C. C. **Text book of Wood Technology**. Vol II. McGraw Hill, NewYork.1952. 783p.
- PETRAUSKY, A., DELLA LUCIA, R. M. **Quadro de Reação para ensaio de Estruturas de Madeira**, SC, 1998 In: VI ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 1998. Florianópolis , SC. **Anais** Florianópolis, Departamento de Engenharia Civil- UFSC, 1998.. p.57-64.
- PETRAUSKY, A. **Comportamento de ligações adesivas e avaliação experimental de tesouras de telhados feitas de laminado colado em madeira de *Eucalyptus grandis***. Viçosa, 2000. 128 p. Dissertação/Tese (Doutorado em Ciência Florestal), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- PFEIL, W. **Estruturas de Madeira** . Rio de Janeiro: Livros técnicos e Científicos Editora S.A. 1989. 295p.
- PIZZI, A. **Advanced wood adhesives technology**. New York: Marcell Dekker, 1994. 289 p.

PIZZI, A. **Wood adhesives: chemistry and technology**. New York: Marcell Dekker, 1983. 364 p.

PIZZI, A., MITTAL, K.L.: **Handbook of adhesive technology**. New York: Marcell Dekker, 1994. 680 p.

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

VITAL, B. R. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Viçosa. MG, SOCIEDADE DE INVESTIGAÇÕES FLORESTAIS, 1984. 21p. (Boletim Técnico, 1).

APÊNDICES

Apêndice A

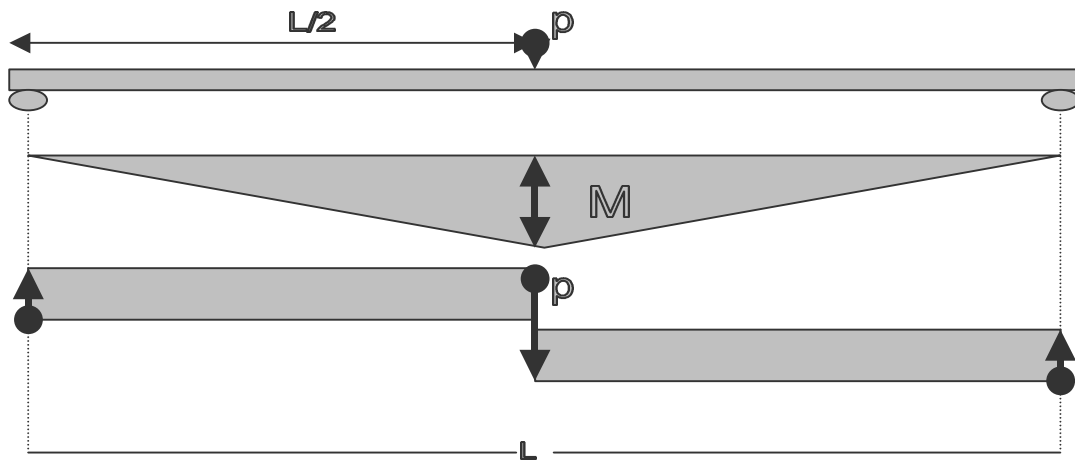


Figura 1A. Diagramas de momentos fletores e forças cortantes das vigas ensaiadas.

Para a viga testemunha por exemplo, foram obtidos os seguintes valores:

Dimensões $h= 20\text{cm}$ $b= 6\text{cm}$ $L = 4$ metros

Momento de Inércia $(I) = (b \cdot h^3)/12 = 4.000 \text{ cm}^4$

Módulo de resistência $w = (b \cdot h^2)/6 = 400\text{cm}^3$

Flecha admissível*

$$f_{adm} = L/200 = 400/200 = 2 \text{ cm}$$

$$P_{admissível} = \frac{48EI f_{adm}}{L^3} = \frac{4159 e^7}{6.4 e^7} = 649,86 \text{ Kgf ou } 6.498,6 \text{ N}$$

Momento Fletor máximo $M= (PL)/4 = 6.498,6 \text{ N.m}$

Tensões de Flexão

a) Borda tracionada $\sigma_t = M/W = + 16,25 \text{ MPa}$

a) Borda Comprimida $\sigma_c = M/W = - 16,25 \text{ MPa}$

* De acordo com a Norma NBR 7190/97a flecha efetiva U_{ef} , determinada pela soma das parcelas atribuídas à carga permanente (U_g) e à carga acidental (U_Q), não podem superar 1/200 dos vãos.

Apêndice B

Quadro 1B- Quadro com teste de médias T-students para amostras independentes nos tratamentos de adesão para verificação da resistência ao cisalhamento das juntas coladas.

Interação entre os tratamentos	Média 1	Média 2	t-valor	gl	p	N1	N2
PAR_AB vs. PERP_A	5,611091	8,042572	3,02386*	29	0,005181	13	18
PAR_AB vs. PER_AB	5,611091	3,240586	4,101696*	32	0,000263	13	21
PAR_AB vs. PERP_B	5,611091	3,333973	3,533696*	32	0,001271	13	21
PAR_AB vs. PAR_B	5,611091	7,868054	2,25738*	23	0,033784	13	12
PAR_AB vs. PAR_A	5,611091	9,651481	4,43602*	26	0,000149	13	15
PER_AB vs. PERP_A	3,240586	8,042572	11,2568*	37	0,000000	21	18
PER_AB vs. PERP_B	3,240586	3,333973	0,347015	40	0,730399	21	21
PER_AB vs. PAR_B	3,240586	7,868054	8,68598*	31	0,000000	21	12
PER_AB vs. PAR_A	3,240586	9,651481	12,8598*	34	0,000000	21	15
PERP_A vs. PERP_B	8,042572	3,333973	9,607632*	37	0,000000	18	21
PERP_A vs. PAR_B	8,042572	7,868054	0,223510	28	0,824761	18	12
PERP_A vs. PAR_A	8,042572	9,651481	2,25033*	31	0,031667	18	15
PERP_B vs. PAR_B	3,333973	7,868054	7,43384*	31	0,000000	21	12
PERP_B vs. PAR_A	3,333973	9,651481	11,1908*	34	0,000000	21	15
PAR_B vs. PAR_A	7,868054	9,651481	2,00715	25	0,055661	12	15

* Tcalc > Ttab, logo as médias diferem significativamente a 5% de probabilidade.

OBS: Variáveis foram tratadas como amostras independentes

Tratamentos das juntas coladas:

PERP_A= Fibras perpendiculares e madeira de alta densidade

PER_AB= Fibras perpendiculares e madeira de alta com baixa densidade

PERP_B= Fibras perpendiculares e madeira de baixa densidade

PAR_AB= Fibras paralelas e madeira de alta com baixa densidade

PAR_B= Fibras paralelas e madeira de baixa densidade

PAR_A= Fibras paralelas e madeira de alta densidade

Quadro 2B- Quadro com análise de variância dos efeitos dos tratamentos de adesão estudados (direção das fibras) para verificação da resistência ao cisalhamento das juntas coladas de eucalipto.

FV	GL	SQ	QM	F-Razão	p
Coladas com fibras paralelas					
versus					
coladas com fibras perpendiculares	28	26533.91	947.64	1,707	0.1758
Resíduo	11	6105.45	555,04		

O F tabelado equivale a 1,64 que é < que a razão entre as variâncias 1,707 , portanto as variâncias dos valores nos tratamentos de adesão das amostras com fibras paralelas diferem significativamente ($p < 0,05$) dos tratamentos de adesão das amostras com fibras perpendiculares.

Apêndice C

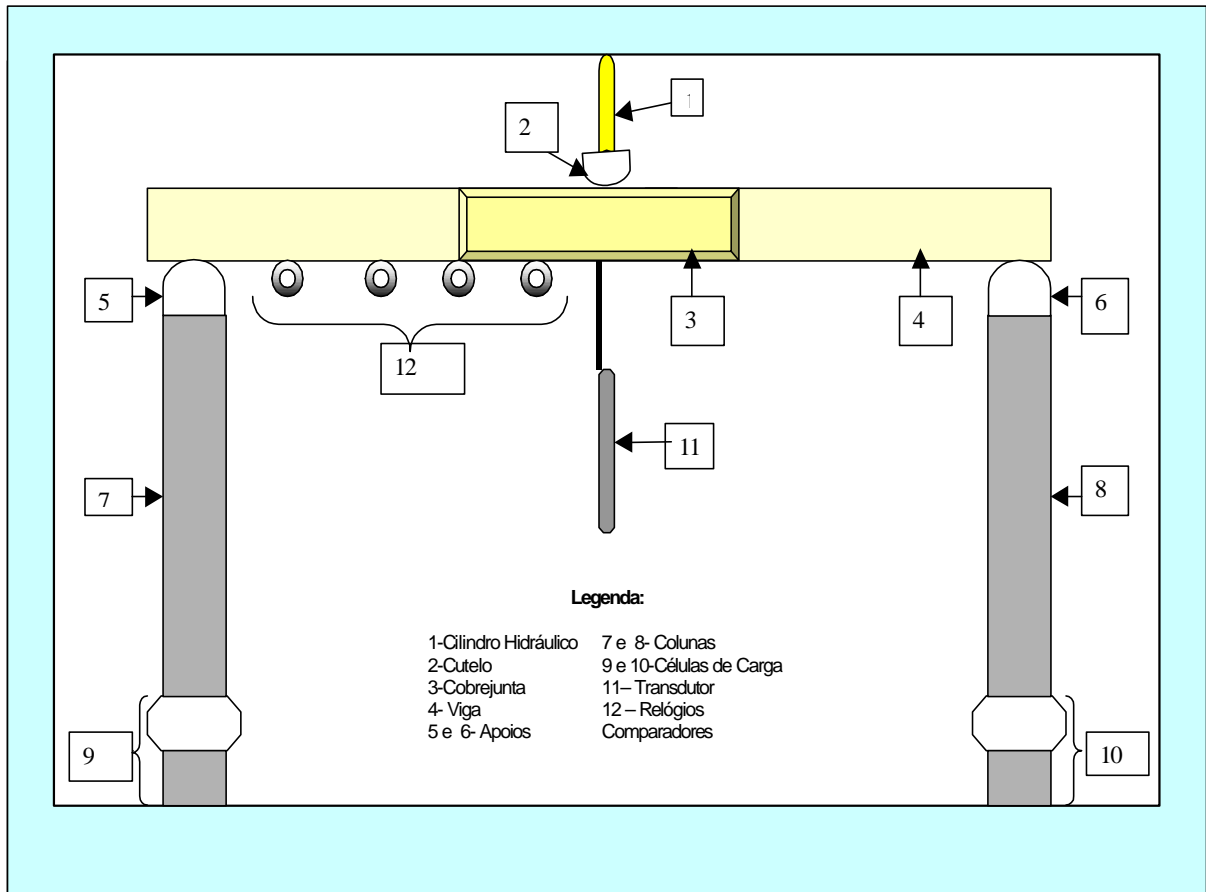


Figura 1C - Quadro de reação e a aparelhagem utilizada para os ensaios à flexão das vigas com emendas e cobrejuntas.

Apêndice D

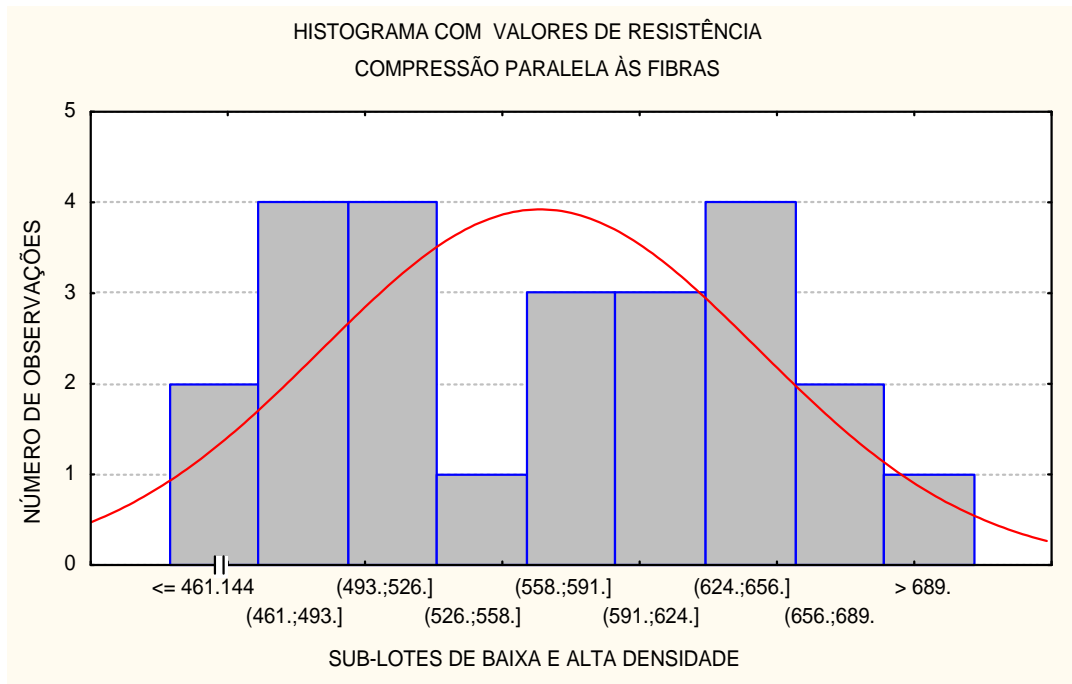


Figura 1D – Histograma com os valores de resistência à compressão paralela às fibras subdivididos em classes de densidade aparente mostrando a heterogeneidade do lote.

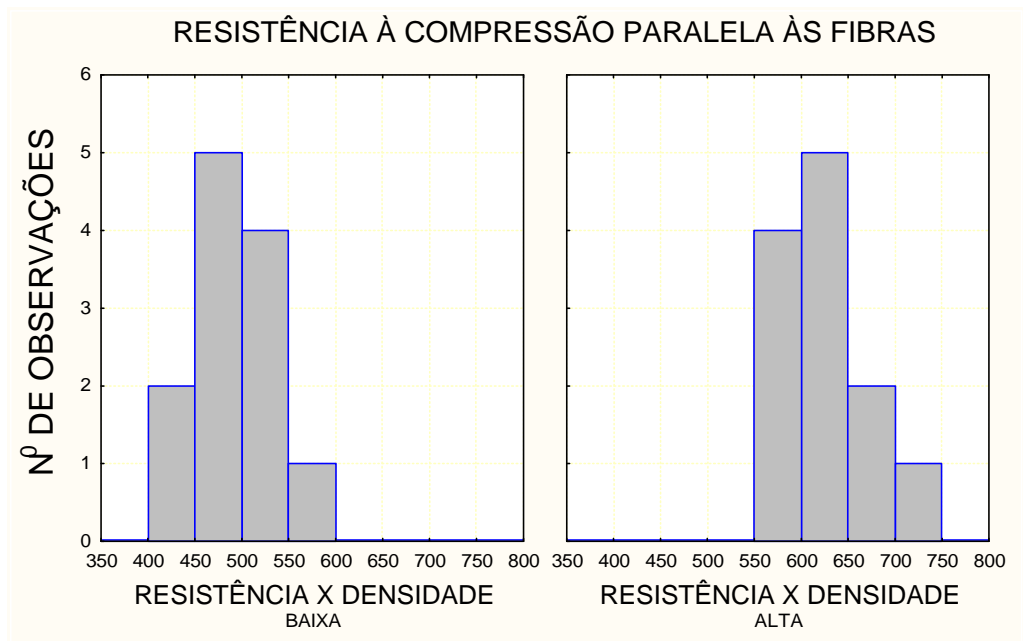


Figura 2D – Histogramas com os valores de resistência a compressão paralela às fibras subdivididos em classes de densidade aparente e separados por sub-lotes, mostrando uma tendência de variação mais próxima da normalidade.

Apêndice E

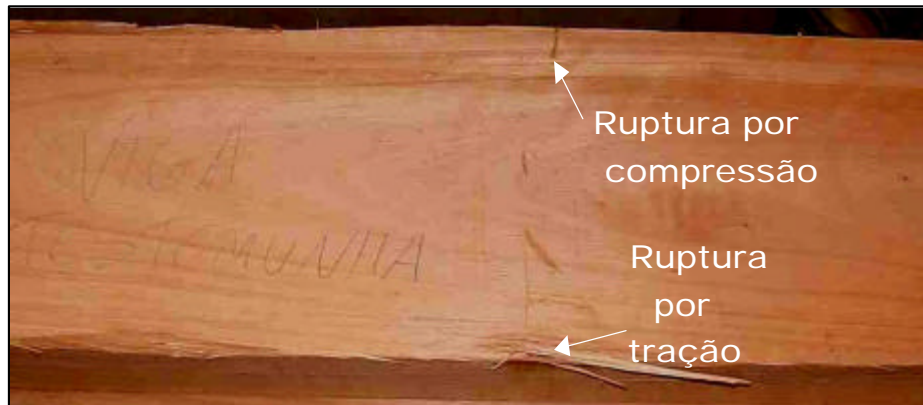


Imagem 1E- Ruptura da viga testemunha de 4 metros de vão.

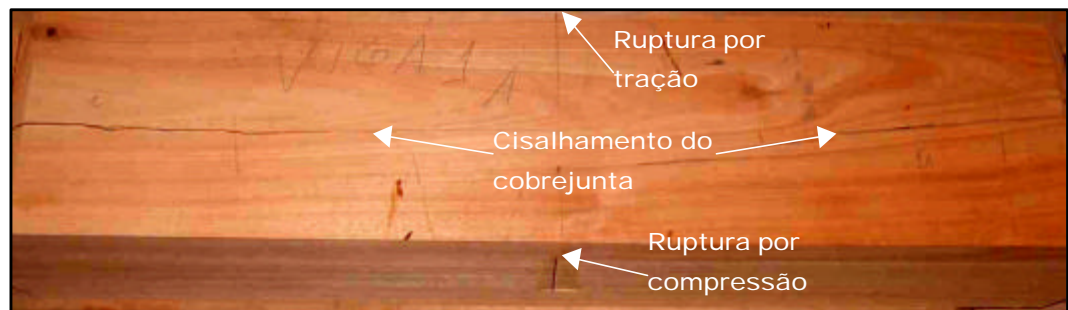


Imagem 2E- ruptura da viga 1 com cobrejunta de 4 metros de vão.



Imagem 3E- Ruptura da viga 2 com cobrejunta de 4 metros de vão.

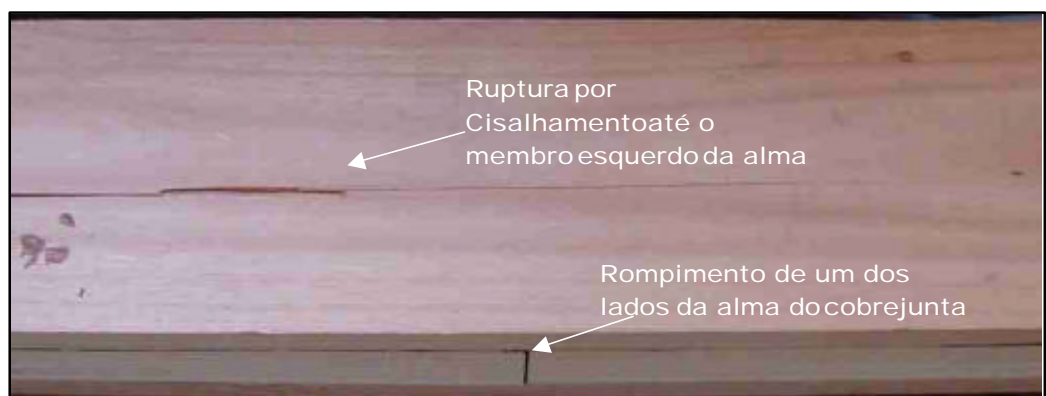


Imagem 4E- Ruptura da viga 3 com cobrejunta de 4 metros de vão.