

CHRISTOVÃO PEREIRA ABRAHÃO

**EFEITO DA REDUÇÃO DA ÁREA COLADA NO
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE VIGAS E COLUNAS DE
MADEIRA LAMINADA DE *Eucalyptus grandis***

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
MAIO - 2001

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

T

A259e
2001

Abrahão, Christovão Pereira, 1966-

Efeito da redução da área colada no comportamento mecânico de vigas e colunas de madeira laminada de *Eucalyptus grandis* / Christovão Pereira Abrahão. – Viçosa : UFV, 2001.

61p. : il.

Orientador: Ricardo Marius Della Lucia
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, 1999

1. Madeira laminada colada - Cisalhamento. 2. Vigas de madeira - Cisalhamento. 3. Colunas de madeira - Cisalhamento. 4. Construção de madeira. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDO adapt. CDD 634.9832286

CHRISTOVÃO PEREIRA ABRAHÃO

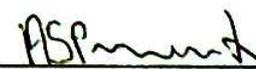
**EFEITO DA REDUÇÃO DA ÁREA COLADA NO
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE VIGAS E COLUNAS DE
MADEIRA LAMINADA DE *Eucalyptus grandis***

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*.

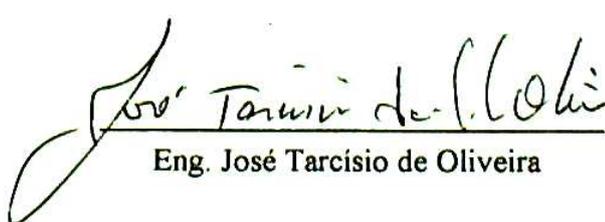
APROVADA: 9 de setembro de 1999.



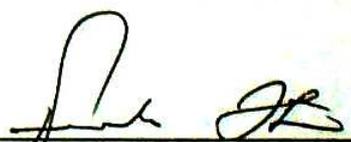
Prof. Benedito Rocha Vital
(Conselheiro)



Prof. Alexandre Santos Pimenta
(Conselheiro)



Eng. José Tarcísio de Oliveira



Prof. Fernando da Costa Baêta



Prof. Ricardo Marius Della Lucia
(Orientador)

À minha família,
frondosa árvore
de sombra farta
e doces frutos.

AGRADECIMENTO

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Florestal, pela minha formação. e oportunidades.

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor Ricardo Marius Della Lucia, pela orientação e amizade.

Aos professores José Tarcísio de Oliveira e Marcio Sampaio Sarmet Moreira, pelas sugestões e pelo aconselhamento.

Aos colegas da pós-graduação, pela solidariedade.

Ao bom amigo Cassio Murillo Moreira Trovatto, que sempre me ajudou a carregar o piano.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

CHRISTOVÃO PEREIRA ABRAHÃO, filho de Epiphaneo Walter Abrahão e Eny Pereira, nasceu em Andrelândia, Minas Gerais, em 13 de dezembro de 1966.

Em 1995, ingressou no curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, obtendo o título de Engenheiro Florestal em fevereiro de 1997.

Em março de 1997, ingressou no curso de Mestrado em Ciência Florestal, submetendo-se à defesa de tese em setembro de 1999.

CONTEÚDO

| | Página |
|---|--------|
| EXTRATO | vii |
| ABSTRACT | ix |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA | 4 |
| 2.1. A madeira laminada colada..... | 4 |
| 2.2. Vantagens e desvantagens da madeira laminada colada..... | 5 |
| 2.3. Histórico da madeira laminada colada | 7 |
| 2.4. A confecção do laminado colado | 8 |
| 2.4.1. Secagem e classificação da madeira | 9 |
| 2.4.2. Emendas longitudinais..... | 12 |
| 2.4.3. Adesão das lâminas em camadas superpostas | 13 |
| 2.4.4. Acabamento | 15 |
| 2.4.5. Tratamentos preservativos | 16 |
| 2.5. Projetos de vigas e colunas | 18 |
| 2.5.1. Elementos comprimidos ou colunas | 18 |
| 2.5.2. Elementos fletidos ou vigas | 20 |
| O cálculo dessas tensões é efetuado com o auxílio da equação .. | 22 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS..... | 29 |
| 3.1. Madeira..... | 29 |
| 3.1.1. Caracterização da madeira..... | 30 |
| 3.1.1.1. Dimensões da madeira..... | 30 |

| | Página |
|---|--------|
| 3.1.1.2. Módulo de elasticidade em flexão e seleção das tábuas a serem utilizadas na confecção dos elementos estruturais..... | 35 |
| 3.1.1.3. Determinação da resistência à compressão e da densidade da madeira | 36 |
| 3.1.1.3.1. Determinação da resistência à compressão..... | 37 |
| 3.1.1.3.2. Determinação da densidade | 40 |
| 3.2. Adesivo..... | 42 |
| 3.3. Confecção dos elementos estruturais | 43 |
| 3.4. Testes dos elementos estruturais | 46 |
| 3.4.1. Compressão..... | 46 |
| 3.4.2. Flexão estática | 47 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 49 |
| 4.1. Compressão axial dos elementos | 49 |
| 4.2. Flexão biapoiada com aplicação de carga no centro do vão | 51 |
| 4.2.1. Módulo de ruptura, módulo de elasticidade em flexão e carga em L/350..... | 51 |
| 4.2.2. Cisalhamento | 52 |
| 5. RESUMO E CONCLUSÕES..... | 57 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 58 |

EXTRATO

ABRAHÃO, Christovão Pereira, M.S., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2001. **Efeito da redução da área colada no comportamento mecânico de vigas e colunas de madeira laminada de *Eucalyptus grandis***. Orientador: Ricardo Marius Della Lucia. Conselheiros: Benedito Rocha Vital e Alexandre Santos Pereira.

O presente trabalho teve como objetivo investigar a possibilidade de se reduzir a quantidade de adesivo consumida na confecção de madeira laminada colada (MLC), valendo-se do conhecimento da variação das tensões cisalhantes no perfil de um elemento estrutural sob flexão. Foram construídos elementos em MLC, constituídos por três camadas de madeira coladas com resina resorcinol-formaldeído. Variou-se a área das faces das lâminas de madeira que recebeu adesivo. A camada central de alguns elementos constituindo-se de uma lâmina contínua, e a de outros, de lâminas de menor comprimento acomodadas e coladas sem nenhum tipo de emenda longitudinal. Os elementos estruturais assim compostos foram submetidos a testes de compressão axial e flexão estática, a fim de determinar a carga de flambagem, o módulo de elasticidade em flexão, o módulo de ruptura e o regime de fratura por ocasião da ruptura sob flexão. Testes de médias não detectaram diferenças significativas nas propriedades mecânicas

entre os tratamentos. O regime de fratura no tratamento em que apenas 10% da área era colada foi o de cisalhamento paralelo, como previsto no dimensionamento. Nos demais tratamentos, observaram-se falhas de tração e compressão.

ABSTRACT

ABRAHÃO, Christovão Pereira, M.S., Universidade Federal de Viçosa, May 2001. **The effect of glued area reduction on the mechanical properties of *Eucalyptus grandis* glulam beams and columns.** Adviser: Ricardo Marius Della Lucia. Committee Members: Benedito Rocha Vital and Alexandre Santos Pereira.

This study was developed to investigate the possibility of reducing glue consumption during the production of glued laminated timber (GLULAM). The analysis was based on known principles of shear stress distribution in the section of a member under bending. Three-ply glulam elements were built using a resorcinol/formaldehyde glue. The area occupied by glue on the faces of the plies was varied from treatment to treatment. The central ply consisted of a single piece of lumber; the outside plies were made of two or three pieces without any type of longitudinal joint and glued to the central ply. The elements produced in such a fashion were then submitted to axial compression or to bending to obtain buckling load, stiffness and load to rupture in bending and fracture mode, also in bending. There was no significant differences among treatments in the mean values of the mechanical properties. The treatment in which only 10% of the area between plies received glue showed a rupture by longitudinal shear at glue-line,

as predicted by the theory. All the other elements that used more glue suffered either compression or tension failures.

1. INTRODUÇÃO

A racionalização do uso da matéria-prima madeira tem sido de grande ressonância nos dias de hoje no Brasil e em todo o mundo. O movimento por maior tecnificação no uso desse material é, certamente, impulsionado por questões de ordem econômica e ambiental, pois, à medida que as reservas florestais naturais são esgotadas e são degradados os ecossistemas primitivos, escasseia-se a oferta de madeiras nobres, com conseqüente elevação de seus preços.

O uso de madeira proveniente de reflorestamentos de *Eucalyptus* spp. de ciclos curtos se apresentaria como uma solução ambiental e economicamente correta para a escassez de madeiras nobres. Entretanto, os quesitos de qualidade para o uso na forma de produtos sólidos não são prontamente cumpridos quando se pretende produzir madeira de *Eucalyptus* spp. em ciclos curtos. Toras de pequeno diâmetro, ao serem serradas, revelam uma série de defeitos relacionados às tensões de crescimento, ao elevado percentual de madeira juvenil e ao grande número de nós. Como resultado desses problemas, obtêm-se peças serradas com excessivos gretamentos, empenamentos e nós fixos e soltos, o que acarreta baixos rendimento e qualidade em serraria (PONCE, 1993).

Esses problemas têm ainda limitado a utilização da madeira serrada de eucalipto, apesar dos recentes avanços tecnológicos dos processos de serragem e secagem dessa madeira (WAUGH, 1998).

Enquanto não há no mercado estirpes de eucaliptos geneticamente melhorados para uso em serraria, devem-se procurar soluções tecnológicas para o beneficiamento da madeira hoje disponível.

Uma solução para o melhor aproveitamento de peças defeituosas está no conceito de madeira laminada colada (MLC). Este derivado da madeira se utiliza do artifício da distribuição estratégica das várias lâminas que o compõem. Obtêm-se, assim, elementos de comportamento mecânico previsível e otimizado.

No entanto, a produção criteriosa de madeira laminada colada requer suporte técnico bastante sofisticado para os padrões nacionais tradicionais de utilização da madeira. Desde a preparação e classificação das lâminas de madeira até a execução de uma obra civil em MLC, passando pela fabricação propriamente dita e pela elaboração dos projetos dos elementos estruturais, é requerida a observação de critérios rígidos e o emprego de equipamentos e mão-de-obra especializada.

Muitos países desenvolvidos aplicam essa tecnologia com sucesso, e nada impede que os brasileiros também o possam fazer, considerando-se o seu imenso mercado interno e a disponibilidade de matéria-prima. Estima-se que, no Brasil, 76% dos telhados das construções, em geral, se utilizam de estruturas de madeira (SOUSA, 1995). Na América do Norte, 90% das casas de um ou dois pavimentos de famílias de classe média são construídas tendo a madeira como o principal material de construção (MÉNARD, 1998).

Segundo LIMA (1994), apesar do complexo processo de fabricação de MLC, o adesivo pode ser responsável por até 60% dos custos de produção. Os altos custos dos adesivos estruturais estão ligados à produção do resorcinol, que é o principal componente utilizado (PIZZI, 1994). Este fato vem despertando a atenção de alguns pesquisadores, que têm se empenhado no desenvolvimento de adesivos mais baratos e eficientes.

Uma outra maneira de se abordar o problema dos altos custos dos adesivos seria a redução da quantidade aplicada. Diluições e aplicação de menos adesivo por área a ser colada do que a quantidade recomendada pelos fabricantes parecem sendas bastante temerosas. A mistura de adesivos se apresenta como

uma solução mais prudente. PIMENTA (1995) produziu adesivos com propriedades similares aos convencionais à base de fenol-formaldeído, em formulações em que o fenol era parcialmente substituído por creosoto e alcatrão de eucalipto, substâncias que são subprodutos da carbonização da madeira.

Entretanto, uma rápida análise na variação das tensões de cisalhamento desenvolvidas no plano das linhas de cola em um elemento estrutural de MLC sob carga sugere um outro tipo de enfoque para a economia de adesivo: a redução da área colada naquelas regiões onde as tensões cisalhantes são menores.

Este trabalho teve por objetivos construir e testar, para comprovação experimental da teoria de distribuição das tensões cisalhantes, vigas e colunas em MLC, promovendo-se a redução, em vários níveis, da área das faces das lâminas que irá receber o adesivo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. A madeira laminada colada

A madeira laminada colada (MLC, e em inglês abreviado como "glulam") é um dos mais antigos produtos derivados da madeira. É definida na norma norte-americana *ASTM D3737, Standard Method for Establishing Stresses for Structural Glued-laminated Timber (Glulam)* como "um material em que são coladas peças de madeira selecionadas com características apropriadas, tanto na forma reta como curva, com a grã das peças essencialmente paralela ao eixo longitudinal do membro" (ASTM, 1992). O produto madeira laminada colada, que sempre deve ser classificado mecanicamente, consiste de duas ou mais camadas de madeira chamadas lâminas, unidas por adesivos. A espessura máxima das lâminas permitida nos Estados Unidos da América, pela norma *ANSI/AITC A190.1 American National Standard for Woods Products - Structural Glued-laminated Timber*, é de 2 polegadas (AITC, 1992). A norma ANSI/AITC A190.1 requer que a MLC seja produzida em fábricas aprovadas por inspetores de agências independentes credenciadas.

Colando-se peças de madeira longitudinalmente, lateralmente ou em camadas subjacentes, as dimensões de um elemento estrutural em MLC ficam limitadas apenas pela capacidade de produção da fábrica e pelas restrições do meio de transporte que será utilizado para o seu deslocamento.

Várias espécies e combinações de espécies são utilizadas nos Estados Unidos da América para a confecção de elementos em MLC. Combinações de espécies podem ser utilizadas para melhorar as propriedades mecânicas dos elementos produzidos. Os padrões correntes da indústria norte-americana consideram o uso de muitas coníferas (AITC, 1993a; AITC, 1993b) e folhosas (AITC, 1995) e recomendam suas aplicações de forma localizada, ou seja, pode-se utilizar uma outra espécie dentro de um elemento, onde for necessário (ASTM, 1992).

2.2. Vantagens e desvantagens da madeira laminada colada

Quando comparada à madeira serrada, bem como a outros materiais estruturais, a MLC apresenta uma série de vantagens. Outras características de uso e confecção podem ser consideradas como desvantagens. Seguem-se algumas das características tomadas como positivas e outras ditas negativas da MLC, segundo MOODY (1997) e F.P.L (1987).

Características tomadas como positivas:

a) Possibilidade de confecção de elementos estruturais de grandes dimensões a partir de madeira serrada de dimensões comerciais, o que vai de encontro à realidade futura do mercado de madeiras, com crescente utilização de madeiras de reflorestamento serradas precocemente, resultando em peças de pequenas bitolas.

b) Possibilidade de obtenção de excelentes e originais efeitos arquitetais com a aplicação de peças curvilíneas que podem assumir as mais variadas formas.

c) Possibilidade de se minimizar o aparecimento de rachaduras e outros defeitos de secagem associados ao emprego de peças maciças de madeira serrada de grandes dimensões, já que na MLC as lâminas são delgadas e devem ser previamente secas antes da confecção dos elementos estruturais.

d) Possibilidade de projetar estruturas com base em valores de resistência e rigidez para a madeira seca, o que leva à utilização mais racional das propriedades do material, garantindo a sua economia.

e) Possibilidade de se impor variações às seções transversais dos elementos ao longo de seus comprimentos. Essa maleabilidade se revela mais um fator de economia de material e de redução de peso próprio das estruturas, pois diferentes regiões dos elementos podem apresentar diferentes requerimentos de rigidez e resistência segundo a sua aplicação. Por exemplo, a seção das regiões de apoio de uma viga pode ser aumentada em razão das tensões elevadas nesses locais.

f) Possibilidade de utilizar lâminas de baixas classes de qualidade, aplicando-as onde as tensões também são baixas, sem trazer nenhum tipo de efeito adverso para o comportamento mecânico das estruturas.

g) Somente o fato de se utilizar a madeira como material de construção é uma vantagem do ponto de vista ambiental para a MLC. Muitas discussões têm sido travadas, nas quais são comparados os impactos ambientais do uso da madeira, do aço, do alumínio, do concreto e de outros materiais estruturais. Conclui-se que o caráter renovável e reciclável da madeira, o baixo consumo de energia para a sua produção e seu beneficiamento e a sua inerente capacidade de armazenamento de carbono são argumentos que a colocam em uma posição privilegiada diante de qualquer outro material de construção. Apesar de os fatores estéticos e econômicos serem os maiores determinantes da escolha de um material de construção, as vantagens ambientais têm assumido influência crescente nesta escolha (BOWYER, 1995; FCCWB, 1991; JAHN, 1976; KOCH, 1992).

A seguir, algumas características que podem ser tomadas como negativas, ainda segundo MOODY (1997) e F.P.L (1987):

a) A preparação da madeira para a adesão, bem como a operação de adesão propriamente dita, traz custos adicionais ao produto final (MLC), o que pode elevar seus preços acima daqueles normalmente encontrados em peças com as mesmas dimensões e disponíveis no mercado.

b) A resistência dos elementos estruturais em MLC está crucialmente relacionada à qualidade da adesão entre suas lâminas. Para que se possa garantir esta qualidade, é necessária uma série de equipamentos e requerimentos de mão-de-obra especializada, pois as operações de beneficiamento da madeira para a produção de MLC exigem cuidados extras, se comparadas à madeira simplesmente serrada.

c) Os grandes elementos estruturais em MLC são de difícil manuseio e transporte, exigindo que a fabricação de alguns componentes seja feita próximo ao canteiro de obras.

2.3. Histórico da madeira laminada colada

A madeira laminada colada foi empregada pela primeira vez no final do século passado, mais precisamente em 1893, na cidade de Basel, na Suíça, em arcos laminados para a construção de um auditório. Provavelmente foi utilizado um adesivo à base de caseína, que, para os padrões atuais, não é à prova d'água e deve ter seu uso limitado a locais livres de umidade (MOODY, 1997).

Nos Estados Unidos da América, um dos primeiros exemplos de uso da MLC onde foram aplicados princípios da engenharia de estruturas está numa construção erguida em 1934 para abrigar dependências do Laboratório de Produtos Florestais em Madison, Wisconsin. Os arcos laminados utilizados nessa construção e em muitas outras da mesma época foram produzidos por uma companhia em Peshtigo, Wisconsin, a qual foi fundada por um imigrante alemão, que foi o responsável pela transferência dessa tecnologia aos americanos. Muitas outras fábricas de MLC se estabeleceram nos EUA desde os anos 30 (MOODY, 1997).

Com a evolução da tecnologia dos adesivos à base de resinas sintéticas, que sofreu grande impulsão durante a Segunda Guerra Mundial, as estruturas em MLC obtiveram maior confiabilidade e seu campo de aplicação também foi ampliado. Adesivos à prova d'água possibilitaram a aplicação dessas estruturas em condições de serviço mais severas, como pontes e construções marítimas.

Atualmente, há várias empresas importantes na área da construção civil no mundo que utilizam o conceito de MLC. A cada dia são desenvolvidos projetos de arquitetura arrojados e com destinações diversas, desde residências até grandes ginásios, fábricas, hangares, etc.

Segundo SZÜCS et al. (1992), a França é um país que hoje se destaca no emprego estrutural da MLC, tendo como suporte um amplo programa de reflorestamento iniciado no período pós-guerra.

No Brasil, apesar de seu grande potencial florestal, não se encontra com facilidade construções em MLC. Tem-se notícia de poucas e pequenas fábricas que se ocupam integralmente da confecção desse tipo de estrutura. Entretanto, o meio acadêmico brasileiro tem se mostrado inclinado ao desenvolvimento de investigações que levem ao domínio e à adaptação de tecnologias, com trabalhos sendo desenvolvidos na Universidade Federal de Santa Catarina, Universidade Federal de Minas Gerais (LIMA, 1994), Universidade de São Paulo (São Carlos) e, mais recentemente, na Universidade Federal de Viçosa.

2.4. A confecção do laminado colado

A confecção de estruturas em madeira laminada colada deve seguir padrões estabelecidos por órgãos competentes. Infelizmente, no Brasil, devido à incipiência da utilização de tal técnica construtiva, não existem ainda normas técnicas tratando detalhadamente do assunto. A norma NBR 7190 (ABNT, 1951), versão mais recente da referência nacional para construções de madeira, apenas cita que, para o emprego da madeira laminada colada, devem-se admitir para ela as mesmas propriedades da madeira das lâminas. Adicionalmente, devem ser realizados os seguintes ensaios específicos:

- a) resistência ao cisalhamento na lâmina de cola;
- b) resistência à tração da lâmina de cola; e
- c) resistência das emendas longitudinais dentadas e biseladas.

De forma geral, a eficiência de um elemento estrutural em MLC está diretamente relacionada com a qualidade da madeira empregada e com a qualidade do processo de adesão de suas lâminas.

A norma norte-americana ANSI/AITC A190.1 adota uma abordagem em dois estágios para a inspeção do processo de confecção de MLC. Primeiramente, uma agência independente credenciada realiza uma rigorosa verificação das condições gerais da fábrica, avaliando equipamentos e qualificação da mão-de-obra. No segundo estágio, critérios e procedimentos diários de segurança são estabelecidos para cada fase do processo. Normalmente, um funcionário é designado para a função de supervisor de qualidade, sendo quem faz as inspeções e os testes diários. Visitas esporádicas não anunciadas são realizadas pelas agências independentes credenciadas, quando são examinados os produtos acabados e os registros diários de controle de qualidade.

O processo de fabricação de elementos estruturais em madeira laminada colada consiste de quatro fases:

- a) secagem e classificação da madeira;
- b) realização das emendas longitudinais nas lâminas;
- c) adesão das lâminas em camadas superpostas; e
- d) acabamento.

Uma quinta fase, relacionada ao tratamento preservativo, deve ser incluída quando os elementos serão submetidos a condições de alta umidade ou ao uso exterior. A proteção final contra absorção de umidade e danos superficiais durante o transporte, armazenamento e manuseio das peças é muito importante.

2.4.1. Secagem e classificação da madeira

A fim de evitar variações dimensionais após a confecção dos elementos estruturais, bem como para utilizar valores mais elevados nas tensões admissíveis, é bastante crítico que a madeira seja criteriosamente seca. Essa secagem normalmente é feita em estufas. Para a maioria das aplicações, o teor de umidade máximo nas lâminas admitido pela norma ANSI/AITC A190.1 é de 16%, com

teor médio para o elemento por elas composto de 12%. Adicionalmente, não é permitida variação maior que cinco pontos percentuais entre lâminas, o que minimiza os riscos de variações dimensionais muito diferenciadas entre as várias camadas aderidas.

Algumas fábricas americanas somente utilizam a madeira seca a 12% de umidade por duas razões básicas. Primeiro, porque a realização das emendas longitudinais é dificultada em teores mais elevados, quando se utilizam métodos de cura baseados em aquecimento por radiofrequência. Em segundo lugar, 12% é o teor de umidade no equilíbrio higroscópico na maioria das regiões dos Estados Unidos, o que confere estabilidade dimensional à MLC confeccionada com este teor e tendo que ser transportada para outras localidades.

O teor de umidade médio do suprimento de madeira durante a confecção dos elementos estruturais em MLC pode ser determinado em amostragens aleatórias com o auxílio de um medidor de umidade manual. Alternativamente, algumas empresas utilizam sistemas contínuos de medição de umidade, nos quais todas as lâminas são avaliadas, e aquelas que não se enquadram na conformidade são retiradas da linha de produção e encaminhadas ao secador.

Normas para a classificação de madeiras são publicadas por associações regionais e internacionais que levam em consideração critérios como características naturais do material (nós, alinhamento da grã, etc.) e defeitos de processamento (dimensões, etc.) para a segregação das peças em categorias de qualidade (SPIB, 1994; WWPA, 1991).

Normas para a confecção de MLC, como a *AITC 117 - Manufacturing Standard Specification for Structural Glued-Laminated Timber of Softwood Species*, descrevem combinações de madeiras de diferentes categorias de qualidade para a obtenção de específicos valores de tensões admissíveis (AITC, 1993b).

Dois tipos de classificação da madeira são utilizados na segregação das lâminas para a produção de MLC: a classificação visual e a classificação mecânica. As regras para a classificação visual são inteiramente baseadas naquelas características que são prontamente aparentes nas peças. As normas indicam

valores-limites para características que interferem na resistência da madeira (diâmetro dos nós, ângulos de grã, esmoados) para inclusão de uma peça em uma ou outra classe de qualidade.

Para a norma *Western Lumber Grading Rules* (WWPA, 1991), por exemplo, o tamanho dos nós é limitado em 1/4 da largura da lâmina, na chamada classe L1; em 1/3 da largura, na classe L2; e na metade da largura, nas lâminas que receberão a terminologia L3.

Na classificação mecânica, os módulos de elasticidade das peças de madeira são determinados por um método não-destrutivo. Sabe-se que há uma relação direta entre o módulo de elasticidade de uma peça de madeira e a sua resistência, o que permite prognósticos baseados em modelos estatísticos (FPL, 1987; SUNLEY, 1974; SIEMON, 1978). Em seguida, as lâminas de rigidez conhecida são submetidas a uma inspeção visual para a verificação do enquadramento nos critérios relativos aos nós de borda. Somente após essa avaliação visual a peça recebe sua classificação definitiva, que será, na verdade, uma combinação dos dois métodos. Uma lâmina que, por exemplo, é classificada como “2.0E-1/6” possui um módulo de elasticidade de 2 milhões de psi e apresenta um nó de borda de diâmetro não superior a 1/6 de sua largura.

Os fabricantes de MLC normalmente compram a madeira previamente classificada e verificam a classificação através de inspeção visual ou testes de rigidez. Uma nova classificação às vezes é conduzida na fábrica, quando se deseja otimizar o uso do material, designando as peças de excepcional rigidez para as regiões dos elementos estruturais que serão submetidas às maiores tensões.

Em uma viga laminada, por exemplo, lâminas com alta resistência à tração são requeridas na zona tracionada, ou seja, naquelas camadas superficiais do lado tornado convexo quando o elemento se encontra sob flexão. Critérios especiais para a classificação de lâminas que serão designadas para a região tracionada são ditados pela norma *AITC 117 - Manufacturing*. Existe a possibilidade de o fabricante de MLC comprar lotes de madeira especialmente preparada, sob sistemas de controle de qualidade, que garantam a resistência à tração, pois sabe-se que a presença de nós e outros defeitos exerce mais

influência nessa propriedade. Uma outra alternativa para obter altas *performances* nas regiões tracionadas é a utilização de camadas de LVL, derivado da madeira tipicamente rígido e resistente à tração.

Recentemente, alguns fabricantes de MLC têm utilizado a madeira em combinação com compostos fibroplásticos altamente resistentes, como a fibra de vidro embebida em resinas sintéticas, com o objetivo de se aumentar a resistência dos elementos estruturais. Conseguem-se reduções de até 30% no volume de madeira com a aplicação dessa técnica, obtendo-se membros mais leves para a mesma resistência.

2.4.2. Emendas longitudinais

Para a confecção de elementos estruturais em MLC de comprimentos superiores àqueles das peças de madeira serrada normalmente disponíveis no mercado, procede-se à realização de emendas longitudinais. O tipo mais comum são as emendas dentadas estruturais (*structural finger joint*), com dentes de 3,75 cm de comprimento. Outros tipos de emendas são aceitáveis, desde que cumpram requerimentos de resistência e durabilidade. Uma vantagem das emendas dentadas em relação às biseladas, por exemplo, é a menor perda de comprimento no material original quando da sua confecção. As emendas dentadas são também de fácil realização em processos que utilizam equipamentos de produção contínua.

A qualidade das emendas longitudinais é crítica para se garantir uma *performance* adequada da MLC em serviço. Um controle minucioso das várias etapas de produção dessas emendas (qualidade da madeira, produção dos encaixes, aplicação do adesivo, translocação das peças, aplicação da pressão longitudinal e cura do adesivo) deve ser realizado.

Antes da confecção das emendas longitudinais, as extremidades das peças a serem unidas devem ser inspecionadas, para garantir a ausência de nós e outros defeitos que possam prejudicar a eficiência da ligação. Os encaixes são produzidos com uma ferramenta especial em ambas as peças a serem unidas. Um

adesivo estrutural (de alta resistência mecânica e à prova d'água) é então aplicado, e, até a sua completa cura, a junta deve ser mantida sob pressão. É comum o uso de radiofrequência para acelerar a cura do adesivo.

Emendas dentadas podem garantir uma recuperação de até 75% da resistência à tração da madeira livre de defeitos. Considerando-se que a madeira utilizada pelos fabricantes de MLC pode conter defeitos que levem à redução de até 25% da sua resistência à tração, em relação à madeira livre de defeitos, a utilização de emendas dentadas é perfeitamente aceitável.

A norma ANSI/AITC A190.1 requer a qualificação do processo de produção de emendas longitudinais. Para verificação da conformidade das juntas, são realizados testes diários de resistência nas linhas de produção das fábricas. A durabilidade das ligações também deve ser garantida, o que é verificado através de testes nos quais as amostras são submetidas a ciclos repetidos de umedecimento e secagem.

Um contínuo desafio na produção de MLC tem sido a detecção e eliminação de emendas longitudinais de baixa resistência. A inspeção visual e outros métodos não-destrutivos não têm se mostrado eficazes. Testes de carga, nos quais as lâminas que serão destinadas ao lado tracionado dos elementos são submetidas a tensões similares àsquelas previstas quando em serviço, têm logrado melhores resultados. No entanto, os testes de carga podem danificar as lâminas, o que leva às restrições de seu uso impostas pelas agências de credenciamento.

2.4.3. Adesão das lâminas em camadas superpostas

A união das camadas de lâminas que irão compor o elemento estrutural é outro estágio crítico na fabricação de MLC. A determinação de adesivos e procedimentos que garantam a resistência ao cisalhamento da linha de cola entre camadas é realizada na fase inicial da qualificação da fábrica.

Normalmente, uma fábrica de MLC deve possuir certa flexibilidade no que diz respeito a procedimentos e adesivos que podem ser adequados aos requerimentos de durabilidade e resistência da linha de cola de variadas espécies de madeira.

Para obtenção de superfícies planas, paralelas e suscetíveis de serem bem aderidas, as peças de madeira devem ser trabalhadas, preferencialmente, em plainas mecânicas somente alguns instantes antes de serem encaminhadas à prensa. Isto garantirá superfícies livres de impurezas e geometricamente adequadas para a distribuição uniforme da pressão a ser aplicada. O adesivo é espalhado normalmente por extrusores devidamente calibrados.

Os adesivos mais utilizados na confecção de MLC contêm resinas à base de fenol-resorcinol-formaldeído; entretanto, outras formulações que apresentem os requerimentos de resistência e durabilidade exigidos podem ser empregadas.

Espalhado o adesivo, as lâminas são então sobrepostas segundo suas propriedades mecânicas, para compor o membro como projetado. Vigas retas podem ou não ser construídas com abaulamento transversal. Camadas com larguras maiores podem ser produzidas dispendo-se lado a lado peças mais estreitas, desde que as emendas longitudinais em lâminas adjacentes não estejam na mesma seção.

Lâminas que comporão membros curvos ou arcos devem ser prensadas até a cura do adesivo em formas curvas que definirão o perfil desejado. O grau de curvatura é controlado pela espessura das lâminas. Em geral, o raio de curvatura é limitado entre 100 e 125 vezes a espessura das lâminas. Assim, pequenas curvaturas somente serão possíveis se utilizadas lâminas com 5 cm de espessura. Quando são necessárias curvaturas moderadas, empregam-se lâminas de 2,5 cm, enquanto lâminas de 0,75 cm ou menos podem ser utilizadas em curvaturas mais acentuadas.

Após um tempo inicial necessário para a penetração do adesivo na madeira, é então aplicada a pressão. Esse tempo de espera, bem como a pressão a ser aplicada, varia segundo o adesivo, a temperatura ambiente e a espécie de madeira. Os métodos mais comuns de aplicação de pressão baseiam-se em prensas mecânicas ou hidráulicas. Esse tipo de prensa leva a uma produção intermitente, ou seja, bateladas são retiradas a cada 6 ou 24 horas, dependendo da temperatura ambiente. Somente algumas poucas fábricas se utilizam de modernos sistemas de produção que combinam a prensagem hidráulica com a cura do adesivo induzida

por radiofrequência, o que reduz para minutos o tempo para se completar o processo. A cura do adesivo continuará lentamente, até se completar em poucos dias após a prensagem.

O processo de colagem das lâminas em camadas superpostas deve ser monitorado desde o aplainamento da madeira, a mistura e a aplicação do adesivo até a prensagem e cura do adesivo. A qualidade das juntas coladas é avaliada em testes de cisalhamento realizados em pequenas amostras retiradas das extremidades dos elementos em MLC acabados. A norma ANSI/AITC A190.1 preconiza que a resistência ao cisalhamento nessas pequenas amostras deve ser igual a 90% da resistência média ao cisalhamento da madeira utilizada.

2.4.4. Acabamento

Depois que os elementos em MLC são retirados da prensa, as suas laterais são aplainadas ou lixadas, para remoção do excesso de adesivo que possa ter sido expulso das interfaces das lâminas. Essa operação causa pequena redução na largura do elemento, o que deve ser previsto. As primeiras e as últimas lâminas dos elementos podem também ser ligeiramente aplainadas ou lixadas, conforme os requerimentos de aparência desejados. As quinas podem ser arredondadas.

As especificações de aparência ditam as operações de acabamento adicionais necessárias nessa fase da fabricação, porém não devem afetar a resistência e a rigidez dos elementos. Três classes de aparência são adotadas como padrões pela indústria norte-americana de MLC: Industrial, Arquitetônica e “Premium” (AITC, 1984b). A classe Industrial é utilizada quando a aparência não é uma exigência primordial, como em galpões de fábricas e armazéns. A classe Arquitetônica é empregada quando a aparência é um importante requerimento. Já a classe “Premium” é a de mais alto refinamento na aparência. A principal diferença entre as classes de aparência está nos números de orifícios dos nós soltos e marcas acidentais de aparelhamento (plainas e lixas) permitidos. As classes mais altas requerem atenção adicional no fechamento dos orifícios e

uniformização das superfícies das faces, o que, naturalmente, implica custos adicionais.

A indústria de MLC tem considerado a adição de uma quarta classe de aparência, chamada “Framing”. Enquanto as três classes anteriores podem resultar em elementos com larguras diferentes das bitolas comerciais das madeiras para construção, a classe “Framing” se preocuparia justamente em manter as dimensões padronizadas, fornecendo um material de uso compatível com a madeira maciça disponível no mercado; no entanto, sua aparência é inferior e sua aplicação deve se restringir a locais discretos. Outro tipo de aparência é obtido pela resserragem das peças de MLC, operação que resulta em superfícies com variados desenhos (MOODY, 1997).

Um último passo no processo de fabricação de MLC seria a preparação dos elementos estruturais para a sua montagem. Aqui são feitos os cortes finais, furos e encaixes, adicionados acessórios, como conectores, e, se especificado, aplicados selantes ou outros acabamentos. Dependendo do caso, pré-montagens são realizadas neste ponto. Treliças podem ser parcial ou totalmente montadas. A aplicação de seladores, vernizes e outros acabamentos resistentes à umidade ajuda a evitar variações dimensionais entre a fabricação e a instalação.

2.4.5. Tratamentos preservativos

Quando um elemento em MLC tiver seu teor de umidade sob serviço próximo ou acima de 20%, ele próprio ou, anteriormente, a sua madeira constituinte devem ser preservados contra o ataque de organismos xilófagos. A norma norte-americana *AITC 109 Standard for Preservative Treatment of Structural Glued-Laminated Timber* (AITC, 1990) trata do assunto com detalhes, como os níveis de retenção adequados para cada tipo de preservativo.

Três tipos de substâncias preservantes são comumente empregados no tratamento de MLC: preservantes à base de creosoto, preservantes oleossolúveis e preservantes hidrossolúveis. Todos os tipos dificultam a adesão da madeira. Os tratamentos que empregam o creosoto e os oleossolúveis devem ser realizados

após completado o processo de fabricação, ou seja, depois que os elementos estruturais em MLC já estiverem prontos para a sua instalação, com os orifícios e encaixes feitos. Por outro lado, os hidrossolúveis podem causar excessivas variações dimensionais e prejudicar a segurança das linhas de cola, devendo ser aplicados na madeira antes da produção das lâminas (AWPA, 1995b).

O tratamento à base de creosoto é indicado para as mais severas condições de serviço, conferindo excelente proteção contra fungos, insetos e teredos (brocas marinhas), quando usados em pontes, barcos e estruturas marinhas. A madeira tratada com creosoto apresenta sua superfície escurecida e oleosa, o que dificulta a sua alteração pelos organismos. Este fato, aliado ao odor característico, restringe seu uso a estruturas não-residenciais e locais onde não há contato direto com o homem. No entanto, a sua repelência à umidade torna a madeira menos suscetível a mudanças bruscas no teor de umidade, o que evita o aparecimento de rachaduras superficiais que podem acelerar a deterioração.

A MLC pode ser tratada com pentaclorofenol dissolvido em óleos densos, fornecendo superfícies que não aceitam pinturas ou acabamentos afins; em hidrocarbonetos mais leves, fornecendo superfícies que podem ser pintadas; ou, ainda, em outros solventes listados em *P9 Standards for Solvents and Formulations for Organic Preservative Systems* (AWPA, 1995a). Os tratamentos à base de pentaclorofenol também proporcionam repelência à umidade e proteção contra fungos e insetos xilófagos, mas não contra os teredos, por isso ela é mais indicada para estruturas de madeira em contato com a água doce. Outros preservantes oleossolúveis usados em MLC são à base de naftenato de cobre e cobre-8-quinolinolato, os únicos aprovados para uso em produtos de madeira que venham a ter contato com utensílios domésticos.

Nos Estados Unidos da América, tratamentos à base de produtos hidrossolúveis devem ser conduzidos segundo a *P5 Standards for Waterborne Preservatives* (AWPA, 1995c). O grau de proteção contra o ataque de organismos xilófagos conferido por esse tipo de tratamento está relacionado à profundidade de penetração dos produtos preservantes na madeira, o que, por sua vez, é dependente da espécie a ser tratada. Procedimentos especiais são exigidos

para fábricas de MLC que utilizam madeira tratada com hidrossolúveis para garantir os critérios de durabilidade e resistência da linha de cola.

A principal vantagem dos tratamentos com preservantes hidrosolúveis é que eles resultam em superfícies de fácil acabamento. A aparência da madeira tratada por si só imita pinturas em tons de verde, cinza ou marrom. Um cuidado especial deve ser tomado na escolha dos acessórios de metal que estarão em contato com a madeira tratada, pois os sais empregados podem ser corrosivos. Outro ponto negativo no uso de hidrossolúveis é o fato de que a madeira assim tratada é mais suscetível a variações dimensionais devidas à higroscopicidade que quando se empregam produtos oleossolúveis.

Como todos os produtos de madeira, a MLC é combustível. Entretanto, devido às grandes seções transversais usuais e às baixas taxas de carbonização das superfícies, elementos estruturais em MLC expostos ao fogo são capazes de suportar cargas por períodos substancialmente mais longos que outros materiais (LIMA, 1994; MOODY, 1997). Pode-se aumentar o tempo de resistência às chamas utilizando-se lâminas de alta resistência à tração recobrando o elemento. A aplicação de produtos retardantes de chamas, superficialmente ou sob pressão, também é possível.

2.5. Projetos de vigas e colunas

2.5.1. Elementos comprimidos ou colunas

O projeto de elementos comprimidos, segundo RAMMER e SOLTIS (1994) e a norma brasileira NBr-710 (ABNT, 1951), deve levar em consideração basicamente a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do material, as dimensões da seção transversal e a relação entre a menor dimensão da seção e o comprimento de flambagem, que é o comprimento livre do elemento. Também são importantes os graus de liberdade das extremidades, ou seja, se há engastamento ou articulações nesses pontos.

Os elementos comprimidos são classificados em colunas curtas, colunas intermediárias e colunas longas, segundo o seu índice de esbeltez ou esbelteza.

Em elementos de seção transversal retangular, o índice de esbeltez é calculado pela expressão

$$\lambda = 3,46 L/d$$

em que

λ = índice de esbeltez;

L = comprimento de flambagem; e

d = menor dimensão da seção transversal.

As colunas curtas são aquelas em que λ é menor que 40. Neste caso, a carga admissível de compressão nestes elementos é calculada por

$$\frac{P}{A} \leq 0,2 \cdot \sigma_c$$

em que

P = carga axial;

A = área da seção transversal; e

σ_c = resistência à compressão axial da madeira determinada experimentalmente que, aqui, se encontra multiplicada pelos vários coeficientes de segurança que devem ser considerados (0,2), resultando na chamada tensão admissível de compressão.

Para o cálculo das cargas a serem suportadas pelas colunas intermediárias, aquelas em que $\lambda_o \geq \lambda \geq 40$, tem-se

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{3 \cdot \pi \cdot E}{8 \cdot 0,2 \cdot \sigma_c}}$$

com E sendo o módulo de elasticidade do material na compressão, lança-se mão de outra inequação:

$$\frac{P}{A} \leq 0,2 \cdot \sigma_c \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{\lambda - 40}{\lambda_o - 40} \right) \right]$$

No cálculo de colunas longas, aquelas em que $\lambda_o \leq \lambda \leq 140$, a expressão utilizada é

$$\frac{P}{A} \leq 0,2 \cdot \sigma_c \cdot \left[\frac{2}{3} \cdot \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^2 \right]$$

Pode-se notar pelas expressões anteriores que, quanto maior a esbelteza da coluna, maior é a redução na resistência à compressão do material para obtenção da tensão admissível. Ou seja, além do coeficiente de segurança de 0,2, que se deve à variabilidade da madeira, à conversão dos resultados dos ensaios de curta duração para carregamentos de longa duração, etc., multiplica-se a resistência por outros fatores de redução devido ao fenômeno da flambagem. Assim, colunas curtas não sofrem influência desse fenômeno, enquanto as intermediárias e as longas o sofrem.

A flambagem é a flexão súbita de um elemento comprimido por ação de uma carga axial. Essa carga de flambagem, também chamada de carga crítica, pode ser calculada com a conhecida fórmula de Euler:

$$N = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L^2}$$

em que

N = carga crítica;

E = módulo de elasticidade;

I = menor momento de inércia; e

L = comprimento de flambagem.

2.5.2. Elementos fletidos ou vigas

O projeto de uma viga deve atender a três critérios básicos: resistência ao cisalhamento longitudinal, resistência à flexão e deformação do eixo longitudinal (RAMMER e SOLTIS, 1994). Para uma viga de seção transversal retangular constante, os critérios acima aumentam de importância naquela ordem, à medida que o vão a ser coberto aumenta (BEER et al., 1996).

Uma viga prismática composta de um material homogêneo e isotrópico e apoiada em dois pontos, ao receber uma carga P no centro do vão (Figura 1), experimentará o desenvolvimento de tensões de compressão na metade superior de sua seção e tensões de tração na metade inferior. Nessas condições ideais, o plano horizontal que passa pelo centro da seção será chamado de superfície neutra, porque as tensões normais (tração e compressão) ali são nulas (Figura 2).

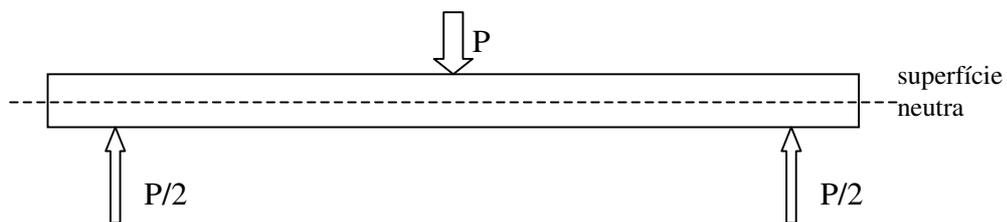


Figura 1 - Vista lateral de uma viga biapoiada recebendo uma carga P .

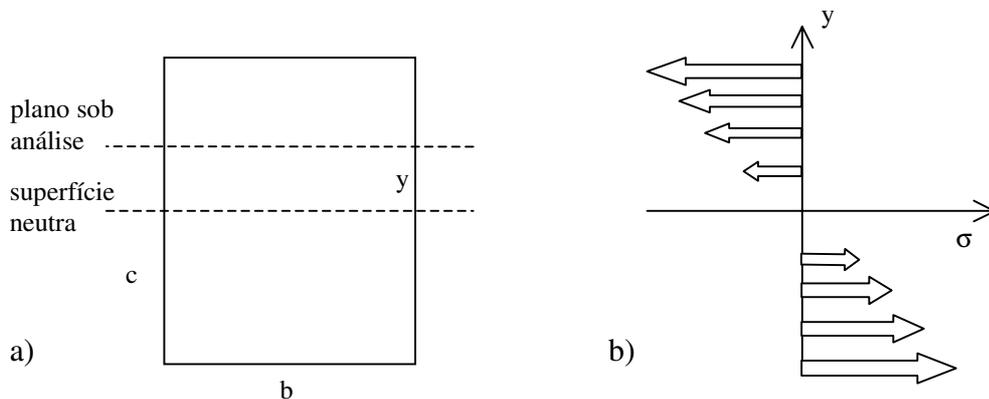


Figura 2 - Distribuição das tensões normais no perfil de uma viga sob flexão. a) corte transversal de uma viga de largura b e altura $h=2c$, mostrando a superfície neutra e um plano qualquer a ela paralelo; b) distribuição das tensões de flexão (σ) em função da posição y .

Para o cálculo das tensões de flexão no regime elástico em um plano da seção transversal separado por uma distância “y” da superfície neutra, faz-se uso da expressão

$$\sigma = \frac{-y}{c} \cdot \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{PL}{b \cdot h^2} \right) \quad (1)$$

em que

σ = tensão de flexão (tração ou compressão no plano em análise);

y = distância vertical da superfície neutra ao plano em análise;

c = metade da altura, h;

h = altura da viga;

b = largura da viga;

P = carga aplicada no centro do vão; e

L = comprimento do vão.

Nota-se que, quando a equação (1) apresenta resultado com sinal negativo, a tensão é de compressão. Isso pode ser verificado para os valores de y maiores que 0, ou seja, quando se calculam as tensões acima da superfície neutra. O contrário é válido para a região abaixo da superfície neutra, onde desenvolvem-se tensões de tração, convencionalmente positivas. Por outro lado, quando $y = c$, ou seja, quando o plano sob análise é o mais exterior e as tensões assumem seus valores máximos, a equação (1) pode ser escrita simplesmente como

$$\sigma_m = \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{PL}{b \cdot h^2} \right) \quad (2)$$

em que σ_m é a tensão máxima de flexão que, naturalmente, no projeto de uma viga, não pode exceder a resistência à flexão, ou, mais precisamente, a tensão admissível do material.

Entretanto, na viga carregada como descrito anteriormente, há também o desenvolvimento de tensões horizontais de cisalhamento no sentido do eixo principal (BEER et al., 1996).

O cálculo dessas tensões é efetuado com o auxílio da equação

$$\sigma = \frac{3 \cdot P}{4 \cdot b \cdot h} \cdot \left(1 - \frac{y^2}{c^2} \right) \quad (3)$$

em que τ é a tensão de cisalhamento em um plano da seção transversal separado por uma distância “y” da superfície neutra. Nota-se que o valor dessa tensão é máximo quando $y = 0$ (na superfície neutra) e que vai decrescendo até se anular nas camadas periféricas da viga (Figura 3).

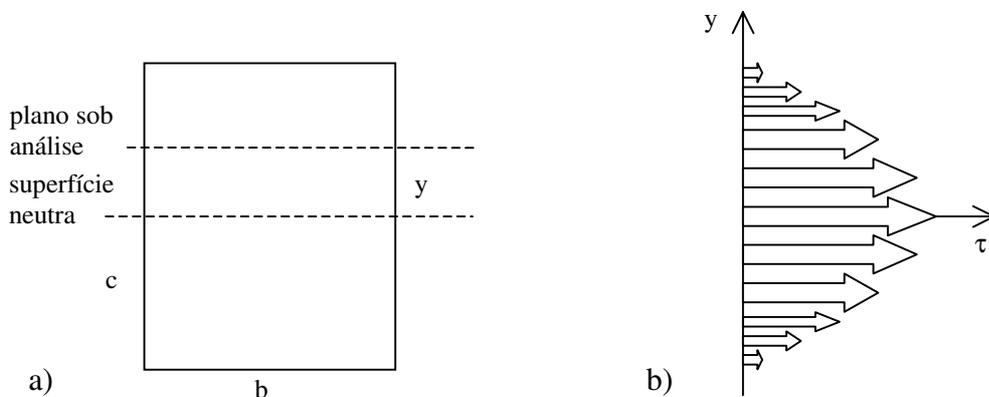


Figura 3 - Distribuição das tensões cisalhantes no perfil de uma viga sob flexão. a) corte transversal de uma viga de largura b e altura $h = 2c$, mostrando a superfície neutra e um plano qualquer a ela paralelo; b) distribuição das tensões de cisalhamento (τ) em função da posição y .

É importante observar que, enquanto a variação das tensões de flexão no perfil da viga é linear, as tensões de cisalhamento obedecem a uma função quadrática.

Para uma viga biapoiada que recebe uma carga P no centro de seu vão L , as tensões de cisalhamento podem ser calculadas em função da tensão máxima de flexão, fazendo-se algumas transformações nas equações.

Da equação (2) tem-se

$$P = \frac{2}{3} \cdot \frac{b \cdot h^2}{L} \cdot \sigma_m$$

que, substituído na equação (3), resulta em

$$\tau = \frac{h \cdot \sigma_m}{2 \cdot L} \cdot \left(1 - \frac{y^2}{c^2} \right) \quad (4)$$

Fazendo-se ainda $R = L/h$ e $r = y/c$ e substituindo na equação (4), obtém-se

$$\tau = \frac{\sigma_m}{2 \cdot R} \cdot (1 - r^2) \quad (5)$$

A equação (5) possibilita o cálculo das tensões de cisalhamento em qualquer posição do perfil de uma viga em função da relação entre a sua altura e o vão que deve cobrir e também da máxima tensão de flexão a que está submetida.

A Figura 4 mostra o comportamento das tensões de cisalhamento para várias relações L/h em uma viga sob uma tensão de flexão de 673 kgf/cm^2 , que é o módulo de ruptura da madeira de *Eucalyptus grandis* utilizada neste trabalho.

Naturalmente, as tensões de cisalhamento não podem exceder a resistência ao cisalhamento do material empregado, que, em termos médios para as madeiras, está em torno de 10% do módulo de ruptura (equação (8)). Este fato justifica o critério de verificação das tensões de cisalhamento para o correto dimensionamento de vigas citado anteriormente. No entanto, a Figura 4 mostra o comportamento teórico de vigas hipotéticas, em que fica clara a relação inversa entre a tensão máxima de cisalhamento e a razão L/h , ou seja, mantendo-se tudo o mais constante, as tensões de cisalhamento horizontal em uma viga tendem a aumentar com a redução do vão.

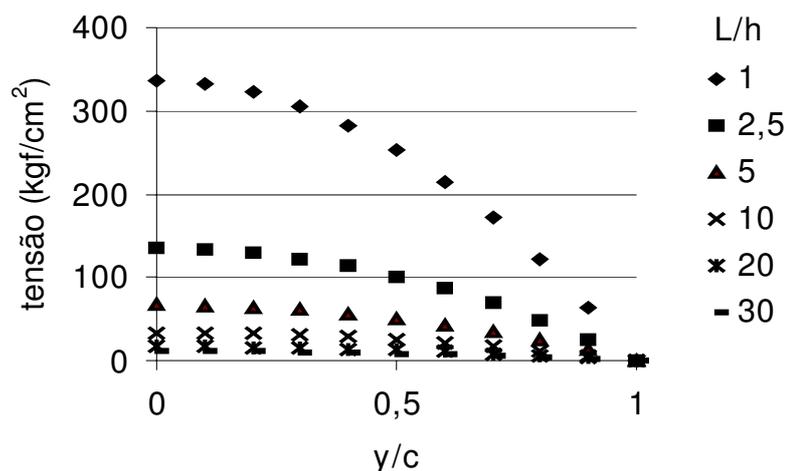


Figura 4 - Variação das tensões de cisalhamento no perfil de vigas com diferentes relações L/h, todas submetidas à tensão de flexão de 673 kgf/cm².

Para obter a tensão admissível na flexão para uma espécie de madeira, multiplica-se por 0,15 (equação (6)) o módulo de ruptura, incorporando-se assim vários coeficientes de segurança ao cálculo (PFEIL, 1994).

Considerando que se queira utilizar um viga solicitada na flexão com uma tensão igual à sua tensão admissível para esse esforço, as tensões de cisalhamento ficam bastante reduzidas, mais precisamente, são também multiplicadas por 0,15.

Por outro lado, a tensão admissível para o esforço de cisalhamento paralelo às fibras é obtida reduzindo-se em dez vezes o valor médio da resistência a esse esforço proveniente de ensaios com peças livres de defeitos (PFEIL, 1994); considerando-se ainda uma redução de 10% nesse valor para juntas coladas na produção de MLC (MOODY, 1997), o coeficiente de segurança para o cisalhamento torna-se 11,1 (equação (7)).

As equações seguintes resumem as últimas relações e restrições anteriormente enunciadas:

$$\sigma_a = \sigma \times 0,15; \tag{6}$$

$$\tau_a = \tau \times 0,1 \times 0,9 = \tau \times 0,09; \tag{7}$$

$$\tau = \sigma \times 0,1; \quad (8)$$

$$\tau_a = (\sigma \times 0,1) \times 0,09 = \sigma \times 0,009; \quad (9)$$

σ = módulo de ruptura médio obtido em ensaios de corpos de prova livres de defeitos;

σ_a = tensão admissível de flexão;

τ = resistência ao cisalhamento média obtida em ensaios de corpos de prova livres de defeitos; e

τ_a = tensão admissível ao cisalhamento.

Para se utilizar uma viga sob tensões de flexão e cisalhamento que não ultrapassem as tensões admissíveis, a equação (5) precisa ser escrita da seguinte forma:

$$\tau_a = \frac{\sigma_a}{2 \cdot R} \cdot (1 - r^2) \quad (10)$$

Substituindo σ_a e τ_a pelas equações (6) e (9), respectivamente, tem-se

$$\sigma \cdot 0,009 = \frac{\sigma \cdot 0,15}{2 \cdot R} \cdot (1 - r^2)$$

que, simplificando-se e isolando R, fornece:

$$R \geq 8,33 \cdot (1 - r^2) \quad (11)$$

Como as tensões máximas de cisalhamento ocorrem na superfície neutra, em que $y = 0$, fornecendo um $r = y^2/c^2 = 0$, a expressão (11) se resume a:

$$R \geq 8,33$$

O resultado anterior quer dizer que, supondo-se que a resistência ao cisalhamento da madeira seja um décimo do seu módulo de ruptura, o vão mínimo a ser coberto por uma viga em MLC deve ser igual ou superior a 8,33 vezes a altura desta.

Em vãos menores que esse limite, para uma mesma tensão de flexão (criteriosamente, a tensão admissível), desenvolver-se-ia na superfície neutra uma tensão de cisalhamento maior que a admissível para esse esforço.

Já é sabido que, se $r = 0$, $\tau = \tau_a$; entretanto, se aumenta o valor de r até o seu limite superior, que é 1, a tensão de cisalhamento decresce até 0, segundo o fator $(1-r^2)$. Assim, no perfil de uma viga submetida à tensão admissível de flexão, as tensões de cisalhamento decrescem sensivelmente até a fibra de borda. O Quadro 1 mostra valores de τ para várias posições nos perfis de vigas com diferentes relações L/h , submetidas à tensão de flexão de $100,5 \text{ kgf/cm}^2$, que é a tensão admissível da madeira de *Eucalyptus grandis* utilizada neste trabalho.

Quadro 1 - Variação das tensões de cisalhamento no perfil de vigas com três diferentes relações L/h e submetidas à mesma tensão de flexão

| y/c | L/h | | | | | |
|-----|----------------------------------|----------------------|----------------------------------|----------------------|----------------------------------|----------------------|
| | 8,33 | | 16,66 | | 33,32 | |
| | τ (kgf/cm ²) | τ/τ_a (%) | τ (kgf/cm ²) | τ/τ_a (%) | τ (kgf/cm ²) | τ/τ_a (%) |
| 0 | 6,03 | 100 | 3,01 | 50 | 1,51 | 25 |
| 0,1 | 5,97 | 99 | 2,98 | 49 | 1,49 | 25 |
| 0,2 | 5,79 | 96 | 2,89 | 48 | 1,45 | 24 |
| 0,3 | 5,49 | 91 | 2,74 | 45 | 1,37 | 23 |
| 0,4 | 5,06 | 84 | 2,53 | 42 | 1,27 | 21 |
| 0,5 | 4,52 | 75 | 2,26 | 37 | 1,13 | 19 |
| 0,6 | 3,86 | 64 | 1,93 | 32 | 0,96 | 16 |
| 0,7 | 3,07 | 51 | 1,54 | 25 | 0,77 | 13 |
| 0,8 | 2,17 | 36 | 1,09 | 18 | 0,54 | 9 |
| 0,9 | 1,15 | 19 | 0,57 | 9 | 0,29 | 5 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Ainda no Quadro 1, deve-se atentar para as colunas que mostram a relação τ/τ_a , pois elas revelam o quanto da tensão admissível ao cisalhamento está sendo efetivamente utilizado para suportar os esforços cisalhantes. Essa observação é especialmente importante quando se pensa na possível economia de adesivo entre as várias camadas de lâminas em um grande elemento estrutural em MLC, uma vez que, se em um certo plano da seção transversal da viga laminada que coincida com uma linha de cola desenvolve-se uma tensão que representa apenas um percentual da tensão admissível, isso quer dizer que apenas este percentual da área entre as camadas de madeira necessita receber adesivo.

Nota-se que o montante de adesivo possível de ser economizado varia, obviamente, com a quantidade de lâminas empregadas, com a posição das interfaces no perfil do elemento e com as tensões de serviço. Para as vigas do Quadro 1, supondo serem elas compostas por 20 camadas separadas por 19 interfaces, seriam possíveis economias de 30%, 65% e 83% nas relações L/h de 8,33, 16,66 e 33,32, respectivamente. Outras situações podem ser simuladas com o uso da equação (10).

No caso de elementos comprimidos axialmente (colunas) compostos por peças de madeira justapostas, a economia poderia ser ainda maior, já que os esforços laterais e as tensões de cisalhamento a serem considerados são muito reduzidos. Segundo PFEIL (1994), no caso de esforço lateral em uma coluna construída unindo-se peças de madeira com pregos ou conectores metálicos, devido à pouca rigidez desse tipo de ligação, deve-se se considerar um esforço transversal ideal da ordem de pelo menos 3% da carga admissível de compressão. Como as ligações coladas são mais rígidas, para colunas de MLC o esforço transversal ideal é menor, devendo ser ainda objeto de estudo.

Apesar do exposto anteriormente, não foi encontrada na literatura nenhuma referência sobre a possibilidade de se reduzir a área colada entre as lâminas de elementos estruturais em MLC valendo-se da redução das tensões de cisalhamento.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Madeira

Foi utilizada neste trabalho a madeira de *Eucalyptus grandis* produzida na região de Martinho Campos-MG, cedida pela Companhia Agroflorestral Santa Bárbara S.A. (CAF), empresa do grupo Belgo Mineira.

As árvores foram abatidas aos 18 anos de idade e sua madeira foi serrada verde e, posteriormente, seca em estufa.

Sabe-se que, originalmente, os plantios da CAF eram destinados à produção de carvão vegetal. Com a substituição desse produto pelo coque na siderurgia, tornou-se antieconômica a sua produção, o que levou a empresa a optar pela destinação de sua matéria-prima para serraria.

Entretanto, uma mudança tão drástica no uso da madeira nunca é tarefa fácil de se realizar. Assim, com o objetivo de obter madeira serrada de qualidade, a companhia tem investido no desenvolvimento de programas de secagem adequados às características genéticas de sua madeira. Os programas têm alcançado êxito em seus propósitos, eliminando grande parte dos defeitos de secagem (BAUER, 1999).

3.1.1. Caracterização da madeira

3.1.1.1. Dimensões da madeira

O lote de madeira serrada utilizado neste trabalho foi constituído por tábuas com as dimensões nominais mostradas no Quadro 2.

Quadro 2 - Dimensões nominais da madeira utilizada

| Número de tábuas | Dimensões nominais | | |
|------------------|--------------------|--------------|-----------------|
| | Espessura (cm) | Largura (cm) | Comprimento (m) |
| 108 | 2,5 | 15,0 | 4,2 |
| 73 | 2,5 | 15,0 | 4,5 |
| 21 | 2,5 | 12,5 | 4,5 |
| 47 | 2,5 | 12,5 | 4,5 |
| 139 | 2,5 | 10,0 | 4,2 |
| 131 | 2,5 | 10,0 | 4,2 |

A largura e a espessura reais de cada uma das tábuas foram medidas em laboratório, usando-se um paquímetro com sensibilidade de 0,02 mm. Essas medições foram feitas com os objetivos de verificar a conformidade das dimensões reais às nominais, descrever a variabilidade dessas dimensões e determinar a quantidade de usinagem que essas peças requereriam para produzir o material a ser ensaiado.

Os resultados das medições da espessura são mostrados no Quadro 3. Na Figura 5 pode-se observar a distribuição de seus valores, comparada com a distribuição normal.

Quadro 3 - Valores médio, mínimo e máximo e coeficiente de variação da espessura de todas as tábuas do lote

| Espessura das tábuas | | | |
|----------------------|-------------|-------------|-----------------------------|
| Media (cm) | Mínima (cm) | Máxima (cm) | Coeficiente de variação (%) |
| 2,60 | 2,45 | 2,72 | 0,3 |

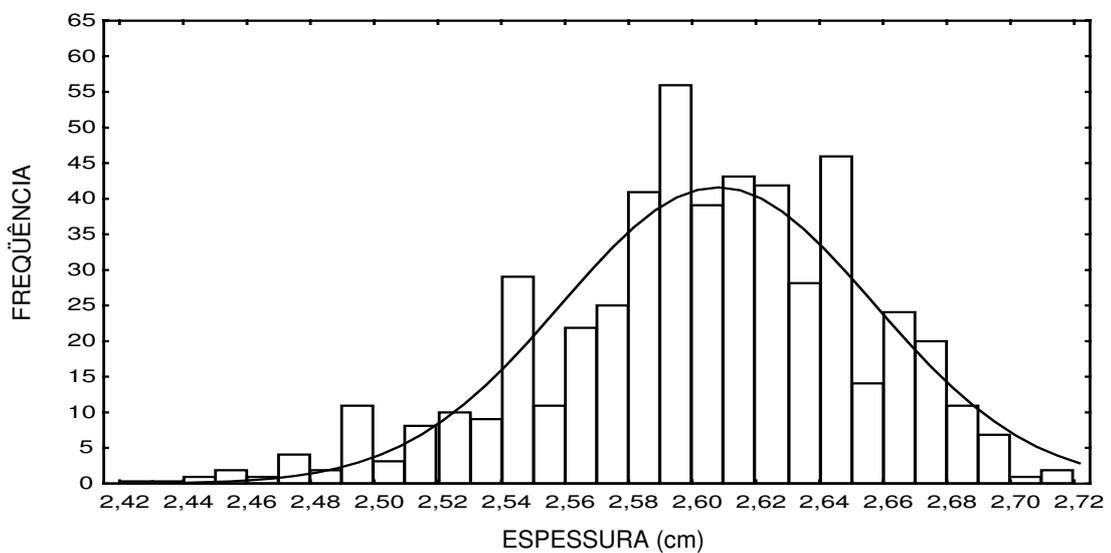


Figura 5 - Distribuição de frequência das espessuras das tábuas.

Os resultados das medições mostraram que 3,7% das tábuas apresentaram espessuras menores que 2,50 cm. Segundo a Norma para Classificação de Madeira Serrada de Folhosas no Brasil (IBDF, 1993), em um lote de madeira serrada nenhuma das peças pode ter sua espessura menor que a espessura nominal. Para a espessura nominal de 2,5 cm, uma sobremedida de até 0,2 cm é admitida em 100% das peças. Ainda, com a tolerância de ocorrência em até 10% das peças, sobremedidas de até 0,5 cm são permitidas.

Entretanto, essa norma se refere à madeira com teor de umidade de 20%, e a madeira aqui testada continha 12%. Um coeficiente médio de expansão na espessura de 0,33% a cada 1% de umidade adquirido colocaria todas as peças de menor espessura em conformidade com a norma.

Para o mesmo coeficiente de expansão, as peças com as maiores espessuras detectadas se enquadrariam nas sobremedidas da norma, pois, ao se expandirem até 20% de umidade, não atingiriam espessuras maiores que 3,00 cm. Entretanto, 30% das peças apresentariam espessuras entre 2,80 e 3,00, o que excederia a tolerância de 10% preconizada pela norma.

A mesma norma (IBDF, 1983) aplicada à largura diz que nenhuma das peças poderá apresentar largura inferior à largura nominal. A sobremedida de até 0,5 cm é permitida em 100% das peças. Ainda, admite-se que 10% das peças apresentem sobremedidas de até 1,5 cm. O Quadro 4 mostra os valores médios da largura das tábuas; o Quadro 5 mostra a situação do lote de madeira quanto ao seu enquadramento na norma.

Constatou-se que nenhuma das classes de largura satisfaz as exigências da norma. Nesse ponto, é importante ressaltar que o lote de madeira utilizado neste trabalho foi adquirido na forma de doação. A empresa doadora esclareceu que este material seria novamente processado antes de ser destinado à comercialização.

Quadro 4 - Valores máximos, mínimos e médios das larguras das tábuas e número de peças em cada classe de largura nominal

| Largura nominal (cm) | Número de peças | Largura máxima (cm) | Largura mínima (cm) | Largura média (cm) | Coeficiente de variação (%) |
|----------------------|-----------------|---------------------|---------------------|--------------------|-----------------------------|
| 10,00 | 270 | 11,60 | 9,78 | 10,85 | 2,9 |
| 12,50 | 68 | 13,22 | 12,22 | 12,63 | 1,5 |
| 15,00 | 181 | 15,90 | 15,00 | 15,39 | 1,1 |

Quadro 5 - Enquadramento das larguras das tábuas na norma

| Largura nominal (cm) | Peças abaixo da largura nominal (%) | Peças acima da sobremedida de 0,5 cm (%) | Peças acima da sobremedida de 1,5 cm (%) | Peças dentro da conformidade (%) | Conformidade (SIM / NÃO) |
|----------------------|-------------------------------------|--|--|----------------------------------|--------------------------|
| 10,00 | 0,0 | 84,8 | 1,8 | 27 | NÃO |
| 12,50 | 18,0 | 7,3 | 0,0 | 82 | NÃO |
| 15,00 | 1,1 | 26,5 | 0,0 | 82 | NÃO |

As Figuras 6, 7 e 8 mostram as distribuições de freqüências das larguras das tábuas nas classes de 10,00 cm, 12,50 cm e 15,00 cm, respectivamente, onde se pode ver a sua comparação com a distribuição normal.

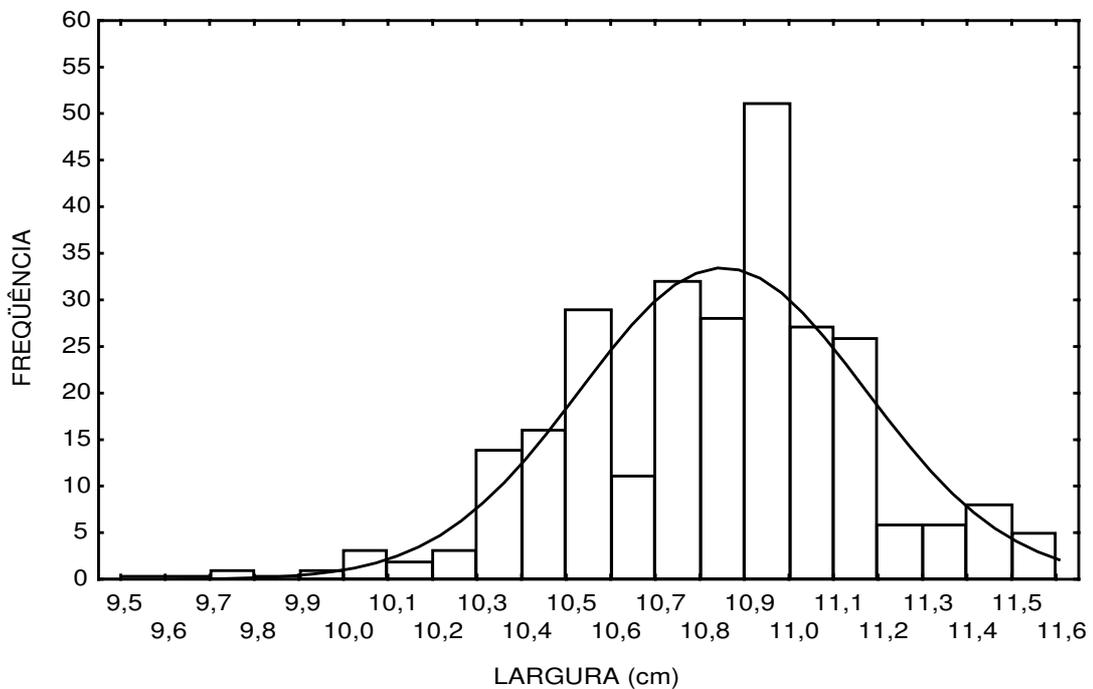


Figura 6 - Distribuição de freqüência das larguras das tábuas da classe de 10 cm.

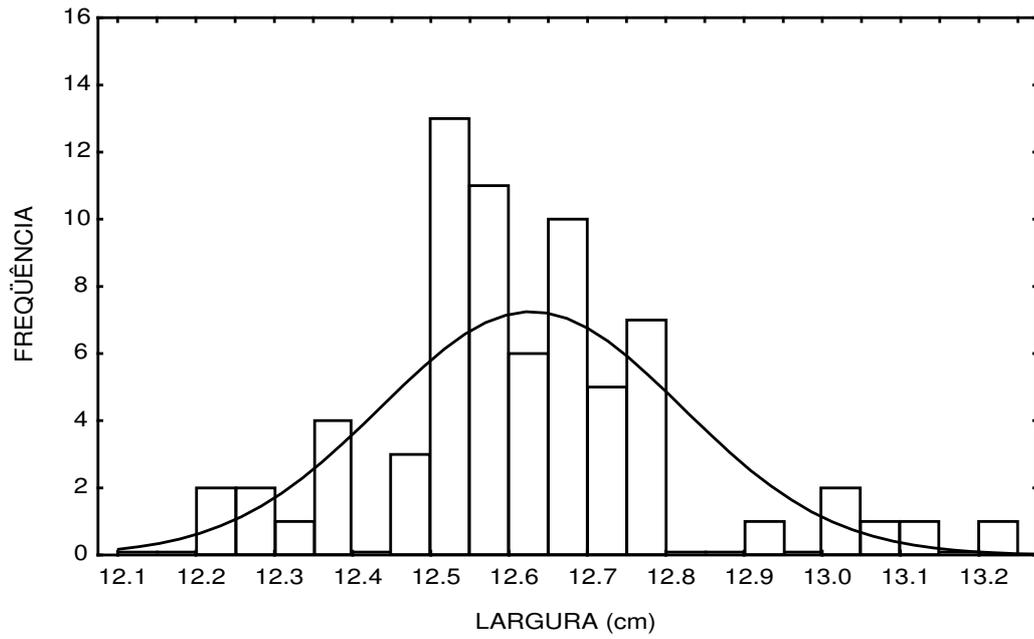


Figura 7 - Distribuição de freqüência das larguras das tábuas da classe de 12,5 cm.

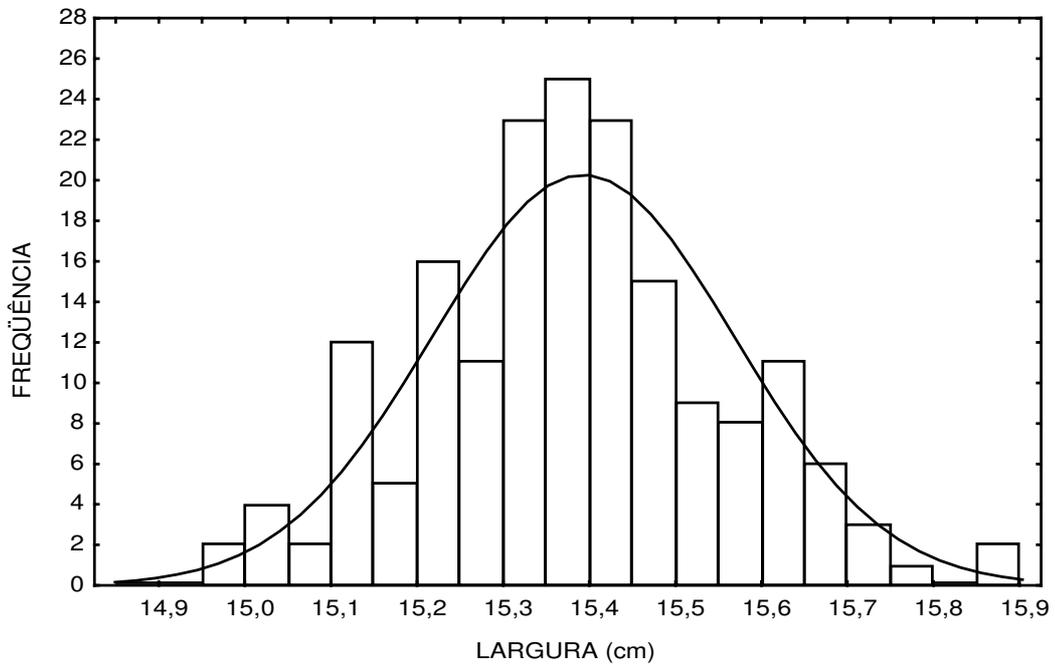


Figura 8 - Distribuição de freqüência das larguras das tábuas da classe de 15 cm.

3.1.1.2. Módulo de elasticidade em flexão e seleção das tábuas a serem utilizadas na confecção dos elementos estruturais

Com o objetivo de se realizar uma classificação mecânica prévia da madeira, foram determinados os módulos de elasticidade em flexão de todas as tábuas do lote.

Para isso, as tábuas foram colocadas sobre dois apoios separados por 4,0 m de distância e uma carga de 20 N era aplicada no centro desse vão. A deformação provocada pela aplicação da carga era medida por um relógio comparador com resolução de 0,01 mm e o módulo de elasticidade calculado com a expressão

$$E \text{ (MPa)} = (PL^3) / (4Fbh^3)$$

em que

E = módulo de elasticidade em flexão (MPa);

P = carga (N);

F = flecha (deformação) (cm);

b = largura da tábua (cm); e

h = espessura da tábua (cm).

A distribuição de frequência dos valores dos módulos de elasticidade à flexão pode ser vista na Figura 9, e seus valores-limites e o coeficiente de variação, no Quadro 6.

Os resultados revelam uma amplitude total de 17.829 MPa, indicando que uma classificação prévia era realmente necessária, posto que é desejável a redução do efeito da variabilidade das propriedades do material no comportamento dos elementos estruturais com ele construídos. Isto somente é possível com a seleção para a utilização de peças que apresentem características tão similares quanto seja possível.

Assim, para confecção dos elementos estruturais em MLC deste trabalho, foram selecionadas 144 tábuas cujos módulos de elasticidade em flexão se encontravam imediatamente acima e, as outras 144, imediatamente abaixo do módulo médio, das 519 que compunham o lote de madeira.

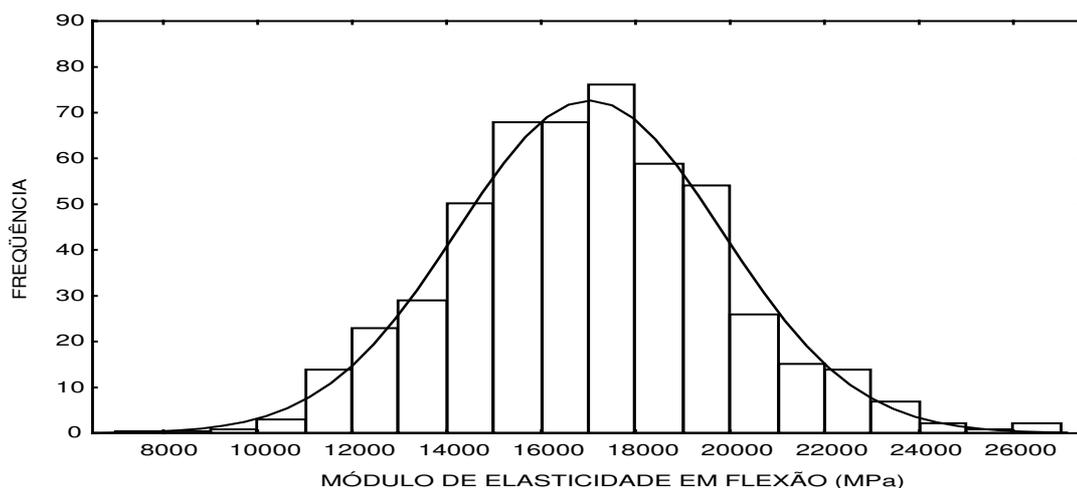


Figura 9 - Distribuição de frequência do módulo de elasticidade das tábuas.

Quadro 6 - Valores médio, mínimo, máximo e coeficiente de variação do módulo de elasticidade em flexão das tábuas

| Média (MPa) | Mínimo (MPa) | Máximo (MPa) | CV (%) |
|-------------|--------------|--------------|--------|
| 17.021 | 9.116 | 26.945 | 16,00 |

Os módulos de elasticidade à flexão das tábuas selecionadas variavam entre 15.148 MPa e 19.686 MPa, o que resulta em uma amplitude total de 4.237 MPa.

3.1.1.3. Determinação da resistência à compressão e da densidade da madeira

Das 288 tábuas selecionadas (item 3.1.1.2), foram retiradas amostras para determinação da resistência à compressão paralela às fibras e da densidade da madeira, de acordo com esquema mostrado na Figura 10. Antes da retirada das amostras as tábuas tiveram suas espessuras padronizadas em 2,2 cm e suas larguras em 10,40 cm, com auxílio de uma desengrossadeira e de uma serra circular.

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| | | 3 | 4 | | |
| | | 3 | 4 | | |
| | | 3 | 4 | | |

- 1- Descarte (comprimento variável segundo as rachaduras de topo)
- 2- Lâmina para confecção dos elementos estruturais (2,40 m)
- 3- Amostras para determinação da resistência à compressão (2 x 2 x 3 cm)
- 4- Amostras para determinação da densidade (2 x 2 x 3 cm)
- 5- Lâminas para confecção dos elementos estruturais (comprimento variável)
- 6- Descarte (comprimento variável)

Figura 10 - Esquema de uma tábua, mostrando os locais de retirada de amostras para determinação da resistência à compressão e da densidade da madeira.

3.1.1.3.1. Determinação da resistência à compressão

Os corpos de prova para a determinação da resistência à compressão possuíam as dimensões nominais de 2 x 2 x 3 cm. Os testes foram conduzidos em uma máquina de ensaios universal ajustada para a carga máxima de 10 000 N, e seus resultados são mostrados no Quadro 7, onde são comparados com dados do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT, 1993), que também caracterizou a madeira de *Eucalyptus grandis* das florestas da CAF.

Quadro 7 - Resultados dos ensaios de compressão paralela conduzidos no Laboratório de Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira da Universidade Federal de Viçosa (LPFMM), comparados aos dados do IPT- SP de 1993

| Instituição | Resistência máxima (MPa) | Resistência mínima (Mpa) | Resistência média (MPa) | Coefficiente de variação (%) |
|-------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------------|
| LPFMM-UFV | 91,4 | 32,7 | 60,8 | 15,9 |
| IPT-SP | - | - | 54,4 | 10,5 |

Uma comparação pelo teste de t entre a média aqui obtida e aquela fornecida pelo IPT revela uma diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$) entre os valores médios da resistência à compressão. Sobre essa diferença podem-se fazer algumas inferências:

- a) Os lotes de madeira ensaiados pelos dois laboratórios eram naturalmente diferentes em suas propriedades, devido à variabilidade inerente ao material.
- b) Neste estudo foi testada madeira serrada na forma de tábuas, enquanto o trabalho do IPT baseou-se na norma NBR-6230 da ABNT, que indica a retirada de amostras de forma sistemática em várias posições do tronco.
- c) Supõe-se que as tábuas aqui utilizadas tenham sido produzidas serrando toras das regiões superiores do tronco, pois, apesar da idade de 18 anos, elas continham, na maioria das vezes, alborno em ambos os extremos de sua pouca largura (10 a 15 cm). O fato de se ter aqui testada, com tendenciosidade, a madeira de uma região específica do tronco, por si só, seria suficiente para explicar as diferenças entre os resultados.

A Figura 11 mostra a distribuição de freqüência da resistência à compressão das amostras individuais.

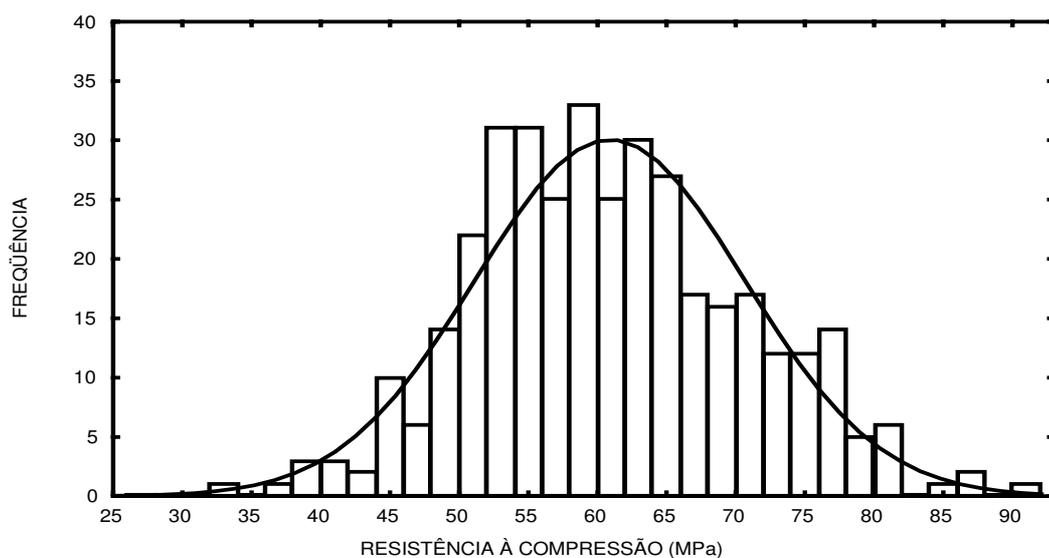


Figura 11 - Distribuição de freqüência da resistência à compressão.

O Quadro 8 traz os valores máximo, médio e mínimo e o coeficiente de variação das médias das quatro amostras de cada tábua. Aqui pode-se perceber a grande variabilidade entre as peças da madeira em estudo, no que diz respeito à essa propriedade.

A Figura 12 mostra os valores médios da resistência à compressão, segundo a posição na largura da tábua. Os corpos de prova foram retirados de maneira que representassem de 0 a 25%, de 25 a 50%, de 50 a 75% e de 75 a 100% da largura, caracterizando as posições 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Há diferenças significativas em nível de 5% de probabilidade entre as posições marcadas com letras diferentes.

Quadro 8 - Valores máximo, médio e mínimo e coeficiente de variação das médias da resistência à compressão em cada tábua

| Média | Mínimo | Máximo | CV (%) |
|-------|--------|--------|--------|
| 60,8 | 47,0 | 75,4 | 11,0 |

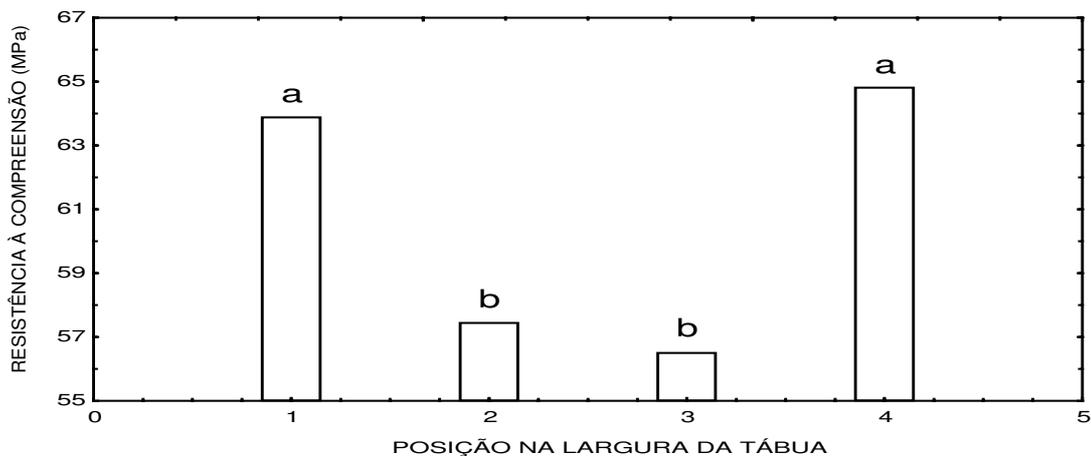


Figura 12 - Variação da resistência à compressão na largura da tábua.

Percebe-se claramente a tendência de haver redução da resistência à compressão à medida que se aproxima a porção central da peça. Este fato pode ser explicado pela presença de regiões de influência da medula na maioria das tábuas, as quais foram obtidas serrando-se toras de pequenos diâmetros.

3.1.1.3.2. Determinação da densidade

Os corpos de prova, para determinação da densidade, possuíam as dimensões nominais de 2 x 2 x 3 cm e foram retirados de posições adjacentes àqueles destinados a determinação da resistência à compressão, como mostra a Figura 10.

Foi determinada a densidade da madeira a 0% de umidade. Para medição dos volumes dos corpos de prova empregou-se o método da balança hidrostática com mercúrio metálico como fluido. Os pesos foram obtidos na mesma balança, que possuía a resolução de 0,01 g.

A Figura 13 mostra a distribuição de frequência da densidade de todos os corpos de prova, enquanto o Quadro 9 traz os valores máximo, mínimo e médio para essa propriedade.

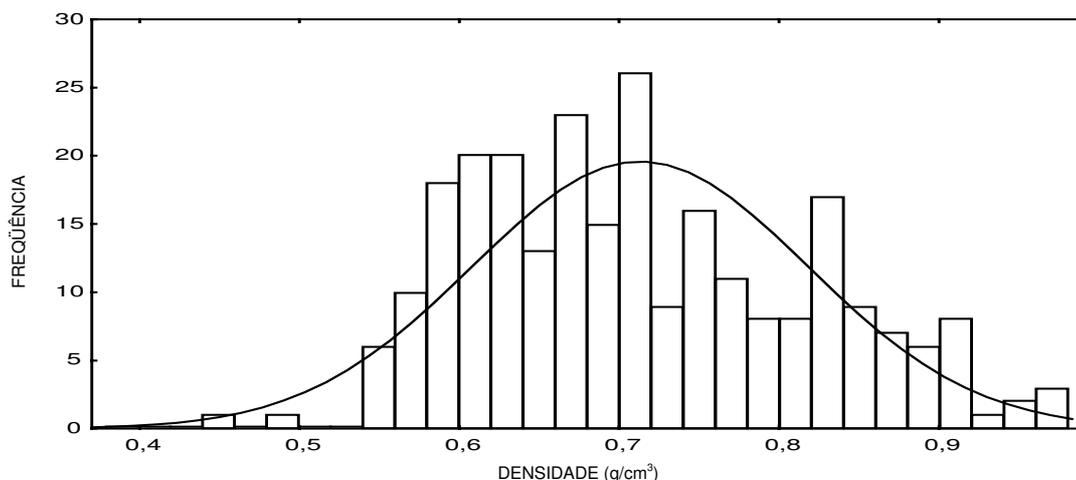


Figura 13 - Distribuição de frequência da densidade.

Quadro 9 - Valores médio, mínimo, máximo e coeficiente de variação da densidade da madeira a 0% de umidade

| Média (g/cm ³) | Mínima (g/cm ³) | Máxima (g/cm ³) | CV (%) |
|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------|
| 0,71 | 0,44 | 0,97 | 14,8 |

A Figura 14 mostra a correlação entre a densidade e a resistência à compressão de corpos de prova adjacentes. A regressão linear apresentou o valor de 0,74 para o coeficiente de correlação (R^2).

A Figura 15 mostra os valores médios da densidade segundo a posição na largura da tábua. Há diferenças significativas em nível de 5% de probabilidade entre as posições marcadas com letras diferentes. A tendência similar àquela apresentada pela resistência à compressão corrobora a correlação entre essas duas propriedades. OLIVEIRA (1997) constatou comportamento semelhante para a densidade da madeira de *E. grandis* no sentido medula - casca.

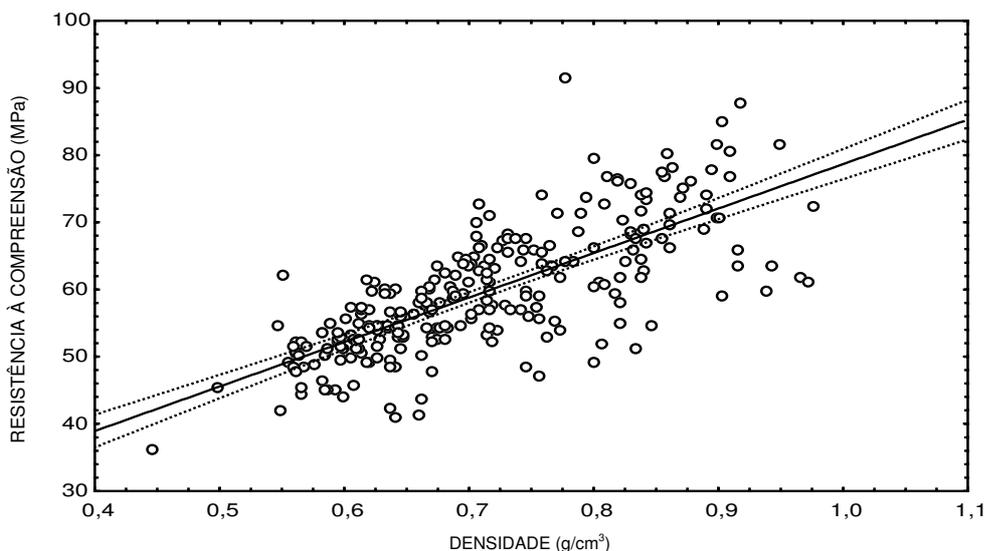


Figura 14 - Dispersão dos valores de resistência à compressão em relação à densidade da madeira.

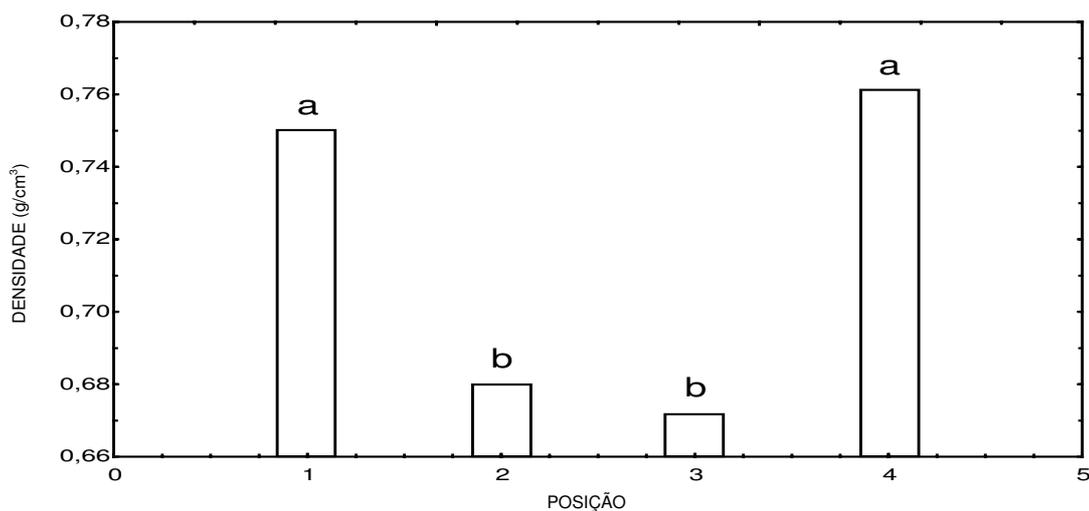


Figura 15 - Variação da densidade na largura da tábua.

A importância, no contexto deste trabalho, da densidade e da resistência à compressão da madeira e de suas variações na largura das tábuas reside no fato de que estas propriedades estão relacionadas à resistência à tração, e, onde elas se encontram em seus valores mínimos, possivelmente serão os pontos de início de fratura nos elementos estruturais sob teste.

3.2. Adesivo

O adesivo utilizado neste trabalho foi a resina sintética à base de resorcinol-formaldeído, de nome comercial Cascophen, 120 fabricado e cedido pela Alba Química S.A.

A resina continha o teor de sólidos de 52%, determinado de acordo com os procedimentos da norma ASTM D 1582-93 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1994). Como recomendado pelo fabricante, a mistura adesiva foi preparada misturando-se cinco partes por peso da resina com uma parte do catalisador.

Foram aplicados 300 g de adesivo por metro quadrado de junta colada, como recomenda o fabricante. Aplicou-se o adesivo em apenas uma das faces das juntas.

3.3. Confeção dos elementos estruturais

Das tábuas selecionadas (item 3.1.1.2) foram retiradas as lâminas para confecção dos elementos estruturais em MLC, como mostra a Figura 10.

As lâminas com 2,20 cm de espessura, 10,40 cm de largura e 240 e 80 cm de comprimento tiveram novamente determinados seus módulos de elasticidade em flexão. Esta operação foi repetida, no intuito de se conseguir uma seleção mais refinada das peças, pois sabe-se que a redução do comprimento implica, certamente, mudança do módulo de elasticidade, já que se estaria isolando uma região específica da tábua com suas próprias características anatômicas.

As lâminas selecionadas para confecção dos elementos estruturais apresentaram módulos de elasticidade em flexão variando de 13.707 MPa a 22.641 MPa. A distribuição de freqüência do módulo de elasticidade é mostrada na Figura 16, e seus valores médio, máximo e mínimo, no Quadro 10.

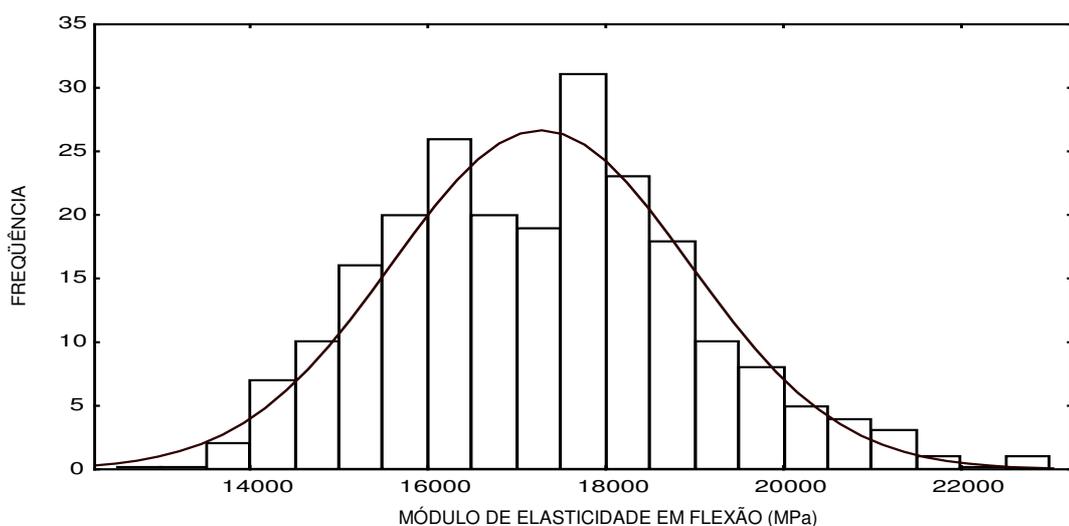


Figura 16 - Distribuição de freqüência do módulo de elasticidade em flexão das lâminas utilizadas na confecção dos elementos estruturais.

Quadro 10 - Valores médio, mínimo e máximo e coeficiente de variação do módulo de elasticidade em flexão das lâminas utilizadas na confecção dos elementos estruturais

| Média (MPa) | Mínimo (Mpa) | Máximo (MPa) | CV (%) |
|-------------|--------------|--------------|--------|
| 17.270 | 13.707 | 22.641 | 9,7 |

De posse dos valores dos módulos de elasticidade em flexão das lâminas, procedeu-se, finalmente, à segregação e destinação destas para a composição das repetições dentro dos tratamentos.

Os tratamentos testados neste trabalho constaram de elementos estruturais em MLC com três camadas de lâminas. O delineamento experimental foi do tipo blocos casualizados.

Foram construídos 12 elementos para cada tratamento, dos quais seis foram testados como vigas (em flexão) e seis como colunas (em flexão).

Todos os elementos possuíam 2,40 m de comprimento e seção transversal de 10 x 6 cm, obtida colando-se três camadas de 2 cm de espessura por 10 cm de largura.

Nos tratamentos 1 a 6 as três camadas eram contínuas, isto é, as lâminas tinham 2,40 m de comprimento. Nos tratamentos 7 e 8 a camada central era formada por três lâminas de 80 cm de comprimento, sem nenhum tipo de emenda de topo.

Variou-se, nos tratamentos, a área das faces das lâminas que recebeu adesivo, como mostra o Quadro 11.

Nos tratamentos em que a área colada era menor que 100%, o adesivo foi espalhado em 13 faixas iguais e transversais aos eixos longitudinais dos elementos, como mostra a Figura 17.

A definição do número de faixas em que seriam subdivididas as áreas a serem coladas baseou-se na operacionalidade. Concluiu-se que faixas com, no mínimo, 1,0 cm de largura poderiam ser feitas em laboratório. O Quadro 12 mostra as larguras das faixas coladas e não-coladas para os tratamentos.

Quadro 11 - Descrição dos tratamentos

| Tratamento | Área colada (%) | Lâminas das camadas externas | Lâmina da camada central |
|------------|-----------------|------------------------------|------------------------------------|
| 1 | 100 | Contínuas | Contínua |
| 2 | 80 | Contínuas | Contínua |
| 3 | 60 | Contínuas | Contínua |
| 4 | 40 | Contínuas | Contínua |
| 5 | 20 | Contínuas | Contínua |
| 6 | 10 | Contínuas | Contínua |
| 7 | 100 | Contínuas | Interrompida (3 peças de 80 cm) |
| 8 | 40 | Contínuas | Interrompida (3 peças de 80 cm) |

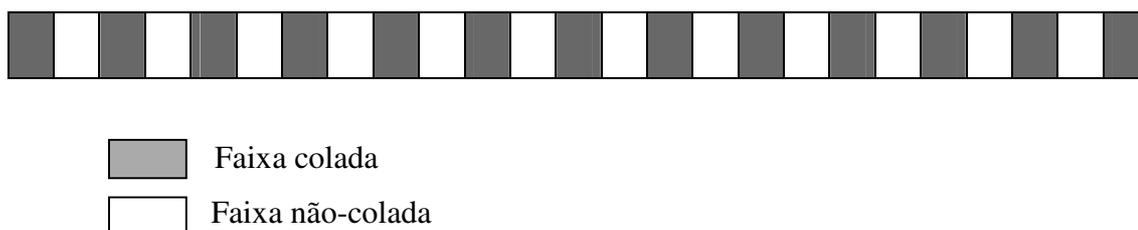


Figura 17 - Esquema de uma lâmina, mostrando as faixas coladas e não-coladas.

Quadro 12 - Largura das faixas coladas e não-coladas (cm)

| Situação | Tratamentos | | | | | |
|-------------------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 e 7 | 2 | 3 | 4 e 8 | 5 | 6 |
| Largura das faixas (cm) | | | | | | |
| Colada | 240,00 | 14,80 | 11,10 | 7,40 | 3,70 | 1,80 |
| Não-colada | - | 4,00 | 8,00 | 12,00 | 16,00 | 18,00 |

O adesivo foi aplicado na razão de 300 g/m², em uma única face, em todos os tratamentos. O consumo de adesivo em cada tratamento é mostrado no Quadro 13.

Imediatamente antes da colagem as lâminas tiveram suas espessuras padronizadas em 2,0 cm. Nos tratamentos em que a área colada era menor que 100% o adesivo foi distribuído com o auxílio de um gabarito, o qual apresentava “janelas” que se abriam ou fechavam em função da área requerida.

Espalhado o adesivo, as lâminas eram então conduzidas à prensagem em uma prensa de parafusos. A pressão de colagem adotada foi a de 1,12 MPa, controlada com auxílio de um torquímetro.

Após sua remoção da prensa, os elementos estruturais foram armazenados por sete dias, para completa cura do adesivo.

Quadro 13 - Consumo de adesivo nos tratamentos

| Situação | Tratamentos | | | | | |
|---------------------------|------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 e 7 | 2 | 3 | 4 e 8 | 5 | 6 |
| | Consumo de adesivo (g) | | | | | |
| Adesivo por faixa (g) | 72,00 | 4,40 | 3,30 | 2,20 | 1,10 | 0,60 |
| Adesivo por interface (g) | 72,00 | 57,60 | 43,20 | 28,80 | 14,40 | 7,20 |
| Adesivo por elemento (g) | 144,00 | 115,20 | 86,40 | 57,60 | 28,80 | 14,40 |

3.4. Testes dos elementos estruturais

3.4.1. Compressão

Seis elementos estruturais de cada tratamento foram submetidos a testes de compressão axial. Os ensaios foram feitos em um quadro de reação especialmente construído para essa finalidade.

Os elementos estruturais, posicionados horizontalmente, recebiam cargas crescentes, aplicadas por um cilindro hidráulico em uma extremidade, enquanto na outra uma célula de carga registrava o esforço exercido, como mostra a Figura 18.

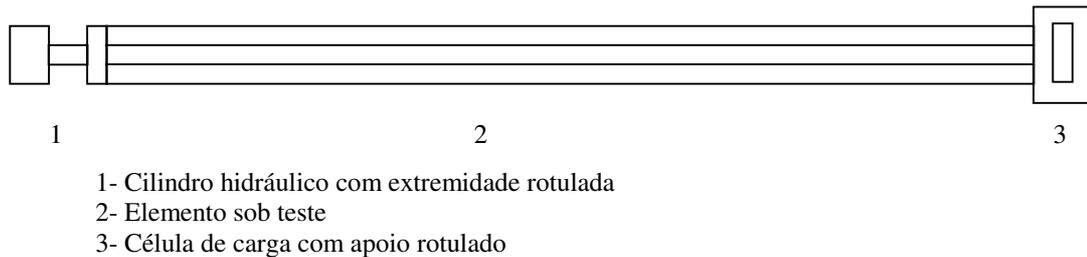


Figura 18 - Esquema do ensaio de compressão axial dos elementos.

O teste era interrompido quando a carga não mais crescia. A carga máxima era então registrada.

3.4.2. Flexão estática

Outras seis repetições de cada tratamento foram submetidas a ensaios de flexão estática, como viga biapoiada nas extremidades, com aplicação de cargas concentradas no centro do vão.

O vão adotado para este teste foi de 2,0 m. À medida que as cargas iam crescendo, media-se a deformação por elas causadas no centro do vão, com auxílio de um relógio comparador com resolução de 0,01 mm. Um desenho esquemático do ensaio pode ser visto na Figura 19.

Os elementos foram testados “ao baixo”, ou seja, segundo o seu menor momento de inércia. Isto porque desejava-se solicitar a linha de cola entre as lâminas, no cisalhamento paralelo.

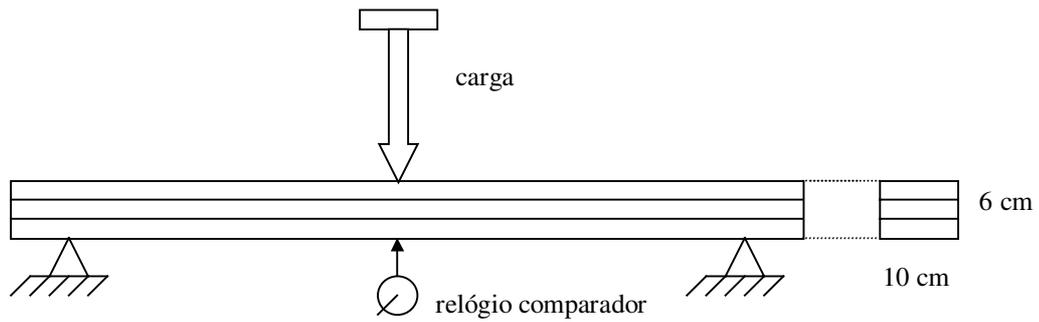


Figura 19 - Ensaio de flexão estática dos elementos estruturais.

Os testes foram conduzidos em uma máquina de ensaios universal, com escala ajustada para a carga máxima de 20 000 N.

Os resultados aqui obtidos permitiram a elaboração dos diagramas de tensão e deformação até o momento da ruptura dos elementos por flexão. Assim foram obtidos o módulo de elasticidade em flexão e o módulo de ruptura dos elementos estruturais.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Compressão axial dos elementos

Os resultados dos ensaios de compressão axial em que se determinaram as cargas máximas suportadas pelos elementos são mostrados no Quadro 14 onde podem ser observados seus valores máximos, mínimos e médios, bem como o coeficiente de variação para cada tratamento.

Quadro 14 - Valores máximos, mínimos e médios e coeficiente de variação da carga máxima na compressão, nos oito tratamentos

| Tratamento | Carga máxima na compressão (N) | | | CV (%) |
|------------|--------------------------------|--------|--------|--------|
| | Máximo | Mínimo | Média | |
| 1 | 70.913 | 52.949 | 64.729 | 12 |
| 2 | 85.838 | 53.959 | 68.706 | 17 |
| 3 | 74.490 | 68.296 | 71.037 | 4 |
| 4 | 75.342 | 59.780 | 66.656 | 11 |
| 5 | 74.039 | 60.348 | 66.234 | 10 |
| 6 | 73.931 | 49.225 | 61.505 | 14 |
| 7 | 84.790 | 46.981 | 64.295 | 19 |
| 8 | 74.549 | 55.145 | 61.235 | 12 |

Os valores médios das cargas máximas na compressão não diferem estatisticamente entre si em nível de 5% de probabilidade entre os tratamentos, indicando que a redução da área colada não afetou significativamente essa propriedade.

Ao serem comparados os valores das cargas máximas obtidas nos ensaios de compressão com a carga de projeto admissível de 8.326 N, calculada a partir das fórmulas para o dimensionamento de colunas propostas pela norma brasileira NB-11, conclui-se que os coeficientes de segurança globais variam de 5,64 a 10,30, níveis estes bastante satisfatórios para o emprego confiável desses elementos em construções. A dispersão dos resultados e a sua comparação com a carga de projeto são mostradas na Figura 20.

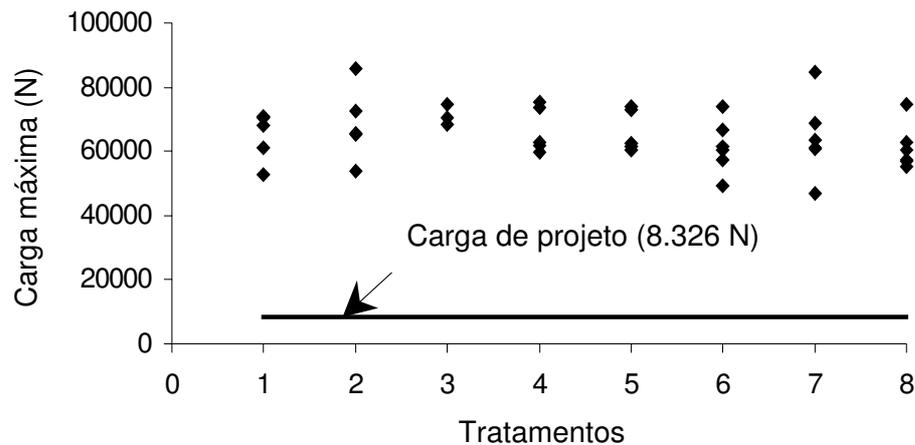


Figura 20 - Dispersão dos resultados dos ensaios de compressão axial dos elementos e sua comparação com a carga de projeto.

A dispersão dos resultados provavelmente está relacionada à variabilidade da madeira empregada na confecção dos elementos e não compromete a segurança da aplicação destes, uma vez que mesmo os valores mais baixos são, ainda, cerca de cinco vezes superiores à carga admissível.

4.2. Flexão biapoiada com aplicação de carga no centro do vão

4.2.1. Módulo de ruptura, módulo de elasticidade em flexão e carga em L/350

Os resultados para os módulos de ruptura, módulo de elasticidade em flexão e carga na deformação L/350 dos elementos, agora testados como vigas em ensaios de flexão em três pontos, ou seja, flexão biapoiada com carga centrada, são mostrados nos Quadros 15, 16 e 17, respectivamente, onde também podem ser observados os valores máximos, mínimos e médios, bem como o coeficiente de variação, para cada uma dessas propriedades, em cada tratamento.

Não foram detectadas diferenças significativas entre as médias dos tratamentos em nível de 5% de probabilidade para essas três propriedades dos elementos estruturais sob flexão estática (módulo de ruptura, módulo de elasticidade em flexão e carga em L/350).

Quadro 15 - Valores máximos, mínimos, médios e coeficiente de variação do módulo de ruptura, nos oito tratamentos

| Tratamento | Módulo de ruptura (MPa) | | | CV (%) |
|------------|-------------------------|--------|-------|--------|
| | Máximo | Mínimo | Média | |
| 1 | 95 | 51 | 69 | 29 |
| 2 | 85 | 60 | 72 | 14 |
| 3 | 89 | 40 | 59 | 32 |
| 4 | 75 | 36 | 56 | 34 |
| 5 | 75 | 44 | 62 | 22 |
| 6 | 61 | 42 | 50 | 15 |
| 7 | 127 | 48 | 77 | 42 |
| 8 | 84 | 52 | 67 | 19 |

Quadro 16 - Valores máximos, mínimos e médios e coeficiente de variação do módulo de elasticidade em flexão, nos oito tratamentos

| Tratamento | Módulo de elasticidade na flexão (MPa) | | | CV (%) |
|------------|--|--------|--------|--------|
| | Máximo | Mínimo | Média | |
| 1 | 17.142 | 13.117 | 14.785 | 11 |
| 2 | 15.791 | 12.196 | 14.148 | 10 |
| 3 | 15.365 | 12.339 | 14.142 | 8 |
| 4 | 14.413 | 12.419 | 13.694 | 7 |
| 5 | 14.927 | 13.186 | 13.953 | 6 |
| 6 | 15.588 | 12.778 | 14.005 | 8 |
| 7 | 18.826 | 12.802 | 14.637 | 17 |
| 8 | 15.941 | 13.060 | 14.266 | 8 |

Quadro 17 - Valores máximos, mínimos e médios e coeficiente de variação da carga na flexão L/350 (0,56 cm), nos oito tratamentos

| Tratamento | Carga em L/350 (N) | | | CV (%) |
|------------|--------------------|--------|-------|--------|
| | Máximo | Mínimo | Média | |
| 1 | 1.019 | 758 | 862 | 12 |
| 2 | 959 | 725 | 825 | 10 |
| 3 | 876 | 749 | 836 | 6 |
| 4 | 838 | 766 | 806 | 4 |
| 5 | 832 | 754 | 801 | 4 |
| 6 | 838 | 708 | 764 | 7 |
| 7 | 1.089 | 755 | 856 | 16 |
| 8 | 931 | 755 | 827 | 8 |

4.2.2. Cisalhamento

A análise das tensões de cisalhamento desenvolvidas no plano das faces das lâminas quando os elementos em MLC são submetidos à flexão deve receber uma atenção especial, posto que ela indicará o ponto em que a tensão cisalhante supera a resistência oferecida pelas variadas áreas coladas em cada tratamento.

A Figura 21 mostra, para o plano que contém a linha de cola, a carga cisalhante efetiva, aquela desenvolvida na carga máxima de flexão (estimada com a equação (3)), e a carga cisalhante resistente, aquela teoricamente "suportável" que é calculada multiplicando-se a área colada na lâmina pela resistência ao cisalhamento paralelo da madeira a 12% de umidade (supondo-se que a linha de cola apresente a mesma resistência que a madeira).

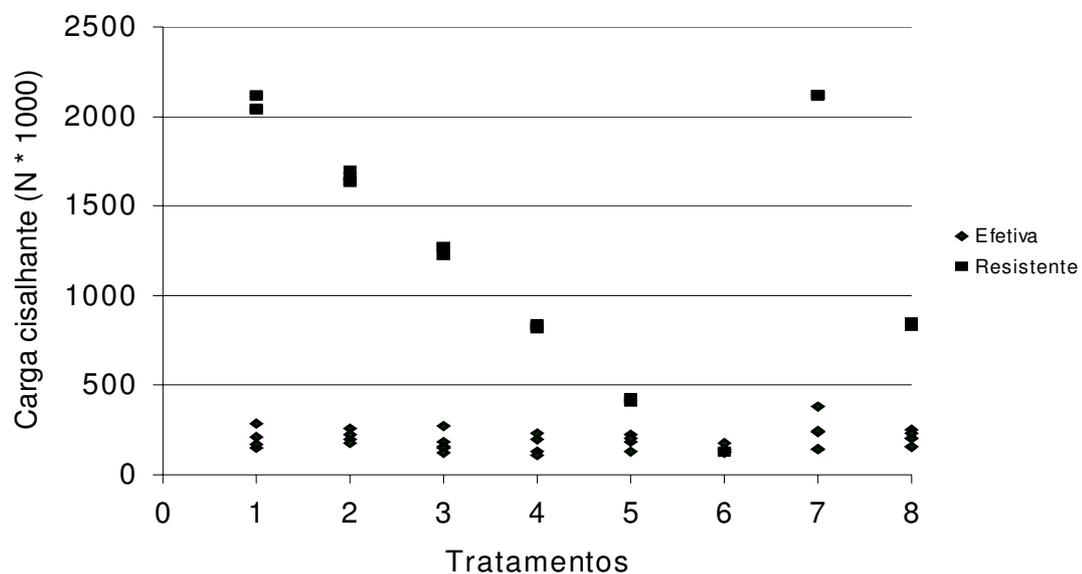


Figura 21 - Cargas cisalhantes efetivas e resistentes, para os oito tratamentos.

Uma rápida análise da Figura 21 permite concluir que o cisalhamento não é, de forma alguma, o esforço limitante para o comportamento dos elementos, quando submetidos à flexão biapoiada com a carga centrada, naqueles tratamentos onde a área colada era maior que 10%.

De fato, as fraturas observadas nos tratamentos 1 a 5, 7 e 8 são de tração e compressão, e somente no tratamento 6 (10% de área colada) foram obtidas fraturas por cisalhamento.

À primeira vista, a predominância de fraturas de tração nos elementos submetidos à flexão pode parecer um fato inusitado, uma vez que é de conhecimento geral a superioridade da resistência à tração sobre a resistência à compressão nas madeiras maduras e livres de defeitos. Entretanto, as lâminas utilizadas neste trabalho continham altas proporções de madeira juvenil, material com ângulos microfibrilares tipicamente elevados, o que pode acarretar redução da resistência à tração em níveis inferiores aos da resistência à compressão.

O Quadro 18 e a Figura 22 ajudam a ver com maior clareza a relação entre o esforço cisalhante efetivo na carga máxima de flexão e o esforço resistente oferecido pelas áreas coladas em cada tratamento.

No Quadro 18, pode-se observar que, no tratamento 1 (colados 100% da área), apenas, em média, 9% da capacidade da linha de cola de resistir aos esforços cisalhantes estava sendo utilizada no momento da ruptura da viga. Por outro lado, no tratamento 6 (colados 10% da área), apenas 69% dessa capacidade estava sendo solicitada; entretanto, todas as repetições desse tratamento romperam por cisalhamento na linha de cola, o que indica que realmente os coeficientes de segurança para esforços cisalhantes devem ser aplicados com rigor para o projeto de vigas em MLC, prevendo-se a variabilidade da resistência ao cisalhamento da madeira e a eficiência da adesão.

Quadro 18 - Valores máximos, mínimos e médios e coeficiente de variação da relação entre as cargas cisalhantes efetivas e as resistentes na linha de cola, nos oito tratamentos

| Tratamentos | Proporção carga efetiva para carga resistente (%) | | | |
|-------------|---|--------|-------|--------|
| | Máxima | Mínima | Média | CV (%) |
| 1 | 13 | 7 | 9 | 29 |
| 2 | 15 | 11 | 12 | 14 |
| 3 | 21 | 9 | 14 | 31 |
| 4 | 27 | 13 | 20 | 33 |
| 5 | 52 | 31 | 43 | 20 |
| 6 | 86 | 58 | 69 | 14 |
| 7 | 18 | 6 | 10 | 41 |
| 8 | 30 | 18 | 23 | 18 |

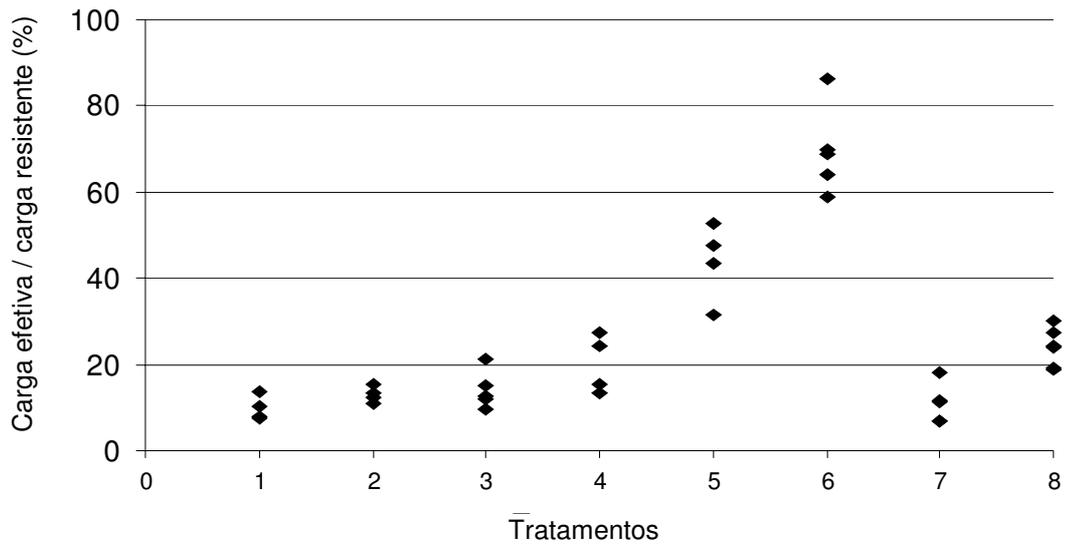


Figura 22 - Relação (%) entre as cargas cisalhantes efetivas e as resistentes, nos oito tratamentos.

O modelo matemático aplicado às tensões admissíveis de flexão e cisalhamento preconizava a aplicação de adesivo em 23% da área; no entanto, as fraturas por cisalhamento surgiram apenas quando a área colada era de 10%, indicando que o modelo é restritivo o bastante para garantir segurança aos elementos estruturais com ele projetados.

Por outro lado, o mesmo modelo, estando a viga submetida à tensão máxima de flexão (módulo de ruptura) e também não se aplicando coeficientes de segurança ao valor médio da resistência ao cisalhamento, como no caso dos ensaios, previa o desenvolvimento de tensões cisalhantes na linha de cola da ordem de 13% da resistência ao cisalhamento da madeira (necessitando, portanto, da aplicação de adesivo em apenas 13% da área). Realmente, quando a área colada era de 10% das faces, surgiram as fraturas por cisalhamento, mostrando que o modelo está bastante próximo da reprodução da realidade.

Nesse ponto, é importante salientar que o número de repetições realizadas neste trabalho certamente não é suficiente para a proposição de uma modificação nas normas de construções em madeira laminada. Trabalhos mais

extensos devem ser desenvolvidos, variando-se as relações L/h, as espécies de madeira, o adesivo e a forma de carregamento dos elementos estruturais.

Os tratamentos 7 e 8, compostos por vigas que possuíam a sua camada central formada por três lâminas sem emendas longitudinais, apresentaram resultados similares aos tratamentos 1 e 4, com exceção da maior variabilidade apresentada pelo tratamento 7. Provavelmente esta variabilidade está relacionada aos diferentes graus de intimidade entre os topos das peças da camada central interrompida.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

Tendo em vista os resultados obtidos, chegou-se às seguintes conclusões:

- A carga máxima de compressão suportada pelas colunas de MLC não sofreu influência da variação da área colada até o nível de 10%, nem tampouco do fato de a camada central, em alguns tratamentos, ser interrompida.
- O módulo de ruptura e o módulo de elasticidade das vigas também não foram afetados pelos tratamentos.
- Quando se aplicou adesivo em apenas 10% da área das faces das lâminas, o regime de fratura foi o de cisalhamento paralelo às fibras.
- É possível economizar adesivo na confecção de elementos estruturais em madeira laminada colada reduzindo-se a área das faces das lâminas que o recebem.
- O modelo matemático desenvolvido para a distribuição das tensões cisalhantes mostrou-se adequado para o projeto de elementos estruturais em MLC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cálculo e execução de estruturas de madeira NBr-7190**. 1951. 21p.
- AITC - AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION. **AITC 110 Standard Appearance Grades for Structural Glued-Laminated Timber**. AITC. Englewood, Colorado. 1984b. 156p.
- AITC - AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION. **AITC 109 Standard for Preservative Treatment of Structural Glued-Laminated Timber**. AITC. Englewood, Colorado. 1990. 290p.
- AITC - AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION. **ANSI/AITC A190.1. American National Standard for Wood Products-Structural Glued-Laminated Timber**. AITC. Englewood, Colorado. 1992. 320p.
- AITC - AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION. **AITC 117-Design Standard Specification for Structural Glued-Laminated Timber**. AITC. Englewood, Colorado. 1993a. 314p.
- AITC - AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION. **AITC 117-Manufacturing Standard Specification for Structural Glued-Laminated Timber**. AITC. Englewood, Colorado. 1993b. 314p.
- AITC - AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION. **AITC 119 Standard Specification for Hardwood Glued-Laminated Timber**. AITC. Englewood, Colorado. 1995. 432p.

- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3737 Standard Method for Establishing Stresses for Structural Glued Laminated Timber (Glulam)**. ASTM. West Conshohocken, Pennsylvania. 1992. 648p.
- AWPA - AMERICAN WOOD-PRESERVERS' ASSOCIATION. **P9 Standards for Solvents and Formulation for Organic Preservative Systems**. AWPA. Woodstock, Maryland. 1995a. 63p.
- AWPA - AMERICAN WOOD-PRESERVERS' ASSOCIATION. **C28 Standards for Preservative Treatment of Structural Glued-Laminated Members and Laminations Before Gluing of Southern Pine, Coastal Douglas Fir, Hem Fir and Western Hemlock by Pressure Process**. AWPA. Woodstock, Maryland. 1995b. 58p.
- AWPA - AMERICAN WOOD-PRESERVERS' ASSOCIATION. **P5 Standards for Waterborne Preservative**. AWPA. Woodstock, Maryland. 1995c. 63p.
- BAUER, K. Secagem solar de madeira de eucalipto em escala industrial. In: WORKSHOP – TÉCNICAS DE ABATE, PROCESSAMENTO E UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO. 1999, Viçosa, **Anais...** Viçosa. SIF, DEF, UFV, IEF. 1999. 75p.
- BEER, F. P., RUSSEL, E. **Resistência dos materiais**. Macron Books. São Paulo. 1995.1255p.
- BOWYER, J. Wood and Others Raw Materials for the 21st Century. **Forest Products Journal**. 45(2): 17-24. 1995.
- FCCWB - FORINTEC CANADA CORPORATION AND W.B. TRUSTY & ASSOCIATES. **Building Materials in the Context of Sustainable Development**. Forintec Canada Corporation. Vancouver, British Columbia, Canada. 1991. 110p.
- F.P.L. **Wood handbook: wood as an engineering material**. U.S. Government Printing. Washington. 1987. 466p.
- IBDF – INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL. **Norma para a classificação de madeira serrada de folhosas**. Ministério da Agricultura. Brasília, 1983. 67p.
- IPT- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Relatório Técnico DPFT/IBF n. 31.509/93**. IPT. São Paulo. 1993.

- JAHN, E., PRESTON, S. Timber: More Efficient Utilization. **Science**. v.191, n.4227, p.757-761, 1976.
- KOCH, P. Wood versus non-wood materials in U.S. residential construction: some energy-related global implications. **Forest Products Journal**, v.42, n.5, p.31-42, 1992.
- LIMA, M. F. Para vencer grandes vãos. **Revista de Tecnologia da Construção-Téchne**, v.2, n.11, p15-17, 1994.
- MENÁRD, S. **Glued engineered wood products**: an example of such an engineered product open joist 2000. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE PRODUTOS SÓLIDOS DE MADEIRA DE ALTA TECNOLOGIA – I SIMATEC. 1998, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte. SIF, UFV, DEF, 1998. 272p.
- MOODY, C.R. **Engineered wood products** - A guide for specifiers, designers and users. PFS Research Foundation. Madison, Wisconsin. 1997. 37p.
- OLIVEIRA, J. T. **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil**. São Carlos, SP, USP, 1997. 429p.
- PFEIL, W. **Estruturas de madeira**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos S.A.. 1994. 235p.
- PIMENTA, A.S. **Obtenção de adesivos fenólicos por copolimerização de fenol com alcatrão ou creosoto de eucalipto**. Viçosa, MG, UFV, 1995. 108p. Tese (Doutorado em ???) – Universidade Federal de Viçosa, 1995.
- PIZZI, A. **Advanced wood adhesives technology**. Marcel Decker Inc. New York. 1994. 288p.
- PONCE, H. R. Eucalipto como madeira serrada. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA FLORESTAL, 1, 1993, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte. SIF, UFV, DEF, 1993. 328p.
- RAMMER, D. R., SOLTIS, L. A. **Experimental Shear Strength of Glued-Laminated Beams**. United States Department of Agriculture. Madison. 1994. 38p. (Research Paper 527)

- SIEMON, G.R. **Modulus of rupture / modulus of elasticity relationships in some Queensland growth softwood.** Queensland Department of Forestry. Queensland. 1978. 4p. (Research note number 23)
- SPIB - SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU. **Standart Grading Rules for Southern Pine Lumber.** Pensacola: SPIB. 1994. 35p.
- SZÜCS, C.A., JODIN, P., PLUVINAGE, G. Ligação por peça de canto composta de madeira laminada colada reforçada por fibras de vidro. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 4, 1992, São Carlos. **Anais...** São Carlos: LaMEN-EESC-USP, 1992. v.3, p.65-78.
- SOUSA, Divisores de águas. **Revista de Tecnologia da Construção-Téchne,** v.3, n.16, p16-19. 1995.
- SUNLEY, J.G. **The strength properties of wood.** Lancaster: MTP Constrution. 1974. 248p.
- WAUGH. G. Sawing of young, fast grown eucalypts. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE PRODUTOS SÓLIDOS DE MADEIRA DE ALTA TECNOLOGIA –SIMATEC, 1, 1998, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: SIF, UFV, DEF, 1998. 271p.
- WWPA - WESTERN WOOD PRODUCTS ASSOCIATION. 1991. **Western Lumber Grading Rules.** Portland: WWPA. Oregon. 248p.