

JOSÉ GABRIEL DE LELLES

**UTILIZAÇÃO DE MADEIRA DE EUCALIPTO DE PEQUENAS
DIMENSÕES NA FABRICAÇÃO DE UMA PONTE PROTENDIDA
COM MADEIRA LAMINADA COLADA**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2007

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

T

L542u
2007

Lelles, José Gabriel de, 1938-

Utilização de madeira de eucalipto de pequenas dimensões na fabricação de uma ponte protendida com madeira laminada colada / José Gabriel de Lelles.

- Viçosa, MG, 2007.

xi, 81f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Ricardo Marius Della Lucia.

Tese (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 78-81.

1. Pontes - Projetos e construção. 2. Madeira - Testes.
3. Eucalipto. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

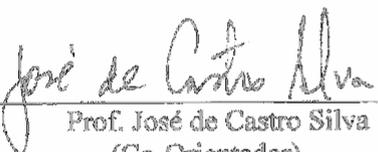
CDD 22.ed. 634.98335

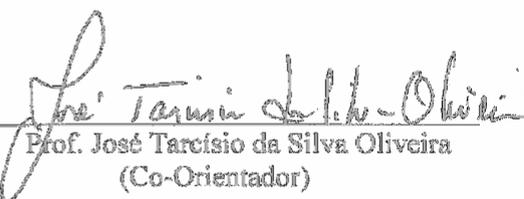
JOSÉ GABRIEL DE LELLES

**UTILIZAÇÃO DE MADEIRA DE EUCALIPTO DE PEQUENAS
DIMENSÕES NA FABRICAÇÃO DE UMA PONTE PROTENDIDA
COM MADEIRA LAMINADA COLADA**

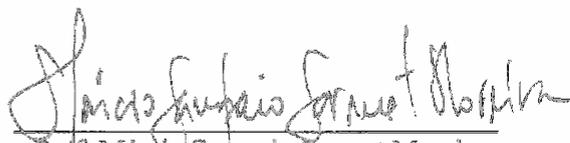
Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 17 de agosto de 2007.


Prof. José de Castro Silva
(Co-Orientador)


Prof. José Tarcísio da Silva Oliveira
(Co-Orientador)


Prof. Hélio Garcia Leite


Prof. Márcio Sampaio Sarmet Moreira


Prof. Ricardo Marius Della Lucia
(Orientador)

A Deus.

Aos meus pais e irmãos.

À minha esposa, Mariza.

Às minhas filhas e filho, Mara, Karina e Wladymir.

Às minhas netas, Júlia e Carolina.

*“Sei que a arte é irmã da ciência,
ambas filhas de um Deus fugaz. Que
faz um momento e no mesmo
desfaz”.*

Gilberto Gil

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Florestal, pela oportunidade de realizar o Curso de Doutorado em Ciências Florestais, área de concentração Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

Ao Instituto Estadual de Florestas (IEF), pelo recurso financeiro disponibilizado por meio do Convênio nº 01040504, celebrado entre o IEF/UFV/SIF, destinado à realização da pesquisa.

À Sociedade de Investigações Florestais (SIF), pela administração e controle contábil da aplicação do recurso disponibilizado pelo convênio.

Ao professor Ricardo Marius Della Lucia, pela excelente orientação e por ter sido um verdadeiro mestre na arte de ensinar (desafiador) e dividir talentos que lhe foram confiados.

Aos professores co-orientadores, José de Castro e Silva e José Tarcísio de Oliveira, pelos valiosos e constantes aconselhamentos.

Aos professores membros da banca examinadora, pelas sábias indagações, correções e sugestões.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Florestal, pelo carinho e pelos incentivos, em especial aos da pós-graduação, Ritinha e Frederico, e os do Laboratório de Propriedades da Madeira, Osvaldo, Fabiano e Arnaldo, que não mediram esforços para que a pesquisa fosse concluída em tempo hábil, apesar das dificuldades enfrentadas.

A todos os colegas do Departamento de Engenharia Florestal, pela amizade, pelo carinho e pelos incentivos, de modo especial ao professor Hélio Garcia Leite, co-responsável pela minha decisão de enfrentar este desafio.

Ao engenheiro civil, Rui Carlos de Oliveira, técnico de nível superior do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV, pelas valiosas sugestões.

Aos funcionários da marcenaria e carpintaria da UFV, em especial ao encarregado geral, Paulo Pinto Teixeira e seus comandados, Manoel, João, Mário Emídio, Valdir Valeriano, Manoel Silvério, Paulo Pinto Teixeira e Luiz Antônio.

À empresa Copener Florestal, pela doação da madeira utilizada na pesquisa.

Aos estagiários Pablo, Claudinha, Wagner, Ana Paula, Tatiana, Miguel, Patrícia, Hugo e Roserval, pela eficiente colaboração em todas as etapas do desenvolvimento da pesquisa.

Aos colegas de curso, pela amizade.

A todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para consecução deste trabalho, e tiveram seus nomes aqui omitidos.

BIOGRAFIA

JOSÉ GABRIEL DE LELLES, filho de José Pereira Lelles e Maria da Conceição de Lelles, nasceu em São Miguel do Anta, Estado de Minas Gerais, em 8 de janeiro de 1938.

Em dezembro de 1965, concluiu o curso de Engenharia Florestal pela Escola Nacional de Floresta – Universidade Federal do Paraná.

Em março de 1966, foi contratado como professor auxiliar pela Universidade Rural do Estado de Minas Gerais, atualmente Universidade Federal de Viçosa, sendo hoje Titular, exercendo atividades de ensino, pesquisa e extensão em áreas relacionadas com Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

Em dezembro de 1977, concluiu o Programa de Pós-Graduação, em nível de mestrado, em Ciência Florestal, área de concentração Tecnologia da Madeira, pela Universidade Federal do Paraná.

Em agosto de 2002, na Universidade Federal de Viçosa, iniciou o Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, em nível de doutorado, área de concentração Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais, defendendo tese em agosto de 2007.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	viii
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	3
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. A madeira como material estrutural	4
2.2. O eucalipto	5
2.3. A madeira na fabricação de pontes	8
2.3.1. As pontes protendidas	8
2.3.1.1. Comportamento estrutural – sistema de protensão	12
2.3.1.2. Seqüência de procedimentos na construção - ponte com altura constante	12
2.3.1.3. Tensões de protensão e parâmetros elásticos	14
2.3.1.4. Perdas de protensão	17
2.3.1.5. Juntas de topo	19
2.3.1.6. Modelos de cálculo	20
2.4. Pontes de madeira no Brasil e em outros países	21
2.4.1. Brasil	21
2.4.2. América do Norte	22

	Página
2.4.3. Austrália	23
2.5. Propriedades físicas e mecânicas da madeira relacionadas com aplicação em pontes.....	23
2.5.1. Normas para o ensaio de determinação das propriedades da madeira	23
2.5.2. Propriedades da madeira relacionada à aplicação em pontes.....	24
2.5.2.1. Propriedades físicas.....	24
2.5.2.2. Propriedades mecânicas	27
2.6. Resistência à flexão estática	28
2.7. Principais propriedades das madeiras utilizadas para pontes em diversos países	32
3. METODOLOGIA	43
3.1. Descrição e caracterização físico-mecânica da madeira	44
3.2. Preparo das tábuas a serem utilizadas no tabuleiro da ponte	45
3.3. Determinação da rigidez da tábua individual.....	47
3.4. Montagem da ponte	48
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
4.1. Caracterização física e mecânica da madeira empregada	54
4.2. Caracterização das tábuas laminadas	58
4.2.1. Rigidez das tábuas	58
4.2.2. Massa específica das tábuas	68
4.2.3. Defeitos nas tábuas indicados pela velocidade de propagação de ondas de tensão	71
4.3. Avaliação experimental do comportamento do tabuleiro	72
5. CONCLUSÕES	76
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

RESUMO

LELLES, José Gabriel de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2007.

Utilização de madeira de eucalipto de pequenas dimensões na fabricação de uma ponte protendida com madeira laminada colada. Orientador: Ricardo Marius Della Lucia. Co-Orientadores: José de Castro Silva e José Tarcísio da Silva Oliveira.

O presente estudo teve como objetivo construir e avaliar o comportamento de um tabuleiro de ponte rodoviária de madeira com 6 m de comprimento, 3,5 m de largura e 0,24 m de espessura, quando submetido a uma carga de 13 t. O tabuleiro foi construído com tábuas produzidas a partir de toras de eucalipto de diversas espécies, provenientes de desbastes, com diâmetro médio de 2,5 m e idades variando de 8 a 19 anos. Para a montagem do tabuleiro, adotou-se o sistema construtivo madeira laminada tensionada, em que 100 tábuas previamente selecionadas e testadas quanto à rigidez e perfuradas ao longo de suas linhas neutras a distâncias calculadas receberam barras de aço de protensão. O número de barras utilizadas permitiu, por ocasião da protensão, um esforço de compressão perpendicular na madeira equivalente a 0,7 MPa, suficiente para enrijecer o tabuleiro. As tábuas de 0,035 m de espessura, 0,24 m de largura e 6 m de extensão foram produzidas por adesão, com adesivo resorcinol-formaldeído aplicado a uma taxa de 300 g/m², de três caibros de 0,035 m de espessura e 0,08 m de comprimento, uma vez que as toras, de pequenas dimensões, só permitiram a obtenção desse material de bitola pequena. Todas as tábuas foram ensaiadas, após a cura do adesivo, em quadro de reação, para determinação de sua rigidez à flexão e

eliminação daquelas que sofressem ruptura quando nelas era aplicada uma carga central, em vão de 5,8 m. A carga máxima foi calculada como sendo o dobro daquela necessária para produzir uma deflexão central igual a admissível, tomada como sendo $L/350$. Valores de cargas e deflexões foram tomados de maneira tradicional, com células e relógios comparadores. O módulo de elasticidade médio atingiu 14.874 MPa, com desvio-padrão de 1.985 MPa e coeficiente de variação de apenas 13%. O tabuleiro assim obtido foi montado sobre uma estrutura de apoio, constituída de dois blocos de madeira quadrada, representando os encontros da ponte. Rampas de baixo ângulo foram também montadas, para permitir a subida do veículo. Deflectômetros registradores e relógios-comparadores, foram montados sob a ponte. Os primeiros permitiram determinar, após a passagem do veículo, a magnitude de deflexão transversal; os relógios forneceram a magnitude da deflexão longitudinal. A deflexão transversal, que atingiu valores máximos em dois locais sob as rodas do veículo, não ultrapassou 3,7 mm nesses pontos. A deflexão longitudinal, cujo máximo ocorreu na metade do comprimento do tabuleiro, atingiu um valor de 3,2 mm. Esses dois valores são muito inferiores aos admissíveis, permitindo concluir que o valor adotado para protensão foi suficiente para que o tabuleiro adquirisse uma configuração estável e rídiga.

ABSTRACT

LELLES, José Gabriel de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2007. **Use of small-sized eucalyptus wood to build a pre-stressed bridge with glued-laminated timber.** Adviser: Ricardo Marius Della Lucia. Co-Advisers: José de Castro Silva and José Tarcísio da Silva Oliveira.

This study aimed to build and evaluate the behavior of a highway stress-laminated timber bridge deck measuring 6m in length, 3.5 m width and 0.24 m thickness submitted to a load of 13 t. The deck was built with laminations made from eucalyptus logs of various thinning-originated specimens, with a mean diameter of 2.5 m and ages ranging between 8 and 19. To build the deck, the constructive system stress-laminated timber was adopted in which 100 laminations previously selected and tested for rigidity and perforated along their neutral lines at calculated distances received tensioning steel bars. During stressing, the number of bars used provided perpendicular interlaminar compression equivalent to 0.7 MPa, sufficient to make the deck rigid. The 0.035 m thick, 0.24 m wide and 6 m long laminations were produced by applying resorcinol-formaldehyde adhesive at a rate of 300 g/m² on three 0.035 m thick and 0.08 m wide laminations. After the cure of the adhesive, the timber was assayed to determine rigidity in flexure and eliminate timber that failed when submitted to a central load in a 5.8 m span. Maximum load was calculated as being double that necessary to produce a central deflection equal to the allowable, considered as being L/350. Load and deflection loads were determined conventionally, using deflectometers. Mean elasticity module reached

14.874 MPa, with standard deviation of 1.985 MPa and coefficient of variation of only 13%. The deck thus obtained was built on a supporting structure constituted of two square timber blocks representing the bridge approaches. Low angle ramps were also built to allow vehicle traffic. Deflectometers were installed under and along the bridge. The former allowed determining the magnitude of transversal deflection after vehicle traffic; the latter supplied the magnitude of longitudinal deflection. Transversal deflection, which reached maximum values in two points under the vehicle wheels, did not surpass 3.7 mm at these points. Longitudinal deflection, whose maximum value occurred at half the deck length, reached a value of 3.2 mm. These two values are quite inferior to the admissible ones, leading to the conclusion that the value adopted for stressing was sufficient for the deck to acquire a stable and rigid configuration.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui grande extensão territorial que ainda não foi efetivamente ocupada, criando dificuldades para otimizar seu desenvolvimento socioeconômico.

A continuidade do bom desempenho nas atividades relacionadas com o agronegócio, a exploração, o transporte, o beneficiamento e a comercialização de recursos naturais prevê ocupação racional de novas fronteiras, notadamente das regiões Centro-Oeste e Amazônica.

O aço e o concreto indiscutivelmente são bons materiais para construção de pontes. Sua utilização nas regiões citadas, no entanto, envolve altos custos em transporte, devido às grandes distâncias. Além disso, a utilização da madeira tem caráter renovável, ao contrário do aço e do cimento, que demandam grande quantidade de energia em sua produção.

A madeira, em decorrência de sua alta resistência em relação ao próprio peso e à alta durabilidade, quando tratada, apresenta-se como alternativa adequada para construção de pontes para vãos de até 30 m, podendo sua construção ser efetuada em menor tempo que as pontes construídas com os materiais tradicionais.

As regiões carentes em infra-estrutura rodoviária possuem grande disponibilidade de madeiras tropicais, tecnologicamente adequadas para os propósitos mencionados. Nas demais regiões do País são encontradas dificuldades em obter as tradicionais madeiras de florestas nativas aptas para construção de pontes. O uso da madeira advinda de reflorestamento, principalmente do gênero *Eucalyptus*, é uma excelente alternativa, especialmente em pontes rodoviárias.

A tecnologia de produção da madeira de reflorestamento, em especial o eucalipto, está bem avançada em todo o País, sendo uma alternativa para construção de pontes, podendo gerar outras fontes de renda para as populações locais.

A efetiva e racional ocupação do território nacional implicará altíssimos investimentos em estruturas para transporte, envolvendo não só a recuperação das estradas já existentes, mas também a abertura e conservação de novas estradas, principalmente vicinais e rurais.

A malha rodoviária do Brasil é composta por 1.724.924 km de estradas. Sob a jurisdição de municípios brasileiros existe cerca de 84% de toda a sua malha, correspondente a 1.446.199 km, constituída por pontes de madeira, tradicionalmente utilizadas para vencer pequenos e médios vãos. A utilização da madeira de reflorestamento apresenta menores custos de implantação e manutenção, quando comparada com os materiais tradicionais, para construção de pontes; esta situação se apresenta como uma alternativa estratégica e econômica, especialmente quando se considera que os recursos disponíveis nos municípios nem sempre são suficientes para permitir a construção de pontes com os materiais tradicionais.

Devido a essa necessidade de ampliar e manter as malhas rodoviárias nacionais, desenvolveu-se uma série de pesquisas com pontes de madeira.

O diferencial na construção das novas pontes é uma série de detalhes, que vai do prévio tratamento da madeira à forma como as peças são dispostas na montagem. Entre os inúmeros novos sistemas propostos destacam-se as pontes com tabuleiro ortotrópico com lâminas protendidas transversalmente e as soluções mistas com o tabuleiro formado por vigas de madeira conectados com laje de concreto armado. Todas podem ser utilizadas em cidades, estradas municipais e rodovias estaduais ou federais, inclusive de grande tráfego, sem restrição de carga, porque são projetadas segundo as mesmas normas de ações e segurança das estruturas prescritas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Diante das crescentes dificuldades para obtenção de madeira, aliadas à falta de política que permita a exploração sustentada e racional das florestas tropicais, este estudo é justificado pelos seguintes motivos:

- Carência de informações quanto às propriedades das madeiras do gênero *Eucalyptus*, notadamente daquelas com potencial de uso múltiplo, principalmente para fabricação de pontes.

- Grande demanda de madeira de qualidade a curto prazo e pressões econômicas para resultados imediatos.

- Necessidade de estudo das propriedades da madeira, identificando e avaliando as vantagens e as limitações de uso da madeira em peças estruturais e fabricação de pontes.

- Altas taxas de produtividade dos plantios florestais, espécies de elevada plasticidade e adaptação do eucalipto em boa parte do território brasileiro.

- Maior possibilidade de agregação de valor à madeira, com a incorporação de inovações tecnológicas, qualificando-a para usos alternativos mais nobres, como usos estruturais e fabricação de pontes.

- Necessidade de substituição das espécies nativas convencionais pela madeira de eucalipto com propriedades semelhantes. Essa necessidade de substituição se justifica pela escassez dessas espécies e pelas restrições de caráter ambiental.

- Possibilidades de uso da madeira e tecnologia inovadora de pontes em regiões carentes de infra-estrutura rodoviária.

- Criação de oportunidades e facilidades de expansão agropecuária e interiorização, através da abertura e conservação de novas estradas.

1.1. Objetivos

Este trabalho teve como objetivo geral a avaliação de desempenho e rigidez de um tabuleiro (testadas como vigas em quadro de reação) de ponte rodoviária, constituído de tábuas de madeira de eucalipto laminada e colada, suportando o peso de um veículo.

Como objetivos específicos destacam-se:

- Caracterizar a madeira de clones e híbridos do gênero *Eucalyptus* (obtida de povoamentos localizados na região nordeste da Bahia) em relação à massa específica, retratibilidade, flexão estática, flexão dinâmica, dureza, cisalhamento, compressão perpendicular e paralela às fibras.

- Confeccionar tábuas, a partir de colagem de peças menores.

- Avaliar um processo de detecção de defeitos de colagem por intermédio da medição da velocidade de propagação de ondas de tensão no interior da madeira.

- Montar tabuleiro de uma ponte, utilizando vigas coladas, unidas por barras de aço protendidas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. A madeira como material estrutural

A madeira é um material abundante no Brasil, é versátil, possui baixo ônus ambiental (muito menor que outros materiais) e é renovável. Além disso, possui elevada relação resistência/peso, o que possibilita a construção de estruturas mais leves. Possui, também, alta capacidade de absorção de cargas de curta duração e baixo custo tecnológico, não necessitando de equipamentos especiais e nem de mão-de-obra altamente qualificada para a sua construção, além de permitir a pré-fabricação e industrialização.

O que tem impedido a maior utilização da madeira como material estrutural no Brasil são os conceitos errados sobre o material e a falta de informações de suas características e possibilidades de aplicação. Ao contrário da crença popular, grandes elementos de madeira possuem resistência ao fogo igual ou superior a outros materiais, e são extremamente duráveis quando protegidos por tratamentos preservativos, ou quando são protegidos da ação direta de intempéries. A prova disso é que muitas pontes construídas no século XIX ainda estão em uso. Outro fato favorável é que quando são aplicados tratamentos que impedem o ataque biológico a madeira requer pouca manutenção. Do ponto de vista econômico, ela é competitiva com outros materiais, considerando-se os custos iniciais, e vantajosa sobre eles, quando comparados os custos a longo prazo. No Brasil a madeira ainda é pouco utilizada como um material estrutural,

se comparado com outros países, como Canadá, Estados Unidos, Austrália, Suíça e Japão (ABDALLA, 2002).

Além da viabilidade técnica que apresenta para construção de edificações, a madeira é numa matéria-prima que se insere em um modelo de sustentabilidade do meio ambiente. Desde que proveniente de florestas manejadas racionalmente, consegue-se colocar em sintonia com as exigências de preservação ambiental, por se tratar de um insumo natural e renovável. Destacam-se as florestas plantadas, principalmente de espécies exóticas como *Pinus* e *Eucalyptus*, que além de sustentáveis aliam alta produtividade e homogeneidade de matéria-prima, ao contrário da madeira proveniente de matas nativas.

As novas tecnologias na implantação, a silvicultura, o manejo e o melhoramento têm permitido ao Brasil substituir a madeira proveniente das matas nativas por madeiras de florestas plantadas. As florestas cultivadas são bem localizadas e vêm fornecendo madeira a um custo mais competitivo, permitindo antever que, em futuro próximo, as florestas nativas se restringirão ao fornecimento de bens e serviços ambientais, ficando a matéria-prima madeira a cargo das florestas cultivadas.

2.2. O eucalipto

O setor industrial de base florestal tem sido marcado por um processo de utilização crescente de madeiras provenientes de reflorestamento, colocando o Brasil em sintonia com a ordem mundial, que enfatiza a preservação das florestas naturais e incentiva a implantação de florestas renováveis. O gênero *Eucalyptus* se apresenta como grande alternativa para produção de madeira nos próximos anos e a indústria já aposta na sua disponibilidade para os futuros suprimentos de matéria-prima (SILVA, 2002).

O descompasso crescente entre oferta e demanda de madeira, nos mercados interno e externo, tenderá a favorecer o quadro de substituição das madeiras nativas pela madeira de eucalipto. A utilização crescente de madeiras provenientes de reflorestamento tem se tornado mais evidente nos últimos anos, sobretudo em razão dos questionamentos legais existentes em relação à exploração das florestas nativas, quer seja por razões ecológicas, quer seja pela elevação dos preços de suas madeiras, devido às dificuldades da exploração da floresta tropical e às grandes distâncias entre as zonas de produção e de consumo.

A indústria dos produtos à base de madeira tem se defrontado com desafios que estão provocando drásticas mudanças. O primeiro grande desafio é a crescente expansão dos mercados para a madeira proveniente de florestas plantadas, exemplificado pela crescente força mercadológica dos “selos verdes” em todo o mundo. O segundo desafio é a globalização dos mercados consumidores, com a conseqüente necessidade de aumento na produtividade e o atendimento a padrões de qualidade, cada vez mais exigentes. Este cenário tem estimulado a exploração da madeira de reflorestamento, principalmente das espécies do gênero *Pinus* e *Eucalyptus*.

O *Eucalyptus* pertence a família Myrtaceae e é um dos gêneros mais plantados no mundo, possuindo mais de 700 espécies botânicas, apropriadas para os mais diversos usos do setor industrial madeireiro. É considerado muito importante para a economia de mais de 100 países, envolvendo, atualmente, uma área plantada superior a 19 milhões de hectares no mundo (SILVA e XAVIER, 2006). O eucalipto é nativo principalmente da Austrália, da Tasmânia e de algumas ilhas ao norte (Java, Filipinas, Papua, Timor, entre outras).

No Brasil, o seu cultivo em escala econômica deu-se a partir de 1904, através do trabalho do silvicultor Edmundo Navarro de Andrade, para atender à demanda de madeira da Companhia Paulista de Estradas de Ferro (ANDRADE, 1961). A partir de 1965, com a lei de incentivos fiscais, a área de plantio do eucalipto aumentou, em poucos anos, de 500 mil para mais de 3 milhões de hectares. Os primeiros plantios apresentavam produtividade média, aos 7 anos, de $10 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ de madeira. Graças aos programas de melhoramento genético, técnicas de adubação e condução de florestas, a produtividade saltou para $40 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$. Atualmente, essa produtividade pode atingir além de $50 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$, envolvendo clones de alta produtividade, com padrões de qualidade que atende a todos os requisitos industriais. Em um sistema de manejo apropriado, pode-se obter madeira para lenha, mourões, carvão ou celulose num ciclo de cinco a dez anos de idade, e madeira para serraria, num ciclo de 15 anos.

Segundo Silva e Xavier (2006), o eucalipto é considerado muito importante para a economia de muitos países e para o Brasil ele é considerado estratégico, pois se torna matéria-prima para muitos certos produtos, como celulose, carvão, lenha, painéis, postes, dormentes, mourões, serrados, móveis, embalagens, entre outros. As sete espécies mais importantes nos plantios florestais no Brasil, em termos de produtividade, são: *Eucalyptus grandis*, *E. saligna*, *E. urophylla*, *E. camaldulensis*, *E. tereticornis*, *E.*

cloeziana, *Corymbia citriodora*. Sem dúvida, é o gênero potencialmente mais apropriado para as condições brasileiras, em função das suas inúmeras vantagens, como:

- rápido crescimento volumétrico e potencialidade para produzir árvores de boa forma;
- produção de elevada quantidade de sementes e facilidade de propagação vegetativa;
- adequação aos mais diferentes usos industriais, devido ao grande número de espécies;
- substituição, com semelhante desempenho, das madeiras de florestas nativas;
- rotação curta (cinco a sete anos); e
- possibilidades de uso múltiplo, mediante a flexibilização de programas de manejo e diferenciação de idades de corte. Uma mesma espécie permite a obtenção de multiprodutos, podendo, por exemplo, ser utilizada para fabricação de celulose e de móveis, quando cortada aos sete e 20 anos, respectivamente.

As potencialidades do eucalipto como fornecedor de matéria-prima de qualidade para os diversos usos industriais já se encontram demonstradas, estando razoavelmente definidos os parâmetros de qualidade da madeira a serem exigidos para essas aplicações. As perspectivas de utilização intensiva da madeira de eucalipto são muito promissoras e têm por base o conhecimento já acumulado sobre a silvicultura e o manejo de várias espécies do gênero. O Brasil é um país de grande dimensão, que possui condições de clima e solo altamente favoráveis para implantação de plantios de rápido crescimento. O desenvolvimento do eucalipto, em várias partes do Brasil, tem demonstrado resultados excelentes, com alta produtividade e ciclos de cortes curtos, bem diferentes dos países de grande tradição florestal, como a Suécia, o Canadá e a Finlândia, cujos ciclos nunca são inferiores a 60 e 70 anos.

Segundo Couto (1995), a participação do gênero *Eucalyptus* no setor industrial de base florestal é importante e decisiva na substituição das madeiras nativas e racionalização do uso, através de produtos renováveis, como chapas, painéis e “produtos engenheirados”. A sua utilização contribui, ainda, para diminuir a dependência das reservas de materiais não-renováveis, já que é uma fonte natural disponível em todo o mundo e a sua provisão, mediante uma gestão adequada, é praticamente inesgotável.

Segundo Ponce (1997), a madeira proveniente de plantios de rápido crescimento deve ser considerada como matéria-prima diferente daquela madeira resultante de ciclo longo. Os profissionais da área de processamento, por esse motivo, deverão aperfeiçoar

os processos de conversão, no sentido de adequação dessas madeiras a um melhor desempenho. Segundo o autor, há necessidade de esforços cada vez maiores dos pesquisadores, no sentido de adequação de tecnologias de processamento às espécies já introduzidas, e também um criterioso estudo de seleção de espécies e melhoramento genético, visando à obtenção de material adequado às novas exigências do mercado nacional e para atendimento ao mercado internacional.

2.3. A madeira na fabricação de pontes

O aço e o concreto, indiscutivelmente, são bons materiais para construção de pontes. A sua utilização, no entanto, requer altos investimentos, devido às grandes distâncias dos centros produtores. Além disso, a utilização da madeira tem um caráter renovável, ao contrário do aço e do cimento, que demandam, inclusive, grande quantidade de energia em sua produção.

A madeira, em decorrência de sua alta resistência em relação ao peso próprio e à alta durabilidade, quando tratada, apresenta-se como uma alternativa adequada para a construção de pontes para vãos de até 30 m, sendo sua construção efetuada em menor tempo, em relação às pontes construídas com os materiais tradicionais.

Regiões carentes em infra-estrutura rodoviária poderiam utilizar as madeiras disponíveis, especialmente para fabricação de pontes localizadas em estradas vicinais, seja na abertura ou na conservação de novas estradas. A utilização da madeira, especialmente de reflorestamento, em decorrência dos menores custos de implantação e manutenção, quando comparados com os de materiais tradicionais, para construção de pontes, apresenta-se como uma alternativa estratégica e econômica, especialmente quando se considera que os recursos disponíveis nos municípios nem sempre são suficientes para permitir a construção de pontes com os materiais tradicionais.

2.3.1. As pontes protendidas

O sistema laminado protendido consiste basicamente na protensão transversal de um conjunto de peças (tábuas) de madeira dispostas longitudinalmente, umas adjacentes às outras, com emprego de barras ou cabos de aço de alta resistência. Quando o conjunto é submetido a ações transmitidas pelas rodas, a protensão evita o deslocamento

relativo entre as tábuas adjacentes devido à força de atrito resultante, permitindo a ocorrência de esforços de flexão (M+Q) na direção transversal. Desta forma, o conjunto comporta-se como uma placa ortotrópica capaz de distribuir lateralmente as cargas dos veículos e de resistir à flexão transversal.

Segundo Okimoto (1997), o emprego de pontes de madeira com tabuleiro protendido teve origem no Canadá, em 1976, na recuperação de tabuleiros de madeira laminada pregada que apresentavam problemas de separação das lâminas. O sistema laminado pregado consiste em vigas ou lâminas de madeira serrada, posicionadas uma ao lado da outra ao longo do vão e conectada entre si por pregos. Devido à solitação dinâmica da ponte e à agressividade química provocada pelo sal utilizado para descongelar a superfície de tráfego das pontes, que atacava os elementos de aço das ligações, surgiram diversos problemas que comprometiam o desempenho estrutural do conjunto, destacando-se a separação das lâminas dos tabuleiros pregados, com perda da continuidade transversal do tabuleiro e da capacidade de distribuição transversal das ações das rodas, resultando em que apenas as peças imediatamente abaixo das rodas eram solicitadas.

No entanto, como a madeira estava em perfeitas condições, foram utilizadas barras tracionadas transversais ao tabuleiro, para comprimirem as peças de madeira e refazerem a sua continuidade transversal e a correspondente capacidade resistente. Com uma força de protensão adequada, previne-se que as lâminas se separem nas faces de contato na parte inferior das fibras quando as forças são aplicadas perpendicularmente ao plano do tabuleiro. Como resultado, a ponte voltou a operar com a capacidade de tráfego prevista em projeto, demonstrando a eficiência estrutural deste novo sistema, cujo estudo e aplicação foram estendidos para projetos de novas construções.

Assim, o bom desempenho estrutural dos tabuleiros recuperados com essa técnica viabilizou sua aplicação na construção de novas pontes. As pontes laminadas protendidas transversalmente têm sido estudadas em várias partes do mundo e já somava mais de 2.500 unidades construídas, em vários países, como Estados Unidos, Austrália, Canadá, Japão, Alemanha e outros, sempre mostrando elevado desempenho, durabilidade, facilidade e rapidez de execução, e custos competitivos, conforme Prata (1995), autor do primeiro estudo brasileiro sobre o assunto, no qual foram analisados os parâmetros elásticos para a madeira de *Eucalyptus citriodora*, com vistas à sua utilização como matéria-prima para essas pontes.

Em trabalho desenvolvido no LaMEM - SET - EESC - USP, Okimoto (1997) constatou a aplicabilidade do sistema protendido transversalmente para as madeiras de reflorestamento eucaliptos e pinus, determinou a rigidez transversal do sistema laminado, avaliou o efeito da perda de protensão com o tempo e desenvolveu diretrizes que orientam o projeto e dimensionamento dessas estruturas, baseando-se nas normas vigentes no país. Okimoto (2001) estudou os efeitos da presença e da frequência de juntas de topo na rigidez do tabuleiro.

A aplicação de protensão transversal em tabuleiros laminados de madeira, por meio da inserção de barras de aço de alta resistência em furos executados nas lâminas, perpendicularmente às fibras da madeira, comprimindo-as, confere ao tabuleiro um comportamento de placa, mobilizando o conjunto das peças longitudinais com o carregamento dos veículos, e não somente uma área próxima à aplicação das ações. Dessa forma, o sistema apresenta baixo consumo de madeira (cerca de 0,30 m³ por metro quadrado de ponte), o que diminui o custo da superestrutura e das fundações (FONTE, 2004). Na Figura 1 encontra-se uma representação (planta, seção transversal e elevação) de tabuleiro laminado protendido (OKIMOTO, 1997).

Os tabuleiros protendidos com seção transversal de altura constante, do tipo ponte em laje, são os mais utilizados para vãos menores que 10 m. Em pontes com maiores vãos foram avaliadas formas estruturais alternativas mais eficientes para a seção transversal, como T, seção caixão e outras, ver Figuras 1 e 2. No sistema denominado ponte protendida com vigas-T, o tabuleiro é constituído por peças de madeira serrada e as nervuras são formadas por vigas de madeira serrada, MLC ou LVL – de peças lâminas de pequena espessura coladas entre si com as fibras orientadas na mesma direção.

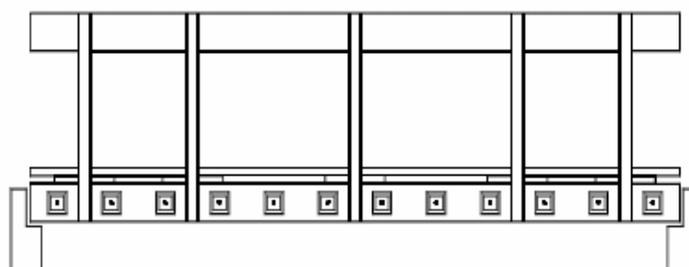
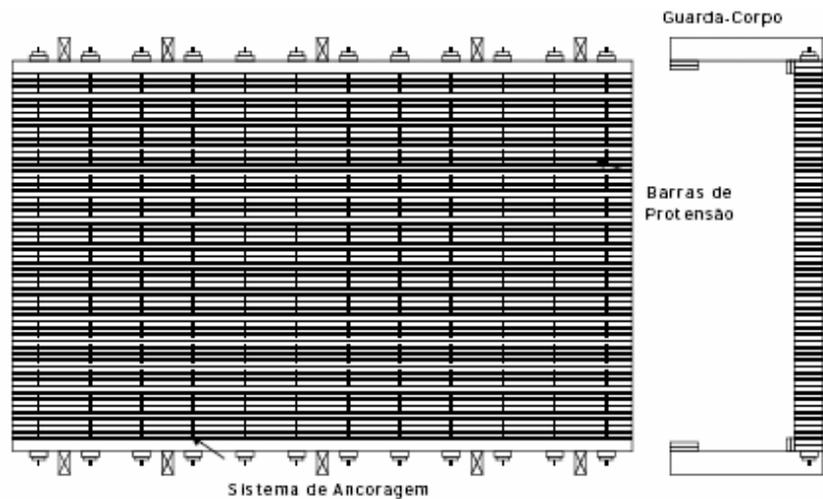
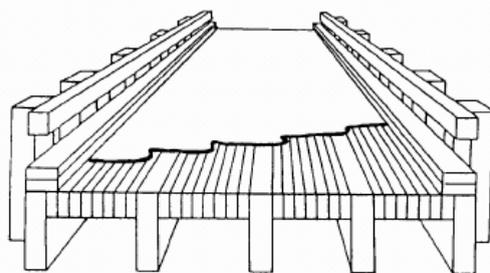
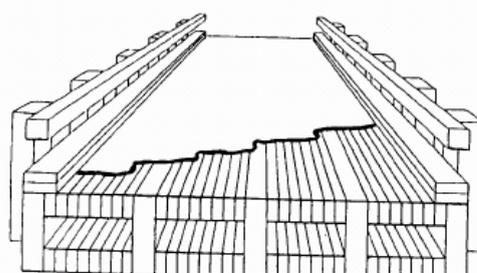


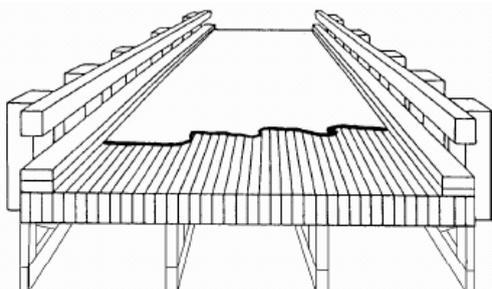
Figura 1 – a) Planta e seção transversal de tabuleiro laminado protendido; b) Elevação de tabuleiro laminado protendido (OKIMOTO, 1997).



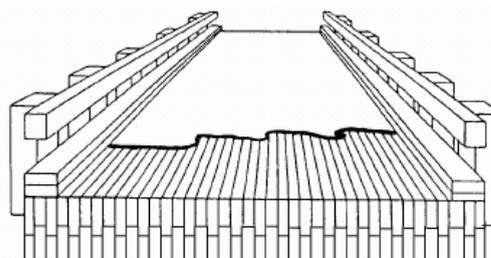
(a) Seção T



(b) Seção celular



(c) Seção com vigas T-treliçadas



(d) Seção mista

Figura 2 – Formas estruturais alternativas para maiores vãos (OKIMOTO, 1997).

2.3.1.1. Comportamento estrutural - sistema de protensão

A protensão transversal das peças longitudinais de madeira estabelece para o tabuleiro um comportamento de placa ortotrópica, sendo necessário para tanto garantir a ausência de escorregamento entre as lâminas e também, evidentemente, evitar a ruptura das lâminas de madeira por solicitação normal às fibras. A primeira exigência é atendida com a garantia de que o nível de protensão esteja dentro de uma faixa de projeto durante toda a vida útil da obra. Como as perdas de protensão do sistema podem ser bastante elevadas, torna-se necessário que elas sejam consideradas no projeto e que se utilizem técnicas que minimizem essas perdas.

Segundo Okimoto (1997), o sistema de protensão dos tabuleiros de altura constante pode ser constituído por cabos ou barras de aço de alta resistência, com diâmetros nominais entre 15 e 32 mm. Essas barras são tensionadas com o uso de cilindros hidráulicos e ancoradas por um conjunto de porca sextavada, placa de ancoragem e placa de distribuição de aço comum, que estão nas vigas externas de madeira, conforme mostrado na Figura 3.

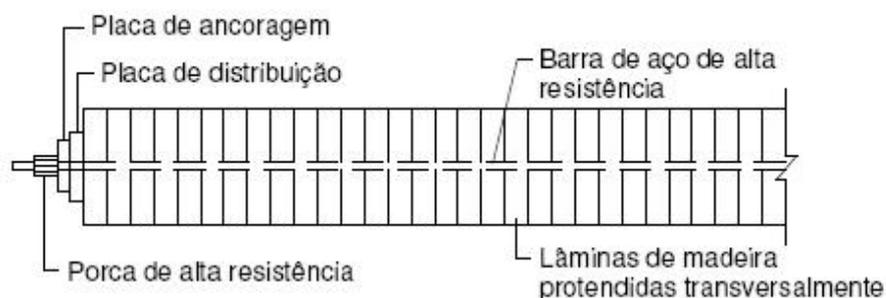


Figura 3 - Sistema para aplicação da protensão transversal.

2.3.1.2. Seqüência de procedimentos na construção - ponte com altura constante

Na Figura 4 apresenta-se um conjunto de fotos representativas das principais operações de construção de uma ponte protendida de madeira (FONTE e CALIL JÚNIOR, 2007).



Figura 4 – Sequência de procedimentos na construção de ponte de madeira protendida com altura constante (FONTE e CALIL JÚNIOR, 2006).

- Corte e aparelhamento das peças de madeira.
- Furação das peças de madeira, com emprego de um gabarito de furação.
- Pré-montagem do tabuleiro, inserindo-se cada lâmina de madeira em um conjunto inicial formado pelas barras de protensão e algumas lâminas.
- Protensão inicial do tabuleiro, tomando-se o cuidado de respeitar os limites de escoamento das barras, com segurança. Se o tabuleiro for montado em fábrica ou laboratório, pode ser aplicada somente uma pré-protensão, bastante inferior à necessária.
- Içamento e transporte: esta etapa é necessária quando o tabuleiro não for montado no local de implantação da ponte.
- Instalação: o tabuleiro deve ser posicionado no local, e a protensão deve ser reaplicada.
- Revestimento da ponte por meio de mistura asfáltica.
- Reprotensões: dependendo da espécie de madeira, são necessárias reprotensões no tabuleiro. Recomenda-se revisão das forças e reaplicação, se necessário, aos 2, 7 e 60 dias.

2.3.1.3. Tensões de protensão e parâmetros elásticos

Para estabelecer uma tensão de protensão adequada é necessário, a partir da rigidez do material na direção longitudinal – definida pelo módulo de elasticidade longitudinal (EL), avaliar a influência de sua intensidade sobre os demais parâmetros elásticos do tabuleiro, definidos pelo módulo de elasticidade na direção transversal (ET) e módulo de elasticidade transversal (GLT). Além disso, devem ser impostas restrições que garantam valores mínimos para a capacidade de transmissão transversal do cisalhamento e evitem o esmagamento da madeira nessa mesma direção.

Okimoto (1997) avaliou a flexão e a torção de placas de *Pinus Elliottii* (*Pinus elliottii* var. *elliottii*) e eucalipto citriodora (*Eucalyptus citriodora*) sob as tensões 0,3, 0,5, 0,7, 0,8 e 0,9 MPa. Os parâmetros elásticos E_T e G_{LT} foram obtidos em função de EL. A aplicação da protensão igual a 0,3 MPa não apresentou resultados satisfatórios para as placas de Eucalipto Citriodora, pois não desenvolveu atrito suficiente e ocorreram deslizamentos entre as lâminas. A aplicação dos demais valores está representada na Figura 5.

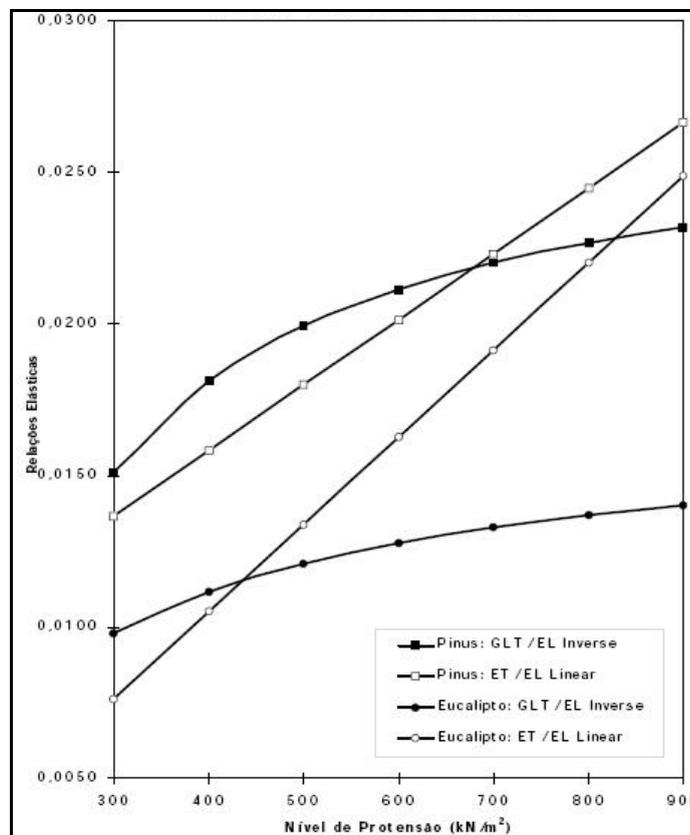


Figura 5 – Curvas de relações entre parâmetros elásticos para as madeira *Pinus elliottii* e *Eucalyptus citriodora* (OKIMOTO, 1997).

Com base na análise da Figura 5, o autor chegou às seguintes constatações:

i) que tensões maiores que 0,7 MPa não ocasionam aumentos significativos nos valores de G_{LT} ; e

ii) Há tendência de estabilização dos valores de G_{LT} para as tensões maiores que 0,9 MPa.

Segundo Crews^{1/} (1998), *apud* Fonte e Calil Júnior (2006), o fator mais crítico para o projeto e a manutenção dos sistemas protendidos transversalmente é alcançar e manter a força de protensão adequada entre as lâminas, de tal modo que a atuação como placa ortotrópica seja mantida e o tabuleiro resista efetivamente às cargas aplicadas. Os ensaios e o monitoramento de campo na Austrália e nos Estados Unidos demonstraram que os tabuleiros protendidos de seção com altura constante comportam-se de modo elástico-linear quando a protensão mínima no tabuleiro é mantida na ordem 0,5 MPa para madeiras macias (*softwoods*) e 0,7 MPa para madeiras duras (*hardwoods*).

Com o objetivo de estudar o comportamento estrutural das pontes protendidas de madeira com seção transversal de altura constante e pequenos vãos, Okimoto (1997) avaliou em laboratório placas de *Pinus elliottii* (classe C 25 - conífera) e eucalipto citriodora (classe C 40 - dicotiledônea) submetidas à flexão longitudinal para determinação do E_L , à torção a 0° para determinação do G_{LT} e à torção a $\pm 45^\circ$ para determinação do E_T . O ângulo especificado é entre os eixos principais geométricos e os eixos de ortotropia elástica. As relações elásticas obtidas em função da tensão de protensão σ_N foram:

- Para a madeira C25:

$$E_T/E_L = 0,0000216 \cdot \sigma_N + 0,00715 \quad (1)$$

$$G_{LT}/E_L = 0,02731989 - 3,75205953 \cdot (\sigma_N)^{-1} + 26,60058663 \cdot (\sigma_N)^{-2} \quad (2)$$

- Para a madeira C40:

$$E_T/E_L = 0,00002878 \cdot \sigma_N - 0,001008 \quad (3)$$

^{1/} CREWS (1998). *International guidelines for design of stress laminated timber bridge decks*. World Conference on Timber Engineering-WCTE, 5., artigo 4, v. 1. Swiss Federal, editado por J. Natterer e J.-L. Sandoz. Lausanne, Suíça.

$$G_{LT}/E_L = 0,01683333 - 2,74 \cdot (\sigma_N)^{-1} + 186,66666667 \cdot (\sigma_N)^{-2}. \quad (4)$$

Além das equações 1, 2, 3 e 4, Okimoto (2000), *apud* Fonte e Calil Júnior (2007), desenvolveu equações genéricas mais abrangentes para os parâmetros elásticos, em função da densidade aparente (ρ) em kg/m^3 , na forma:

$$E_T/E_L = 0,0183673 - 2,0395 \cdot 10^{-5} \cdot \rho + \sigma_N \cdot (1,17275 \cdot 10^{-5} + 1,795 \cdot 10^{-8} \cdot \rho) \quad (5)$$

$$G_{LT}/E_L = 0,042401 - 2,758850 \cdot 10^{-5} \cdot \rho - (5,891866 - 4,078686 \cdot 10^{-3} \cdot \rho) (\sigma_N)^{-1} \quad (6)$$

Utilizando-se o valor da protensão $0,700 \text{ kN/m}^2$, sugerido por Okimoto (1997) e Crews (1998) nas equações 1 a 4, foram obtidas as seguintes relações entre os parâmetros elásticos:

$$\text{- Para a madeira C25: } \begin{cases} E_T/E_L = 0,0233 \\ G_{LT}/E_L = 0,0220 \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{- Para a madeira C40: } \begin{cases} E_T/E_L = 0,0191 \\ G_{LT}/E_L = 0,0133 \end{cases} \quad (8)$$

Segundo Fonte e Calil Jr. (2006), as restrições de cisalhamento transversal e de compressão perpendicular às fibras são definidas, respectivamente, pelas expressões (9) e (10):

$$F_{V,d} \leq \mu_d \cdot \sigma_{p,\text{mín}} \cdot h \quad (9)$$

em que

$F_{V,d}$ = força de cisalhamento de cálculo por unidade de comprimento;

μ_d = valor do coeficiente de atrito, dado pela Tabela 1;

$\sigma_{p,\min}$ = tensão de protensão mínima residual; e

h = espessura da placa.

$$\sigma_{pl,d} \leq \alpha_n \cdot f_{c90,d} \quad (10)$$

em que

$\sigma_{pl,d}$ = esforço de compressão normal entre a placa de protensão e a madeira;

α_n = valor função da dimensão horizontal da chapa de distribuição da protensão, ver NBR-7190 da ABNT (1997); e

$f_{c90,d}$ = resistência de cálculo à compressão perpendicular às fibras da madeira.

Tabela 1 – Coeficiente de atrito para a madeira, Eurocode 5 (1993)

Materiais	Coeficiente de Atrito (μ_d)
Madeira serrada / madeira serrada	0,3
Madeira aplainada / madeira aplainada	0,2
Madeira aplainada / madeira serrada	0,4
Madeira / concreto	0,4

Fonte: Fonte e Calil Jr. (2006).

Observação: o coeficiente de atrito é função da espécie da madeira, da rugosidade da superfície de contato, do tratamento aplicado à madeira e do nível de tensão residual entre as lâminas.

2.3.1.4. Perdas de protensão

Os principais fatores que influem na perda de protensão são a perda de umidade e fluência (aumento das deformações ao longo do tempo sob tensão constante) da madeira e relaxação (diminuição da tensão ao longo do tempo sob deformação constante) das barras de aço de protensão. Para compensar a perda de protensão ao longo do tempo e obter o comportamento do sistema com um nível de protensão adequado, é necessário que de início sejam aplicadas tensões de protensão superiores às previstas no projeto, de forma a garantir as tensões mínimas necessárias para o bom funcionamento do sistema. Além disso, devem ser adotados procedimentos que conduzam à minimização dessas perdas de protensão.

Segundo Gangarao e Latheef^{2/} (1991), *apud* Alves (2002), os tabuleiros de madeira devem ser protendidos três vezes para estabilizar as forças de protensão na madeira e minimizar a perda dessas forças ao longo do tempo. Alves (2002) avaliou a perda de protensão ao longo do tempo, com base nos resultados apresentados na Figura 6 (TAYLOR e CSAGOLY^{3/}, 1979), e constatou que se o tabuleiro for protendido apenas uma vez durante a construção a perda final será maior que 80% e a protensão atuante tenderá para um valor abaixo de 20% da inicial. Para duas retensões (uma após três dias e a outra após oito semanas), a perda final será pouco maior que 20% e a tensão final superior à tensão mínima exigida. E quando houver três retensões (uma após dois dias, após cinco dias e após oito semanas) a perda final não ultrapassará 10% e a tensão final será superior à tensão mínima exigida.

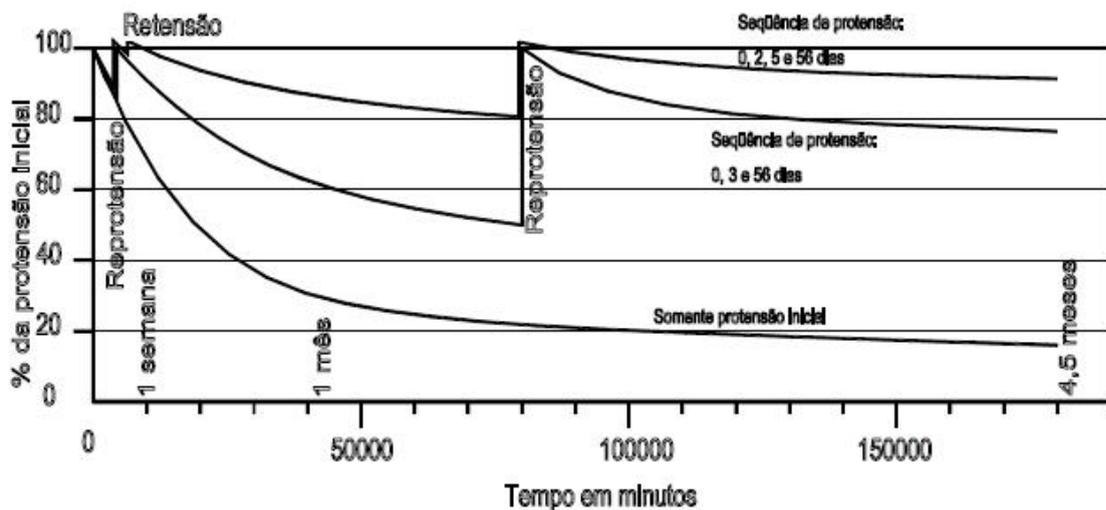


Figura 6 – Perda de Protensão em função da sequência de reprotensões (TAYLOR e CSAGOLY, 1979 *apud* ALVES, 2002).

Em relação à perda de umidade da madeira, Alves (2002), com base em ensaios de laboratório e monitoramento periódico de pontes instaladas em diferentes condições ambientais, observou que as mudanças na tensão de protensão foram mínimas quando a madeira já se encontrava seca no período da construção, mas foram maiores quando

^{2/} GANGARAO, H. V. S.; LATHEEF, I. System innovation and experimental evaluation of stressed-timber bridges. In: INTERNATIONAL TIMBER ENGINEERING CONFERENCE, Trada, London, U.K., 1991. **Proceedings...** v.3, p.3327-3334.

^{3/} TAYLOR, R.J.; CSAGOLY, P. F. **Transverse post-tensioning of longitudinally laminated timber bridge decks.** Canada, Ontario: Downsview, Ministry of Transportation and Communications. Research Report, RR220. 1979.

essa madeira secou com a ponte em serviço. Concluiu-se, então, que os efeitos do ganho e da perda de protensão devidos à umidade não são importantes quando se emprega madeira seca no momento da montagem da ponte.

2.3.1.5. Juntas de topo

O sistema de pontes protendidas transversalmente com tabuleiro de altura constante utiliza peças de madeira serrada, com largura em torno de 5 cm e altura variando entre 20 e 40 cm, com comprimento máximo, em geral, em torno de 6 m. Quando o vão-livre da ponte for superior a 6 m, torna-se necessário o emprego de emendas na direção longitudinal, que, quando possível, devem ser efetuadas por meio de juntas dentadas coladas (*finger-joints*).

No entanto, segundo Okimoto (1997), *apud* Alves (2002), o emprego de juntas de topo na construção dessas pontes torna-se viável, sem afetar drasticamente as propriedades de resistência e rigidez da estrutura. O efeito da presença e a frequência de juntas de topo na rigidez longitudinal do tabuleiro foram verificados em ensaios de modelo reduzido. Para cada tensão de protensão, foram obtidas as equações para os valores de C_{bj} (fator de redução da rigidez longitudinal do tabuleiro) em função da frequência de juntas (J):

- Para $\sigma_N = 300 \text{ kN/m}^2$

$$C_{bj} = 1,06117 - 0,93587.J^{-1} + 0,2732.J^{-2} \quad (11)$$

- Para $\sigma_N = 700 \text{ kN/m}^2$

$$C_{bj} = 1,06367 - 0,78911.J^{-1} + 0,17204.J^{-2} \quad (12)$$

Os valores de C_{bj} em função da frequência de juntas estão na Tabela 2. Como as diferenças entre esses valores para as tensões estudadas não são significativas, recomenda-se adotar os valores obtidos para $\sigma_N = 300 \text{ kN/m}^2$, independentemente da tensão de projeto.

Tabela 2 – Valores do fator de redução da rigidez longitudinal em função da frequência de juntas de topo (OKIMOTO, 1997, *apud* ALVES, 2002)

Frequência de Juntas	Fator C_{bj}		Disposições Mínimas
	sN = 300 kN/m ²	sN = 700 kN/m ²	
Cada 4	0,84	0,88	Juntas alinhadas a cada 4 vigas , com distância mínima entre juntas de vigas adjacentes = 1,20 m
Cada 5	0,88	0,91	
Cada 6	0,91	0,94	
Cada 7	0,93	0,95	
Cada 8	0,95	0,97	
Cada 9	0,96	0,98	
Cada 10	0,97	0,99	
Sem juntas	1,00	1,00	

2.3.1.6. Modelos de cálculo

Crews^{4/} (1998), *apud* Alves (2002), considera a existência de dois modelos teóricos básicos para análise do comportamento de tabuleiros protendidos de altura constante. O primeiro consiste em utilizar uma avaliação por meio de método numérico com emprego de modelo de placa ortotrópica ou modelo de grelha.

A aplicação do modelo de placa é direta, sendo necessária a definição da geometria, das condições de contorno (ações e apoios) e das propriedades físicas do material (módulo de elasticidade na direção longitudinal E_L , módulo de elasticidade na direção transversal E_T e módulo de elasticidade transversal G_{LT}). No modelo de grelha é necessária a subdivisão do tabuleiro em vigas longitudinais e transversais, com definição adicional das propriedades geométricas das barras componentes.

A segunda alternativa de modelo teórico para avaliar o comportamento do tabuleiro consiste em considerar a existência de uma viga equivalente, com as mesmas propriedades do tabuleiro na direção longitudinal (E_L) e uma largura equivalente $b_{w,eq}$. Na determinação de $b_{w,eq}$ os resultados obtidos em ensaios de protótipos de tabuleiros utilizando carregamentos referentes aos estados-limite últimos e de utilização realizados na Austrália foram comparados com a largura de distribuição estimada na edição de

^{4/} CREWS, K. (1998). *International Guidelines for Design of Stress Laminated Timber Bridge Decks*. World Conference on Timber Engineering-WCTE, 5, artigo 4, v.1. Swiss Federal, editado por J. Natterer e J.-L. Sandoz. Lausanne-Suíça.

1993 do *Ontario Highway Bridge Design Code* (OHBDC). Por fim, esses resultados foram calibrados com os obtidos em ensaios de protótipos de tabuleiros utilizando carregamentos referentes ao estado-limite de utilização realizados nos Estados Unidos. Esse modelo de viga tem a vantagem de ser simples e permitir a avaliação dos deslocamentos e da resistência de cálculo do tabuleiro.

2.4. Pontes de madeira no Brasil e em outros países

2.4.1. Brasil

As pontes de madeira ocorrem principalmente em estradas vicinais e rurais, para propiciar a travessia de pequenos e médios cursos d'água e outros acidentes geográficos. Tradicionalmente, suas construções não possuem projetos devidamente elaborados e não apresentam nenhum cálculo estrutural. Em geral, consistem na colocação de duas ou quatro vigas de madeira maciça, de secção quadrada ou roliça, sobre muros de pedra, com apoio de pequenas vigas ou pranchões transversais de madeira, presas na viga principal, formando o tabuleiro. Para facilitar o tráfego e minimizar os efeitos da abrasão sobre as peças do tabuleiro, são colocadas pranchas de madeira longitudinalmente sobre ele. Essas construções são precárias e apresentam o mesmo nível tecnológico das estradas em que se encontram (HELLMEISTER, 1983). Essa ausência de tecnologia adequada em suas construções e a inexistência de manutenção periódica resultam em baixa durabilidade, falta de segurança e, até mesmo, em preconceitos com relação às pontes de madeira. Como exemplo, a BR-230 (Transamazônica), no Estado do Pará, possui mais de 170 pontes de madeira, a maioria delas obsoleta e, ou, estruturalmente deficiente. Dos 3.650 km de estradas, construídos originalmente da década de 1970, existem apenas 680 km em condições de tráfego, atualmente (PRATA, 1994).

A madeira sempre foi o material mais utilizado para construção de pontes no País. Ao longo dos anos, tem ocorrido um processo de substituição deste material por pontes de outros materiais, como o aço e o concreto. Como exemplo, pode-se citar a primeira ponte de madeira de maior porte do Brasil, construída em Pernambuco, em 1643; em 1743 ela foi substituída por uma ponte com estrutura de ferro e em 1917 foi substituída pela atual ponte de concreto.

As normas brasileiras atuais, inclusive a NBR 7190-Cálculos e Execução de Estruturas em Madeira da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1997), não contemplam disposições construtivas que considerem o projeto de pontes em placas, protendidas ou não, bem como outros sistemas mais modernos que o sistema estrutural, que utiliza vigas. O Brasil tem apresentado, nas últimas décadas, acentuado desenvolvimento tecnológico nas estruturas de madeira, destacando-se trabalhos desenvolvidos em instituições de pesquisa, entre elas o Laboratório de Madeira e Estruturas de Madeira da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (USP), a Universidade Estadual Paulista (UNESP), a Escola Politécnica da USP (campus de São Paulo) e a Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Os novos sistemas construtivos combinam técnicas trazidas de outros países e matéria-prima originária de reflorestamento. Dentre os novos sistemas, destaca-se o de protensão (aplicação de tensões), com lâminas de madeira, formando uma única placa, perpassada por barras rígidas de um aço especial ultra-resistente, ou cordoalhas, ou ainda um conjunto de vários fios de aço, também de alta resistência.

Segundo Flaga (2000), apesar da competição de materiais alternativos como aço e concreto, a madeira é uma matéria-prima de importância significativa nas construções em países desenvolvidos, como Estados Unidos, Canadá e Rússia. Isto só foi possível devido aos progressos na tecnologia de seu processamento nos últimos 40 anos, que resultaram em maior durabilidade das estruturas de madeira. Devido aos avanços na tecnologia de sua preservação, essas estruturas se igualam às estruturas de aço e concreto. Quase todos os componentes das estruturas em madeira são produzidos industrialmente, o que reduz consideravelmente os custos de mão-de-obra e melhora a qualidade das tecnologias construtivas utilizadas.

2.4.2. América do Norte

O Canadá e os Estados Unidos são grandes consumidores de madeira, onde 80-85% é utilizada em processos industriais; e o restante, 15-20%, é utilizada na produção de energia (NATTER e SANDOZ, 1997). Atualmente, esses dois países detêm o que existe de melhor em tecnologia de construção e uso de pontes de madeira em todo o mundo. A *Timber Bridge Initiative* uniu institutos de pesquisa em um amplo programa na América do Norte. Há um intercâmbio entre o *Institute of Ministry of Transportation of Ontario* (MTO), *Forest Products Laboratory* (FLP) e *Federal Highway*

Administration (FHWA). Neste âmbito, as pesquisas em andamento visam buscar informações sobre propriedades de madeiras para aplicações em pontes (RITTER e WILLIAMSON, 1994). No Canadá, em 1976, experimentou-se a protensão transversal em substituição aos tabuleiros laminados pregados, utilizando madeira serrada. Nos Estados Unidos, de acordo com *National Bridge Inventory* (NBI), existiam no país 41.743 pontes de madeira e mais 42.102 pontes de aço cobertas com madeira. O primeiro uso da tecnologia do laminado tensionado nos Estados Unidos ocorreu em 1988. A partir desta data, mais de 150 pontes já foram construídas, usando essa técnica (RITTER e WACKER, 1995).

2.4.3. Austrália

Segundo Crews *et al.* (1994), em 1990 foi implantada na Austrália a mesma cultura de desenvolvimento da *Timber Bridge Initiative* (TBI), através de um programa cooperativo conjunto *Austrália-United State Timber Program* (AUSTIM), que visa implantar a tecnologia de pontes protendidas.

2.5. Propriedades físicas e mecânicas da madeira relacionadas com aplicação em pontes

2.5.1. Normas para o ensaio de determinação das propriedades da madeira

A primeira iniciativa para caracterização de madeiras no Brasil foi da Escola Politécnica de São Paulo, em 1904, onde foram realizados estudos sobre resistência à compressão e flexão, além da massa específica de diversas espécies nativas. Por volta de 1930, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) publicou os métodos para ensaios de madeira, nos quais fundamentou o desenvolvimento da pesquisa, objetivando a caracterização de espécies de madeira produzidas no País. Esses métodos foram divididos em ensaios físicos (umidade, massa específica e retratibilidade) e ensaios mecânicos (compressão paralela, flexão estática, choque, tração, fendilhamento, dureza e cisalhamento).

Em 1940, a então recém-instalada Associação Brasileira de Normas Técnicas adotou os métodos de ensaios para madeira do IPT, transformando-os no MB-26/40: (NBR 6230) Métodos Brasileiros para Ensaio Físicos e Mecânicos de Madeiras.

Em 1987, o Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira (LAMEM), da Escola de Engenharia de São Carlos – USP, contribuiu para a caracterização das madeiras, propondo métodos de ensaio na determinação das características da madeira. Com os conhecimentos adquiridos, somados à experiência da Escola Politécnica, foi elaborada e criada a nova norma brasileira: Projetos de Estrutura de Madeira (NBR 7190/97), que trata no Anexo B da determinação das propriedades da madeira para projetos de estruturas (RODRIGUES, 2002).

2.5.2. Propriedades da madeira relacionada à aplicação em pontes

Segundo Abdalla (2002), os ensaios de caracterização da madeira, ainda que destrutivos, são de fundamental importância, pois permitem a utilização das propriedades do material nos cálculos estruturais, possibilitando projetar as seções mínimas possíveis, sem prejuízo da segurança da estrutura e minimizando o custo da construção de tal estrutura.

A seguir serão discutidas as principais propriedades físicas e mecânicas da madeira, relacionadas com a sua aplicação em pontes.

2.5.2.1. Propriedades físicas

O conhecimento dessas propriedades é importante, pois elas influenciam significativamente o desempenho e a resistência da madeira usada em estruturas.

Segundo Tsoumis (1991), a massa específica e a retratibilidade são consideradas os mais importantes parâmetros físicos para a madeira sólida. Os seus valores expressam a combinação de vários fatores, incluindo a constituição morfológica, anatômica e química da madeira.

No caso de pontes protendidas, a manutenção do esforço de compressão entre as tábuas, essencial para o seu desempenho ótimo, depende significativamente da variação da umidade e do grau de retratibilidade da madeira.

- Teor de umidade

A maioria das propriedades físicas e mecânicas da madeira depende da variação do teor de umidade na madeira, que, por sua vez, depende da umidade do ambiente onde

essa madeira se encontra. No caso de pontes, considera-se importante a prévia caracterização do local onde será construída a estrutura de madeira. O aumento no teor de umidade da madeira provocará certo aumento na dimensão da peça e redução sua na resistência e rigidez.

Segundo Taylor e Ritter (1994), um dos mais importantes fatores que pode afetar o desempenho de um tabuleiro protendido é o teor de umidade. Associado às mudanças no conteúdo de umidade está o aumento ou a redução nas dimensões do tabuleiro, acarretando oscilações nas forças das barras de protensão.

Segundo Prata (1995), os projetos bem-sucedidos de tabuleiros tensionados deverão incorporar dispositivos para limitar a flutuação de umidade e evitar as alterações dimensionais. A proteção contra umidade pode ser providenciada de várias maneiras, a saber:

- tratamento com óleo solúvel, que pode ser aplicado nas madeiras após a instalação no local da ponte; e
- introdução de hidrorrepelente junto com o CCA durante o tratamento das madeiras.
- superfície de rolamento asfáltica e um caminho de drenagem superficial para ajudar a escoar a água do tabuleiro.

- Densidade da madeira

A massa específica da madeira é a relação entre a massa da madeira e o seu volume correspondente. É uma das propriedades mais estudadas na caracterização tecnológica da madeira, devido à facilidade de determinação e, principalmente, à sua íntima relação com outras propriedades, tornando-se um parâmetro muito utilizado para qualificar a madeira, nos diversos segmentos da atividade industrial. Chimelo (1980) e Gérard *et al.* (1995) afirmaram que, quase sempre, a densidade se apresenta correlacionada com a retratibilidade, secagem, trabalhabilidade, impregnabilidade, durabilidade natural e várias propriedades mecânicas.

Oliveira *et al.* (1990) e Lima *et al.* (2000) asseguraram que a densidade é uma boa indicadora de qualidade da madeira, em função das várias correlações com outras propriedades; entretanto, ela não indica, de forma direta e conclusiva, valores das propriedades mecânicas, das dimensões de fibras, do poder calorífico, da composição química e da existência de defeitos internos.

Segundo Tsoumis (1991), a densidade é uma medida da quantidade de material na parede celular. Nas madeiras da mesma espécie, as variações da densidade são decorrentes, principalmente, de alterações nos componentes estruturais e químicos, em função da idade da árvore, do genótipo, do índice de sítio, do clima, da localização geográfica e dos tratamentos silviculturais. Esse número de variáveis permite concluir que a madeira é um material de comportamento extremamente complexo. Os efeitos são, em geral, interativos e difíceis de ser avaliados isoladamente (VITAL, 1984).

- Retratibilidade

A retratibilidade se refere à contração ou expansão da madeira, como consequência da saída ou entrada de moléculas de água entre as microfibrilas. Segundo IPT (1985), o princípio da retratibilidade se deve ao fato de as moléculas de água estarem unidas por ligações de hidrogênio às microfibrilas dos polissacarídeos que formam a madeira; quando estas são forçadas a sair, deixam um espaço, e as forças de coesão tendem a reaproximar as microfibrilas, causando contração da madeira como um todo. O fenômeno da expansão é o inverso, ou seja, quando a água adsorvida pela madeira tende a penetrar entre as microfibrilas, causando o afastamento delas e, conseqüentemente, o inchamento da peça como um todo.

Panshin e De Zeeuw (1980) e Moreira (1999) afirmaram que as contrações ocorrem mais intensamente no sentido transversal das fibras do que no longitudinal, em função de sua característica anisotrópica. Os autores constataram, ainda, que a maior alteração dimensional da madeira se manifesta no sentido tangencial aos anéis de crescimento, seguida pela dimensão radial e, praticamente, desprezível no sentido longitudinal ou axial. Durlo e Marchiori (1992) e Lelles e Silva (1997) afirmaram que a contração na direção tangencial é, aproximadamente, 1,5 a 2 vezes maior que a que ocorre na direção radial, situação muito freqüente para a maioria das madeiras do gênero *Eucalyptus*.

As características de retração da madeira são bastante diferentes entre as espécies, dependendo do modo de condução da secagem e do próprio comportamento da madeira, o que leva ocasionalmente a alterações das dimensões e à formação de fendas e empenos. Precauções especiais devem ser tomadas nas situações em que se exige a estabilidade da madeira, como o seu emprego em pontes, pois o projeto final pode ser inviabilizado se não for feita a correta secagem até a umidade de equilíbrio nas condições de uso.

Há desequilíbrio entre os valores da retratibilidade quando se avalia a variação dimensional na direção transversal (radial e tangencial). Esse desbalanceamento entre as contrações é chamado de fator anisotrópico, ou seja, é a relação entre a retratibilidade na direção tangencial dividida pela mesma propriedade na direção radial. A situação ideal seria aquela em que as tensões decorrentes da natureza anisotrópica se anulassem segundo as direções em que a retratibilidade se manifestasse, o que raramente acontece. A grande importância desse índice é que quanto maior for o seu distanciamento do valor unitário mais propensa é a madeira de se fendilhar e empenar. Para as madeiras mais estáveis, os índices variam de 1,3 a 1,4, mas para madeiras de eucalipto, principalmente aquelas provenientes de árvores jovens e de rápido crescimento, os índices podem chegar a 3, tornando-as extremamente instáveis, dimensionalmente.

No caso de pontes protendidas, a manutenção do esforço de compressão entre as tábuas, essencial para o desempenho correto da ponte protendida, pode ficar comprometida se a madeira apresentar valores muito altos de expansão ou contração.

2.5.2.2. Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas descrevem a resistência da madeira quando solicitada por diversos tipos de esforços, incluindo compressão, tração, cisalhamento, flexão, torção e resistência ao choque. As propriedades mecânicas variam nas três direções da madeira; no entanto, as diferenças entre os valores das propriedades nas direções radial e tangencial são muito pequenas. Por esta razão, as propriedades mecânicas são descritas apenas para as direções paralela e perpendicular às fibras.

A classificação estrutural de madeiras, por meio da resistência mecânica, permite diferenciá-la quanto à sua capacidade de suportar cargas. Para essa classificação é possível a substituição dos ensaios de pequenos corpos-de-prova isentos de defeitos por ensaios não-destrutivos da própria peça a ser utilizada na estrutura. A principal vantagem da classificação da madeira é a perfeita adequação do coeficiente de segurança para o uso em questão (MELLO, 1984).

Lee *et al.* (1995) realizaram projetos detalhados de pontes protendidas, prevendo vãos entre 3 e 6 m, para pistas de rolamento simples e duplo. Os autores ressaltaram que as propriedades da madeira para esse tipo de emprego são as resistências à flexão e à compressão perpendicular às fibras, bem como o módulo de elasticidade.

A efetiva resistência da madeira à aplicação de esforços é função não só da quantidade total da parede celular, mas também da proporção dos componentes das células estabelecidas em uma dada espécie e da quantidade e do tipo de extrativos presentes no lume das células (PANSHIN e DE ZEEUW, 1980).

A seguir, serão descritas as principais propriedades mecânicas úteis no dimensionamento de pontes de madeira.

2.6. Resistência à flexão estática

É uma das mais importantes propriedades mecânicas da madeira. A resistência da madeira à flexão (f_M) é um valor convencional, dado pela máxima tensão que pode atuar em um corpo-de-prova no ensaio de flexão simples, calculada pela equação:

$$f_M = M_{max.}/W_e$$

em que

M_{max} = máximo momento aplicado ao corpo-de-prova (N.m); e

W_e = módulo de resistência elástico da seção transversal do corpo-de-prova, dado por $(b.h^2)/6$,

em que b e h = lados da seção transversal do corpo-de-prova, sendo h paralelo à direção da carga aplicada.

Quando a madeira é solicitada à flexão simples, como no caso das pontes de madeira, ocorrem quatro tipos de esforços (Figura 7): compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras, cisalhamento horizontal e compressão normal às fibras nas regiões dos apoios. A ruptura nas peças de madeira solicitadas à flexão ocorre pela formação de minúsculas falhas de compressão seguidas pelo desenvolvimento de enrugamentos macroscópicos de compressão. Este fenômeno gera o aumento da área comprimida na seção e a redução da área tracionada, podendo, eventualmente, romper por tração (RITTER, 1992).

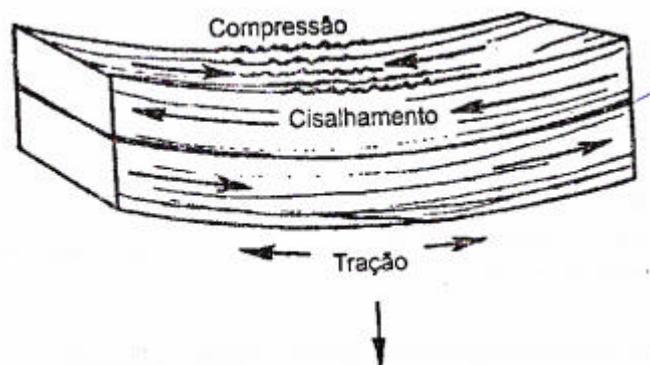


Figura 7 – Flexão na madeira (Fonte: RITTER, 1992).

- Módulo de elasticidade na flexão

No ensaio de flexão, além de determinar a máxima resistência à flexão, faz-se também a determinação do módulo de elasticidade longitudinal da madeira, obtido do trecho linear do diagrama *tensão x deformação*, expresso em MPa.

O módulo de elasticidade fornece uma idéia da rigidez da madeira ou a sua maior ou menor capacidade de deformar-se em função da carga aplicada no esforço de flexão.

A rigidez da madeira na direção paralela às fibras pode ser determinada pelo seu módulo de elasticidade (MOE). Para esta finalidade, o módulo de elasticidade deve ser determinado pela inclinação da reta secante à curva *tensão x deformação*, definida pelos pontos correspondentes a 10 e 50% da resistência à compressão paralela às fibras obtida no ensaio.

Segundo Klock (2000), embora o módulo de elasticidade não ofereça informações completas e reais sobre o comportamento de um determinado material, pode-se concluir que valores altos de MOE indicam alta resistência e baixa capacidade de deformação do material, qualificando-o para fins construtivos.

Matos (1997) mencionou que um corpo sólido sofre certa deformação quando está sujeito a uma determinada carga; ao remover essa carga, e caso o esforço aplicado não exceda o limite elástico, o corpo tende a retornar à forma e posição originais; se a carga for aplicada além do limite proporcional, as deformações sofridas pelo material são irreversíveis; em uma situação extrema poderá haver a sua completa ruptura. Segundo o autor, o módulo de elasticidade (MOE) ou módulo de Young mede a rigidez

dos materiais e expressa o esforço hipotético em que um corpo de 1 cm^2 de área transversal pode ser estendido ao dobro do comprimento original. Na verdade, o valor real do módulo de elasticidade (MOE) é impossível de ser atingido, pois nunca se conseguirá uma deformação da grandeza do comprimento do próprio corpo; por certo, antes que essa situação ocorra, haverá a ruptura do material. A rigidez da madeira é uma medida de sua aptidão em resistir à deformação imposta pela carga e é expressa, numericamente, em testes de flexão estática, através do módulo de elasticidade, utilizando-se peças de seção retangular, com dois apoios e um ponto de aplicação de carga.

- Módulo de ruptura na flexão

Os valores de módulo de ruptura são utilizados para obtenção de tensões admissíveis para diversas formas de utilização da madeira.

Matos (1997) reiterou que a resistência de uma peça de madeira, submetida à flexão, é expressa em termos de esforços por unidade de área, através do MDR, representando o máximo de esforços que é aplicado sobre as fibras no extremo superior e inferior da seção transversal da peça.

- Ensaio de flexão dinâmica ou resistência ao choque

Esta propriedade mede a energia necessária para fraturar a madeira. O seu conhecimento é importante para se saber quando as estruturas se rompem sob a ação de esforços mais ou menos bruscos. Tem aplicação na construção de carrocerias, caixotarias e em todas as estruturas sujeitas a esforços dinâmicos, como guarda-corpos e placas de transição das pontes de madeira.

A resistência da madeira depende fortemente do período de aplicação da carga. Sob cargas permanentes obtêm-se resistências de cerca de 60 % dos valores atingidos em ensaios de curta duração ($5 \pm 2 \text{ min.}$) (ALVAREZ, 2000). A madeira tem a singular propriedade de poder suportar carga de curta duração bastante superior à que determina a sua ruptura por períodos de longa duração. Esta propriedade torna a madeira um material estrutural de grande eficácia sob cargas dinâmicas, como o vento e os movimentos sísmicos.

- Resistência à compressão perpendicular às fibras

Cada célula funciona como uma coluna individual que recebe suporte lateral da célula adjacente e da sua própria estrutura. Quando a compressão é aplicada paralelamente às fibras, produz uma deformação nas células da madeira em seu eixo longitudinal. A força necessária para deformar a madeira no sentido perpendicular às fibras é menor do que no sentido paralelo às fibras. Antes do colapso das fibras, estas sofrem esmagamento e a madeira ainda apresenta certa resistência mecânica, devido à ausência de espaços vazios formados pela diminuição da espessura da peça de madeira.

Em pontes de madeira, a maioria das forças aplicadas sobre a ponte ocorre nesse sentido, perpendicular às fibras, principalmente nas peças do tabuleiro, sendo os esforços de maior intensidade e importância os provenientes das reações de apoio.

- Resistência à compressão paralela às fibras

A resistência à compressão paralela às fibras é dada pela máxima tensão de compressão que pode atuar em um corpo-de-prova com seção transversal quadrada de 5 cm de lado e 15 cm de comprimento (NBR 7190/97).

Na madeira, o valor da compressão paralela às fibras é muito maior do que a compressão perpendicular. Ritter (1990), estudando duas espécies de madeira de ocorrência na América do Norte (*Douglas-Fir* e *Loblolly Pine*), chegou a valores de resistência à compressão paralela às fibras nove a dez vezes maior do que os valores da compressão perpendicular às fibras, na primeira espécie utilizada; na segunda espécie, essa proporção se repetiu.

Em pontes de madeira, essa resistência é mais importante na meso-estrutura, mais especificamente nos pilares de sustentação do tabuleiro, que descarregam as cargas provenientes de toda a estrutura para o solo.

- Dureza

A dureza pode ser definida como a capacidade da madeira resistir à abrasão superficial, além de dar uma idéia da resistência ao desgaste, bem como à penetração de ferramentas. Essa propriedade é um importante critério na escolha de madeiras para

usos estruturais que sofrem grandes intervenções por ferramentas cortantes e madeiras que precisam ser furadas ou pregadas, como no caso das pontes.

Entre algumas formas de expressão da dureza da madeira, a mais empregada é a dureza Janka, que consiste em fazer penetrar na madeira uma esfera de aço de 1cm² de área diametral até a profundidade de seu raio (ABNT, 1997).

Gonçalez (1993) comprovou que a proporção de raios tem ligação com a dureza e com a resistência em compressão axial e transversal da madeira. No caso de pontes, a dureza é uma propriedade importante quando se considera o desgaste devido à ação do tráfego.

- Cisalhamento

Esta propriedade pode ser traduzida na capacidade da madeira em resistir à ação de forças que tendem a fazer com que uma parte do material deslize sobre a outra parte adjacente. Os esforços são estabelecidos em maior ou menor grau nos muitos usos da madeira e as forças que os produzem são classificadas de acordo com a direção em que agem, seja no sentido paralelo, perpendicular ou oblíquo às fibras. O cisalhamento no sentido perpendicular às fibras não é facilmente determinado e é pouco importante, uma vez que antes de ele ocorrer os efeitos da compressão perpendicular às fibras já terão se manifestado. O mais importante e mais estudado tipo de cisalhamento na construção de pontes e outras estruturas de madeira é o que ocorre no sentido paralelo às fibras, podendo comprometer a viabilidade da estrutura em questão (RITTER, 1991).

O conhecimento dessa propriedade é muito útil para o dimensionamento de vigas e tesouras de telhados, principalmente em ligações de madeira feitas com entalhe.

2.7. Principais propriedades das madeiras utilizadas para pontes em diversos países

A seguir, serão apresentadas as espécies de reflorestamento mais comumente utilizadas em construção de pontes em diversos países e algumas de suas propriedades.

Na América do Norte, há a tendência de se agruparem as espécies com características semelhantes e tratá-las como equivalentes. Nos Estados Unidos, as espécies *Slash Pine* (*Pinus elliotti*), *Loblolly Pine* (*Pinus taeda*), *Longleaf Pine* (*Pinus*

palustris) e *Shortleaf Pine* (*Pinus echinata*), além de outras menos importantes, são reunidas no grupo *Southern Pine*. Na Tabela 3, estão as propriedades físicas e mecânicas dessas madeiras, de acordo com o *Wood Handbook* (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999).

A madeira norte-americana “N^o 2 *Southern Yellow Pine Dimension Lumber*” utilizada para pontes, tem valores característicos de resistência à flexão entre 69 e 85 MPa, módulo de elasticidade da ordem de 11.200 MPa e resistência à compressão perpendicular de 4. Madeiras com valores semelhantes ao grupo citado anteriormente não são difíceis de serem encontradas no Brasil. Na Tabela 4, Carreira (2003) compara madeiras de coníferas das espécies *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, provenientes de florestas plantadas no Brasil, e do grupo norte-americano *Southern Pine*.

Segundo o autor, observa-se uma grande proximidade entre os valores de MOR e MOE médio em relação ao eixo de maior inércia para as classes N^o 2-MD e N^o 2-D dos lotes avaliados e os fornecidos pelo *Southern Pine* norte-americanos. Concluiu-se que se pode sugerir, a princípio, a utilização das propriedades mecânicas tabeladas para o *Southern Pine* norte-americano como indicadores das propriedades mecânicas de peças estruturais do gênero *Pinus* proveniente de florestas plantadas no Brasil.

Na Tabela 5, estão apresentadas as propriedades físicas e mecânicas de *Pinus elliotti* e *Pinus taeda*, espécies cultivadas no Brasil pertencentes ao grupo *Southern Pine* norte-americano.

Prata (1995) estudou a madeira de *Corymbia citriodora* e concluiu que ela possui propriedades semelhantes à da norte-americana utilizada nas pontes protendidas (“N^o 2 *Southern Yellow Pine Dimension Lumber*”) e poderia ser utilizada neste tipo de estrutura. Oliveira (1997) estudou a caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil, e os resultados estão na Tabela 6.

O autor concluiu que *C. citriodora*, além de possuir propriedades mecânicas variando de média à elevada, caracteriza-se pelo excelente valor de seu fator anisotrópico, apesar de apresentar elevados valores de contração volumétrica. Quanto à durabilidade natural, *C. citriodora*, em condições normais de pequeno risco de incidência de organismos xilófagos, não apresenta restrições; mostra-se resistente ao apodrecimento e possui permeabilidade média.

Segundo Sales (1991), citado por Prata (1995), as espécies do gênero *Eucalyptus* recomendadas para aplicação em pontes são os *Eucalyptus tereticornis*, *E. paniculata* e *E. maculata*, além de *Corymbia citriodora*.

Tabela 3 – Propriedades das madeiras do grupo *Southern Pine*

Propriedades	<i>Slash Pine</i> (<i>Pinus elliottii</i>)		<i>Loblolly Pine</i> (<i>Pinus taeda</i>)		<i>Longleaf Pine</i> (<i>P. palustris</i>)		<i>Shortleaf Pine</i> (<i>P. echinata</i>)	
	verde	12%	verde	12%	verde	12%	verde	12%
Propriedades Físicas								
Teor de Umidade	verde	12%	verde	12%	verde	12%	verde	12%
Densidade* (g/cm ³)	0,54	0,59	0,47	0,51	0,54	0,59	0,47	0,51
Propriedades mecânicas								
Módulo de ruptura (MPa)	60	112	50	88	59	100	51	90
Módulo de elasticidade (MPa)	10.500	13.700	9.700	12.300	11.000	13.700	9.600	12.100
Resistência ao choque (mm)	-	-	760	760	890	860	760	840
Compressão paralela às fibras (MPa)	26,3	56,1	24,2	49,2	29,8	58,4	24,3	50,1
Compressão normal às fibras (MPa)	3,7	7,0	2,7	5,4	3,3	6,6	2,4	5,7
Cisalhamento paralelo às fibras (MPa)	6,6	11,6	5,9	9,6	7,2	10,4	6,3	9,6
Tração normal (MPa)	-	-	1,8	3,2	2,3	3,2	2,2	3,2
Dureza (N)	-	-	2,000	3,100	2,600	3,900	2,000	3,100

*Massa da madeira seca e volume da madeira verde.

Fonte: Forest Products Laboratory (1999).

Tabela 4 – Comparação entre propriedades do *Pinus* brasileiro e norte-americano

	<i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i> , Brasil		<i>Southern Pine</i> , n Norte-americano	
	MOR (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)
Nº 2-MD	21,9	7608	19,9	9520
Nº 2-D	28,7	9182	25	11560

Fonte: Carreira (2003).

Tabela 5 – Propriedades de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* plantados no Brasil

Propriedades	<i>Pinus elliottii</i>	<i>Pinus taeda</i>
Propriedades Físicas		
Teor de umidade (%)	12	12
Massa específica aparente (g/cm ³)	560	645
Propriedades Mecânicas		
Compressão paralela às fibras (MPa)	40,4	44,4
Tração paralela às fibras (MPa)	66,0	82,8
Tração normal às fibras (MPa)	2,5	2,8
Cisalhamento (MPa)	7,4	7,7
MOE na compressão paralela às fibras (MPa)	11.889	13.304

Fonte: ABNT (1999), adaptado.

Tabela 6 – Valores estimados de algumas propriedades mecânicas de sete espécies de eucalipto

Espécies	Dens. (g/cm ³)	Propriedades Mecânicas (MPa)					
		MOE	MOR	MRCP	MRC	Dureza	MRTP
<i>C. citriodora</i>	0,72	12.511	96	49	12	63	99
<i>E. tereticornis</i>	0,63	11.104	79	42	11	48	83
<i>E. paniculata</i>	0,72	12.485	95	49	12	63	98
<i>E. pilularis</i>	0,55	9.968	67	36	9	35	71
<i>E. cloeziana</i>	0,69	12.017	90	46	12	58	93
<i>E. urophylla</i>	0,52	9.398	60	34	9	29	65
<i>E. grandis</i>	0,46	8.584	52	30	8	21	57

Fonte: Oliveira (1997), adaptado.

Dens. = densidade básica; MOE = módulo de elasticidade à flexão; MOR = módulo de ruptura à flexão; MRCP = máxima resistência à compressão paralela às fibras; MRC = máxima resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; MRTP = máxima resistência à tração paralela às fibras; e Dureza = Janka, transversal às fibras

Muito interessante seria o estudo da viabilidade do emprego de *Eucalyptus grandis*, espécie muito plantada no Estado de Minas Gerais e que tem crescimento rápido, atingindo dimensões maiores que *C. citriodora*. Segundo Tomaselli (2000), a opção pelo *Eucalyptus grandis* no Brasil está relacionada à excelente resposta silvicultural da espécie, como boa forma e rápido crescimento, além de propriedades desejáveis para uso múltiplo, como massa específica média, grã-direita, fácil usinagem, boa aceitação de acabamento e cor levemente avermelhada. Oliveira (1997) afirmou que, em função da alta produtividade, qualquer projeto que vise a utilização da madeira de eucalipto deve, necessariamente, incluir essa espécie.

Nas Tabelas 7 e 8 estão as propriedades mecânicas da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Tabela 7 – Propriedades mecânicas da madeira de *Eucalyptus grandis*, na condição verde e a 12% de umidade

Umidade (%)	Densidade (kg/m ³)	MOR (MPa)	MOE (MPa. x 1.000)	RCP (MPa)	RC (MPa)	Dureza (N x 1.000)	Choque (N x mm)
Verde	805-900	77,3- 86,2	12,5-13,8	38,7-43,4	8,65-9,66	5,05-5,55	20,4-22,6
12%	575-640	111-124	15,5-17,2	62,2-69,0	12,5-13,8	7,15-8,00	15,9-18,1

Fonte: Hillis (1978).

MOR = módulo de ruptura; MOE = módulo de elasticidade; RCP = resistência à compressão paralela às fibras; e RC = resistência ao cisalhamento.

Tabela 8 – Propriedades mecânicas da madeira de *Eucalyptus grandis* sob duas condições de umidade

Umidade (%)	Densidade Básica (kg/m ³)	Compressão Paralela		Compressão Normal		Flexão Estática	
		MOR (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)
30	510	335	12.556	36	3.606	644	10.978
12	500	401	12.697	44	4.432	719	12.086

Fonte: Hellmeister (s.d.).

MOR = módulo de ruptura; e MOE = módulo de elasticidade.

Segundo Prata (1995), a aplicação de madeiras de reflorestamento não se restringe ao uso de eucaliptos e pinus, embora sejam os gêneros disponíveis no mercado Centro-Sul do País, atualmente. O replantio sistemático, fortalecendo o abastecimento

do mercado em um horizonte de 30 anos ou mais, certamente propiciará menor pressão pela oferta de madeira de grande qualidade, sem que as espécies acabem ou as distâncias de fretes inviabilizem os empreendimentos.

Além disso, há espécies dos gêneros disponíveis com qualidades suficientes para serem substitutas das espécies com maior demanda. Para o autor, a disponibilidade futura de madeira de espécies nativas qualificadas para uso estrutural deverá, assim, ser objeto de reflorestamento tanto quanto o plantio dos gêneros já disponíveis, *Eucalyptus* e *Pinus*.

Segundo Szucs (1983), as madeiras nativas indicadas para a construção de pontes são: aroeira, maçaranduba, cabreúva, faveiros, ipê, pau d'arcos e outras.

Nogueira *et al.* (2000), objetivando indicar o emprego da madeira mais compatível na construção civil das duas espécies mais comercializadas no Estado do Mato Grosso, angelim-pedra e itaúba, concluíram que a espécie itaúba é indicada para a construção de pontes. Segundo os autores, para construção civil pesada os requisitos técnicos necessários são: 1) massa específica alta, 2) propriedades mecânicas elevadas; 3) duráveis e tratáveis e 4) boa fixação mecânica.

Nas Tabelas 9 a 12 estão as propriedades de algumas madeiras nativas recomendadas para construção de pontes. A madeira de peroba-rosa já foi muito utilizada para construção de pontes, mas atualmente é escassa e está em processo de substituição. Os dados apresentados na Tabela 9, relativos à peroba-rosa, servem como referência para o uso de espécies alternativas, cujo uso deve ser evitado.

Tabela 9 – Madeiras nativas recomendadas para a aplicação em pontes

Propriedades	Peroba-Rosa (<i>Aspidosperma polyneuron</i>)		Angelim-Pedra (<i>Hymenolobium spp.</i>)		Bacuri (<i>Platonia insignis</i>)		Cupiúba (<i>Goupia glabra</i>)	
Propriedades Físicas								
Massa específica (kg/m ³)	660		590		670		710	
Contração, % (do p.s.f. até 0% de umidade)								
Radial (%)	4,0		4,1		4,6		4,8	
Tangencial (%)	7,8		6,3		8,1		9,1	
Volumétrica (%)	13,1		10,1		13,4		16,1	
Propriedades Mecânicas								
Condição de Umidade	verde	12%	verde	12%	verde	15%	verde	15%
Flexão Estática								
Resistência (MPa)	88,2	103,8	70,6	109,3	96,8	109,3	96,7	122,1
Limite de proporcionalidade (MPa)	27,9	-	-	-	100,5	-	46,5	-
Módulo de elasticidade (MPa)	9248	-	9414	11572	12739	-	1369	-
Compressão								
Paralela às fibras (MPa)	41,6	54,4	38	52,3	42,4	49,4	50,8	67,2
Perpendicular às fibras (MPa)	-	-	6,4	11,3	-	-	-	-
Cisalhamento (MPa)	11,9	-	-	-	10,1	-	-	-
Fendilhamento (MPa)	-	-	1,1	-	0,8	-	0,9	-
Choque (J)	-	-	-	22,6	-	38,7	-	29,5
Dureza Janka paralela (N)	6776	-	-	-	6200	-	-	6266

Fonte: Ferreira (2003).

Tabela 10 – Madeiras nativas recomendadas para a aplicação em pontes

<p>Peroba-Rosa (<i>Aspidosperma polyneuron</i>)</p> <p>Ocorrência: Bahia, Espírito Santo, Mato-Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraná, Rondônia, Santa Catarina e São Paulo.</p> <p>Características Gerais: moderadamente pesada (densidade 0,79 g/cm³), dura, compacta, superfície opaca e áspera, fácil de rachar e muito durável desde que não em contato com solo e umidade.</p>		
Durabilidade Natural	Tratabilidade	Trabalhabilidade
<p>As informações disponíveis na literatura são controversas em relação à durabilidade natural do cerne de peroba-rosa. Observações feitas pelo IPT em exame de estrutura de cobertura, complementadas por ensaios em laboratório, permitem considerar esta madeira como de moderada resistência aos cupins e com baixa ou moderada resistência aos fungos apodrecedores.</p>	<p>Apresenta baixa permeabilidade às soluções preservativas.</p>	<p>A madeira de peroba-rosa é moderadamente fácil de ser trabalhada, porém pode apresentar certa dificuldade quando ocorre grã-reversa. Permite bom acabamento e é fácil de colar.</p>
<p>Angelim-Pedra (<i>Hymenolobium spp.</i>)</p> <p>Ocorrência: Disseminado no Pará e na parte oriental do Amazonas, nas matas de terra firme.</p> <p>Propriedades Físico-Mecânicas: a madeira de angelim-pedra pode ser classificada como de baixa retratibilidade, massa específica e resistência mecânica altas.</p>		
Durabilidade Natural	Tratabilidade	Trabalhabilidade
<p>Madeira de alta resistência à ação de fungos apodrecedores e moderada resistência ao ataque de cupins.</p>	<p>Madeira pouco permeável às soluções preservativas em tratamento sob pressão.</p>	
<p>Bacuri (<i>Platonia insignis</i>)</p> <p>Ocorrência: Amazônia (Amazonas e Pará)</p> <p>Propriedades Físico-Mecânicas:</p>		
Durabilidade Natural	Tratabilidade	Trabalhabilidade
<p>Altamente resistente ao ataque de fungos apodrecedores e moderadamente resistente ao ataque de cupins.</p>	<p>Madeira pouco permeável a soluções preservativas, quando tratada sob pressão.</p>	<p>Fácil de trabalhar, tanto com ferramentas manuais como mecânicas. Apresenta dificuldade para pregar. Bom polimento.</p>

Continua...

Tabela 10, Cont.

Cupiúba (*Goupia glabra*)

Ocorrência: Ocorre em matas de terra firme em toda a região Amazônica, tanto em terrenos arenosos como argilosos.

Propriedades Físico-Mecânicas: A madeira de cupiúba é pesada e apresenta retratibilidade volumétrica e resistência mecânica médias. Boa resistência ao apodrecimento.

Durabilidade Natural	Tratabilidade	Trabalhabilidade
<p>Em ensaios de laboratório a madeira de cupiúba demonstrou ter alta resistência ao ataque de organismos xilófagos (fungos e cupins). Apresenta resistência a fungos apodrecedores (podridão-branca e parda) e cupins de madeira-seca, entretanto não é resistente aos xilófagos marinhos. Em estudo realizado pela SUDAM/IPT (1981) constatou que a durabilidade desta madeira é superior a 12 anos de serviço em contato com o solo.</p>	<p>O cerne e o alburno apresentam moderada permeabilidade às soluções preservativas tanto oleossolúvel (creosoto) como hidrossolúvel (CCA). A retenção de preservativo oleossolúvel é de 200 a 300 kg/m³. Já Brito Neto et al. (1984) reconheceram o cerne de cupiúba como de baixa permeabilidade ao tratamento com óleo creosoto.</p>	<p>A madeira de cupiúba é fácil de trabalhar com ferramentas manuais ou com máquinas. É fácil de serrar, aplainar, tornear, colar e parafusar. O uso de pregos sem furação pode provocar rachaduras. Recebe bom acabamento. Aceita bem a colagem, mas não é adequada para a fabricação de compensados, por apresentar rachaduras na tora. Boa aceitação de tinta, verniz, emassamento e polimento.</p>

Fonte: Ferreira (2003).

Tabela 11 – Madeiras nativas recomendadas para a aplicação em pontes

Propriedades	Angelim-Pedra (<i>Hymenolobium Modestum</i>)		Angelim-Pedra (<i>Hymenolobium petraeum</i>)		Ipê (<i>Tabebuia serratifolia</i>)		Jatobá (<i>Hymenaea Courbaril</i>)	
Propriedades Físicas								
Massa específica (g/cm ³)	0,65		0,59		0,87		0,76	
Contração (%) (do p.s.f. até 0% de umidade)								
Radial (%)	4,6		4,1		7,4		3,4	
Tangencial (%)	7,7		6,3		10,1		7,7	
Volumétrica (%)	13,5		10,1		18,4		11,4	
Coeficiente de retratibilidade volumétrica								
Propriedades Mecânicas								
Teor de umidade (%)	verde	12%	verde	12%	Verde	12%	verde	15%
Flexão Estática								
Módulo de Ruptura (MPa)	93,1	120,8	72,0	111,5	157,6	204,6	109,3	139,9
Módulo de Elasticidade,(MPa)	12.800	13.500	9.600	11.800	14.300	16.900	14.600	15.900
Compressão								
Paralela às Fibras (MPa)	44,1	61,1	38,8	53,3	80,0	102,1	55,9	77,3
Normal às Fibras (MPa)	6,8	10,7	6,5	11,5	18,3	25,1	10,1	14,1
Tração Normal (MPa)	4,1	3,9	4,3	3,9	-	-	6,9	6,8
Cisalhamento paralelo às fibras (MPa)	11,2	14,0	10,2	12,5	16,3	16,9	14,8	19,4
Dureza Janka (N)								
Paralela	6200	8060	5430	7810	11550	16650	9020	1250
Perpendicular	6380	7470	5150	5900	12650	14710	9650	11160

Fonte: Souza (1997), adaptado.

Tabela 12 – Madeiras nativas recomendadas para a aplicação em pontes

Ipê (<i>Tabebuia</i> spp.)		
<p>Ocorrência: Das espécies mais comuns, <i>T. impetiginosa</i> ocorre do Nordeste ao Estado de São Paulo; <i>T. heptaphylla</i> é mais restrita ao sul da Bahia, Espírito Santo e Rio de Janeiro. <i>T. serra-tifolia</i> e <i>T. ipe</i> têm distribuição mais ampla, desde a Região Norte/Nordeste até a região Sul</p> <p>Propriedades Físico-Mecânicas: A madeira é muito pesada e dura, com alta resistência mecânica e baixa retratibilidade volumétrica. É resistente ao ataque de insetos e ao apodrecimento.</p>		
Durabilidade Natural	Tratabilidade	Trabalhabilidade
A madeira é altamente resistente a fungos e cupins.	A obstrução dos poros, por óleo-resina e tilos, torna a madeira impermeável às soluções preservativas, mesmo quando sob pressão.	Regular para aplainar, bom para lixar e excelente para tornear e furar. Recomenda-se perfuração prévia para pregar e parafusar. Bom acabamento
Jatobá (<i>Hymenaea</i> spp.)		
<p>Ocorrência: Ocorre sul do México até a Bahia, nas matas de terra firme de solo argiloso e várzeas altas.</p> <p>Propriedades Físico-Mecânicas: A madeira de jatobá pode ser classificada como de alto peso específico, baixa retratibilidade e alta resistência mecânica.</p>		
Durabilidade Natural	Tratabilidade	Trabalhabilidade
Cerne muito resistente aos fungos e cupins. Alburno facilmente atacado. Baixa resistência às brocas marinhas.	Cerne não-tratável com creosoto e CCA-A, quando preservado sob pressão.	A madeira de jatobá não é muito fácil de ser trabalhada, porém sua qualidade quanto à colagem, ao acabamento e à possibilidade de ser curvada com vapor compensa os possíveis problemas. Difícil de aplainar, boa de lixar e de furar e muito boa de tornear. Apresenta alguns problemas para laminar e desenrolar devido à presença de cristais. Boa aceitação de tintas, verniz e polimento.

Fonte: Souza (1997), adaptado.

3. METODOLOGIA

A madeira utilizada no presente trabalho foi obtida de povoamentos de eucalyptus híbrido (*Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*), com idade variando de 8 a 10 anos, *Eucalyptus urophylla*, com 6 anos, *Eucalyptus cloeziana* com 19 anos, *Eucalyptus camaldulenses* com 11 anos e de alguns clones comerciais de eucalipto, em projetos localizados nos municípios de Entre Rios e Inhambupe, na região nordeste da Bahia, pertencentes à COPENER FLORESTAL (atual BAHIA PULP), sediada na cidade de Alagoinhas.

Os solos são variáveis, desde solos extremamente arenosos até solos muito argilosos. O relevo de toda a região é plano e a capacidade produtiva é também bastante variável, com alturas dominantes, aos 6 anos de idade, variando de 10 a de 38 m. A precipitação nas áreas onde foram abatidos os indivíduos está compreendida entre 700 e 2.400 mm.

Foi utilizada também, madeira de um experimento sobre desbastes em clone de *Eucalyptus urograndis*. Esse experimento constituiu-se de seis blocos, com duas repetições por bloco, localizados de modo seletivo, segundo diferentes capacidades produtivas, abrangendo locais de capacidades extremas e intermediárias. O número de tratamento foi igual a quatro, correspondendo a diferentes porcentagens de área basal removidas em cada desbaste. Cada bloco continha oito parcelas permanentes, totalizando 48 parcelas, com área útil de 2.601 m². A área total do experimento, incluindo as bordaduras, é de 19,05 ha, e os tratamentos foram: Tratamento 1 = redução de 20% na área basal presente, eliminando os piores indivíduos; Tratamentos 2 = redução de 35% na área basal presente, eliminando os piores indivíduos; Tratamento 3 = redução de

50% na área basal presente, eliminando os piores indivíduos; e Tratamento 4 = redução de 35% na área basal presente e desrama artificial nas prováveis árvores remanescentes, empregando-se uma altura para desrama de 6 m.

De cada árvore abatida, foram retiradas as duas primeiras ou apenas a primeira tora (toras maiores), com comprimento de 6 m e posteriormente foram transportadas para a UFV, onde permaneceram ao ar livre por um período de aproximadamente um ano, aguardando a oportunidade para a realização do desdobro.

Após esse período, algumas toras foram descartadas devido à sua dimensão reduzida para os propósitos da pesquisa e no final foram processadas 178 toras, visando a obtenção de pranchas destinadas à qualificação físico-mecânica e à produção de caibros para construção das tábuas de madeira laminada protendida, necessárias para a montagem do tabuleiro.

3.1. Descrição e caracterização físico-mecânica da madeira

A madeira foi recebida em forma de toras e foi desdobrada por uma serra-fita Schiffer, pertencente à UFV. Das pranchas obtidas confeccionaram-se corpos-de-prova, destinados aos seguintes ensaios descritivos:

1. Compressão paralela e perpendicular às fibras.
2. Flexão estática.
3. Cisalhamento.
4. Dureza Janka.
5. Impacto.
6. Massa específica básica.
7. Retratibilidade.

Todos esses ensaios seguiram os procedimentos descritos na norma NBR 7190 – Projetos de Estruturas de Madeira, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1997). O teor de umidade por ocasião dos ensaios foi de 12%, obtido após aclimação em câmara climática regulada para a temperatura de 23°C e 65% de umidade relativa.

3.2. Preparo das tábuas a serem utilizadas no tabuleiro da ponte

Após estudo preliminar, em que se decidiu por um certo veículo capaz de transportar certa carga, optou-se pela montagem de um tabuleiro de ponte com 24 cm de profundidade, que permitiria o trânsito de veículos de até 24 toneladas.

Foram confeccionadas tábuas de 3,5 cm de espessura, de 24 cm de largura e de 6 m de comprimento, que formaram o tabuleiro, de maneira semelhante à descrita por Lee et al. (1995). As tábuas foram produzidas com madeira de eucaliptos não-segregada por espécies, isto é, por uma mistura daquelas descritas anteriormente, mas na forma de um conjunto laminado, constituído por três caibros de 3,4 cm de espessura e de 8 cm de largura, totalizando os 24 cm desejados (Figura 8). Esses caibros receberam o adesivo resorcinol-formaldeído (Cascofen RS-240-MD), produzido pela Borden Química Indústria e Comércio Ltda. Esse adesivo se caracteriza por dar aos aderendos resistência elevada, tanto a úmido quando a seco. Ele é, de fato, mais resistente do que a madeira às temperaturas elevadas e ao envelhecimento químico e tem sido o adesivo primordial para madeira laminada e juntas que devem suportar condições severas de trabalho. Por ter preço elevado, ele recebe, freqüentemente, a adição de um outro adesivo fenólico; utilizados os dois em mistura, a temperatura de cura deve ser um pouco mais elevada, oscilando entre 21 e 66 Celsius.

O adesivo foi preparado de acordo com as instruções do fabricante: cinco partes por peso do adesivo, uma parte por peso do catalisador e 0,5% de etanol, adicionado aos dois componentes anteriores, que foram batidos durante 5 minutos e aplicados imediatamente. A taxa de aplicação adotada foi de 300 g/m², metade aplicada em uma face, metade na outra. Como cada caibro tinha 3,4 cm de largura e 6 m de comprimento, cada um deles recebeu 75,6 g do adesivo, em duas porções de 37,8 g. Cada tábua recebeu, portanto, 151,2 g do adesivo; 180 g, na realidade, foram preparadas, para levar em consideração alguma perda no pincel, nos copos etc. Antes de receber o adesivo, muitos dos caibros mostravam-se empenados, arqueados, ou ambos. Esses defeitos foram medidos, para posterior comparação com a tábua pronta (Figura 8). Aplicada a cola, os três caibros que dariam origem a uma tábua foram colados em uma prensa especialmente confeccionada. Tomou-se, neste ponto, o cuidado de colocar caibros empenados em uma certa direção sobre caibros empenados na direção oposta. Finalmente, travessas foram colocadas sobre os caibros, que receberam a pressão transmitida por parafusos e calibradas por intermédio de torquímetro para o valor de



Figura 8 – Caibros de 8 cm, como aqueles utilizados na produção das tábuas, com empenamentos muito notáveis.

1 MPa. Os caibros foram prensados transversalmente, ao mesmo tempo que recebiam a pressão vertical, para remoção das curvaturas (Figura 9). Permitiu-se que o adesivo curasse por um período mínimo de 20 horas, antes da remoção da pressão e da prensa. As tábuas eram dadas como prontas depois de receber pequeno acabamento em desgrossadeira, para remover extravasamento de cola e eventuais falhas na bitola desejada. Cento e doze tábuas laminadas foram produzidas desta maneira.



Figura 9 – Tábua durante a prensagem.

3.3. Determinação da rigidez da tábua individual

Como visto, não se segregaram as espécies botânicas para confecção das tábuas laminadas, isto é, elas foram produzidas com caibros de diferentes espécies, que, no entanto, haviam sido descritas quanto às características mecânicas.

Decidiu-se assim utilizar um material de uso mais universal por engenheiros, que dificilmente saberiam identificar espécies. Para eliminar alguma possível crítica dessa não-segregação, decidiu-se pela determinação do módulo de elasticidade de cada uma das tábuas.

As tábuas foram ensaiadas quanto à rigidez em um quadro de reação existente no Laboratório de Propriedades da Madeira e construído por Petrauski (1999), seguindo a metodologia tradicional nessas situações: carga aplicada por cilindros hidráulicos, reações determinadas por células de carga (Figura 10) e deflexões monitoradas por relógios comparadores e LVDT. Leituras foram feitas das deflexões sofridas pelas tábuas, atuando como vigas simplesmente apoiadas nas extremidades e recebendo carga concentrada no centro do vão. A carga máxima aplicada correspondia a duas cargas de trabalho, considerando uma carga de trabalho aquela que produzia uma flecha no centro do vão igual à admissível, neste caso tomada como o valor da norma, de $L/200$. Uma viga de 3,4 cm por 24 cm de profundidade, apoiada nas duas extremidades, formando um vão de 5,8 m (descontados os apoios), e que tenha um módulo de elasticidade de 15.000 MPa terá uma carga de trabalho de aproximadamente 2.400 N.



Figura 10 – Ensaio de flexão estática das tábuas para determinação de seu módulo da elasticidade.

Uma vez colocadas no quadro e adaptados o cilindro hidráulico e as células de carga, elas recebem solicitação paulatina, crescente, ao mesmo tempo em que as deflexões eram medidas pelos relógios comparadores e, no centro do vão, por um deflectômetro do tipo LVDT. As informações de cargas e respectivas deflexões foram plotadas em gráficos, dos quais foram obtidos os valores de módulos de elasticidade, usando a equação tradicional da teoria das vigas.

Também foi determinada a rigidez por intermédio de uma técnica aparentemente nova, usando um projetor de raio laser comercial. Esse apontador foi colocado em uma das extremidades da viga, sobre o apoio e em sua linha neutra. Acionado, o apontador projetava um feixe de luz coerente até uma tela de vidro situada a 9 m de distância. Quando a carga era aplicada na viga, esta sofria rotação nos apoios, o que causava um deslocamento do feixe na tela, o que era registrado. Atingida a carga desejada, media-se a distância entre os pontos registrados, o que, por simples trigonometria, permitia calcular o ângulo de rotação, em radianos. Essa informação, substituída na equação da linha elástica, permitiu a obtenção de um valor alternativo para o módulo de elasticidade. Apenas três tábuas se romperam quando carregadas até duas cargas de trabalho. Noventa e nove das restantes, as de maiores valores do módulo, foram escolhidas para montagem do tabuleiro da ponte.

Também procurou-se determinar, de cada tábua, a rigidez por medição da velocidade de propagação de ondas de tensão (*stress waves*), por intermédio do aparelho modelo Metrigard. O procedimento é ilustrado na Figura 11.

A velocidade de propagação das ondas também foi medida transversalmente, isto é, ao longo dos 24 cm de largura da tábua, em intervalos de 30 cm de comprimento. Procurou-se, com isso, determinar se a aparelhagem era capaz de identificar regiões de velocidade baixa, portanto de baixa rigidez, e que coincidiam com defeitos muito visíveis ou não. Esta última situação poderia indicar a presença de regiões onde a adesão foi insatisfatória, quem sabe servindo, no futuro, para emprego em instalações que produzem madeira laminada colada.

3.4. Montagem da ponte

Uma ponte, como a que se pretendia construir, consiste essencialmente de um certo número de tábuas, dispostas lado a lado e comprimidas umas contra outras por intermédio de barras de aço tensionadas (Figura 12). As tábuas são previamente



Figura 11 – Determinação do módulo de elasticidade pela velocidade de propagação de ondas de tensão.



Figura 12 – Colocação das tábuas nas barras.

perfuradas (Figura 13) ao longo do seu comprimento; as distâncias entre os furos são calculadas, de tal maneira que um certo número de barras exerça o esforço desejado de compressão perpendicular às fibras. Adotou-se aqui a tensão recomendada por Lee *et al.* (1995), que é de 0,7 MPa. Isso significa que, lateralmente, deverão ser aplicados 6 m x 0,24 m x 0,7 MPa, ou 1,000,000 N na lateral de todo o tabuleiro.



Figura 13 – Perfuração das tábuas.

As barras de aço ST 900/1100, tradicionais na construção de obras em concreto para sua protensão e adquiridas para o propósito de tensionamento do tabuleiro da ponte, tinham diâmetro de 15 mm, com carga de trabalho de 13,5 tf, carga de escoamento de 15 tf e carga mínima de ruptura de 18,5 tf. A composição química, em porcentagem, foi: silício, 0,84; carbono, 0,7; manganês, 18,82; fósforo, 0,029; enxofre, 0,008; níquel, 0,015; cromo, 0,002; vanádio, 0,01; cobre, 0,04; e porcentagem de estanho inferior a 0,01%. As placas utilizadas para transmitir a tensão para a madeira eram de aço A36.

Treze barras seriam, portanto, suficientes para aplicar aquele esforço ao longo do tabuleiro. No entanto, adotou-se um número maior, por segurança. Dezesseis barras foram, de fato, utilizadas. Assim, cada tábua recebeu 16 furos de 20 mm de diâmetro, espaçados de 37,2 cm uns dos outros, que receberam as barras, que foram, finalmente, tensionadas por intermédio de cilindro hidráulico vazado de 30 toneladas (Figura 14).



Figura 14 – Tensionamento das barras, vendo-se o cilindro hidráulico vazado e sua bomba.

Para formar o encontro da ponte, foram utilizados dois grandes blocos de madeira, quadrados, de aproximadamente 50 cm de aresta e com cerca de 5 m de comprimento. Para formar uma rampa de subida para os veículos, utilizaram-se pranchas também de eucalipto, quadradas, de aproximadamente 30 por 30 cm e 6 m de comprimento, dispostas de maneira inclinada a um ângulo de 19 graus (Figura 15).

Colocadas as tábuas sobre os blocos que constituem os encontros, e inseridas nelas as barras de aço, procedeu-se ao tensionamento por intermédio de cilindro hidráulico vazado e previamente calibrado. Cada barra recebeu um esforço de tração de cerca de 66.000 N, após o que as porcas foram apertadas nas roscas das barras, tornando o esforço permanente e transformando todas as 99 tábuas em uma única placa ortotrópica.

Quando do ensaio do tabuleiro sob carga de um caminhão, relógios comparadores foram dispostos ao longo do comprimento do tabuleiro, para mensuração das deflexões longitudinais (Figura 16). Para determinação da deflexão transversal, um sistema de 15 deflectômetros constituído, cada um deles, de dois tubos de papel foram dispostos a cada 25 cm, dos 3,5 m da largura da ponte. Um desses dois tubos, de menor diâmetro, era capaz de deslizar de maneira apertada no interior do outro. Antes do



Figura 15 – Blocos formando o encontro da ponte e a rampa de subida do veículo.



Figura 16 – Relógio comparador sob a ponte, para determinação da deflexão longitudinal.

carregamento, marcava-se no de menor diâmetro a sua posição em relação ao segundo. Aplicada a carga sobre a ponte, com o deslizamento do primeiro tubo, marcava-se novamente a segunda posição. A diferença entre essas duas marcas permitia determinar a deflexão sofrida (Figura 17).



Figura 17 – Deflectômetros sob a ponte, para determinação de flechas ao longo da largura da ponte.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização física e mecânica da madeira empregada

Como relatado anteriormente, a madeira utilizada na confecção do tabuleiro foi descrita quanto às suas propriedades físicas e mecânicas na forma de pequenos corpos-de-prova isentos de defeitos, como preconiza a norma NBR 7190. Esses corpos-de-prova foram usinados a partir de caibros, tomados de forma aleatória dentre aqueles serrados das toras existentes.

Os resultados dos ensaios dessas amostras estão representados na Tabela 13. Os valores médios, calculados com base no número listado de amostras, são seguidos pelos valores mínimos e máximos também obtidos, além dos desvios-padrão calculados. Finalmente, o coeficiente de variação é oferecido, para cada propriedade.

A massa específica média dessas amostras de várias espécies atingiu $0,67 \text{ g/cm}^3$, semelhante ao publicado para a espécie *Eucalyptus grandis*, de $0,64 \text{ g/cm}^3$ (ABNT, 1997). Valores muito superiores foram encontrados, o que se pode atribuir à presença de outras espécies botânicas na amostra, como *Eucalyptus cloeziana* e, mais certamente, *E. camaldulensis*. Os resultados, como se poderia esperar, não seguem uma distribuição normal (Figura 18).

A resistência média à compressão paralela às fibras é elevada e assemelha-se ao valor publicado para uma espécie nativa muito comum no mercado, o angelim-pedra (ABNT, 1997). Pelo histograma, percebe-se uma quase normalidade na dispersão dos

Tabela 13 – Número de amostras, valores médio, mínimo e máximo de cada propriedade investigada, com seu desvio-padrão e coeficiente de variação

Propriedade	Número de Corpos- de- Prova	Valor Médio	Valor Mínimo	Valor Máximo	Desvio-Padrão	Coeficiente de Variação (%)
Massa específica, madeira seca ao ar (g/cm ³)	162	0,67	0,41	1,05	0,15	22
Resistência à compressão paralela (MPa)	142	65,0	23,6	102,6	13,9	21
Compressão perpendicular (MPa):						
- “Resistência”	138	6,1	3,2	20,9	3,1	51
- Módulo de elasticidade	138	413	118	962	178	12,3
Flexão estática (MPa):						
- Resistência	77	107,1	50,1	164,5	26,1	24
- Tensão no LP	77	62,4	27,2	102,1	15,4	25
- Módulo de Elasticidade	77	17195	6425	26039	4033	23
Dureza (N):						
- De topo	117	6300	2845	13047	2439	39
- Lateral	117	4934	1472	12459	2417	49
Coeficientes de contração (%):						
- Tangencial	158	8,3	3,5	11,8	1,7	20
- Radial	158	6,6	3,4	11,3	1,6	24
- Volumétrica	158	15,8	8,8	23,7	3,1	20

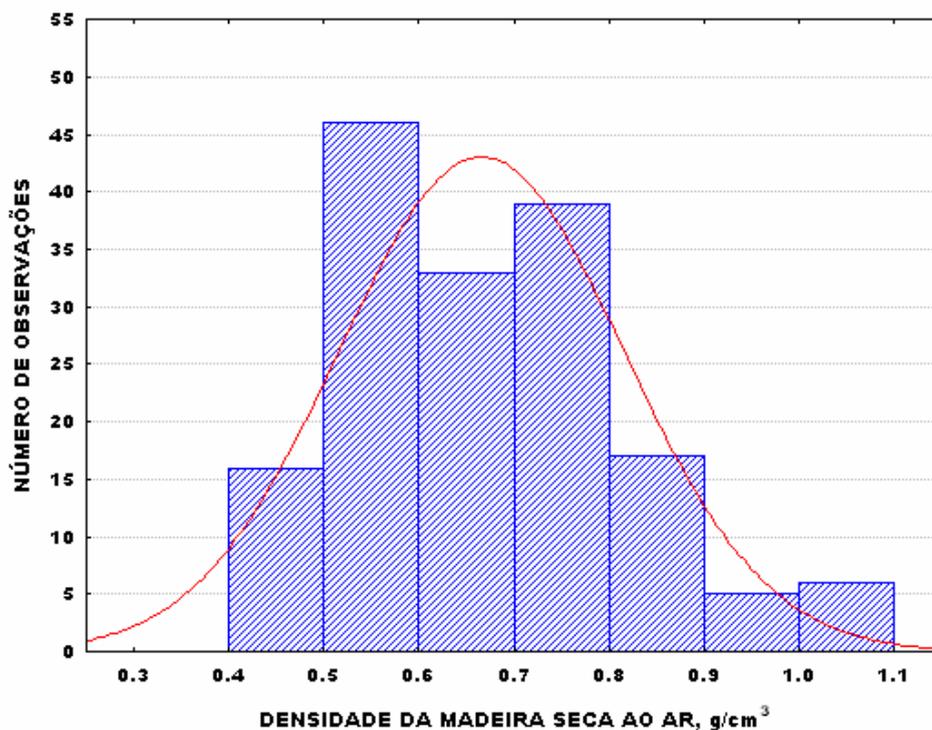


Figura 18 – Histograma da distribuição dos valores de massa específica.

resultados, embora ela esteja visivelmente deslocada para a direita, em direção a madeira mais forte (Figura 19).

A “resistência” à compressão perpendicular, uma característica importante para um tabuleiro de madeira laminada tensionada, é de comparação difícil com outras madeiras nacionais, porque era raramente avaliada, e com madeiras testadas em outros países, porque os procedimentos preconizados pelas normas estrangeiras são diferentes. Ainda assim, é apenas um pouco inferior ao publicado para *Pinus elliottii* (7,0 versus 6,1 MPa) (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999). O histograma também mostra distribuição não-gaussiana, com certa tendência para valores mais baixos (Figura 20).

O valor de módulo de elasticidade na compressão perpendicular também mostra essa tendência para valores mais baixos. Isso parece ser um reflexo da presença de maior número de amostras de massa específica inferior a 0,60 g/cm³, como indicado no terceiro histograma, o de massa específica das amostras.

O módulo de elasticidade à flexão, outra propriedade importante, mostrou valor médio quase idêntico ao de outra espécie nacional muito utilizada, o ipê-roxo (17195 e 16820 MPa) (PFEIL, 1989).

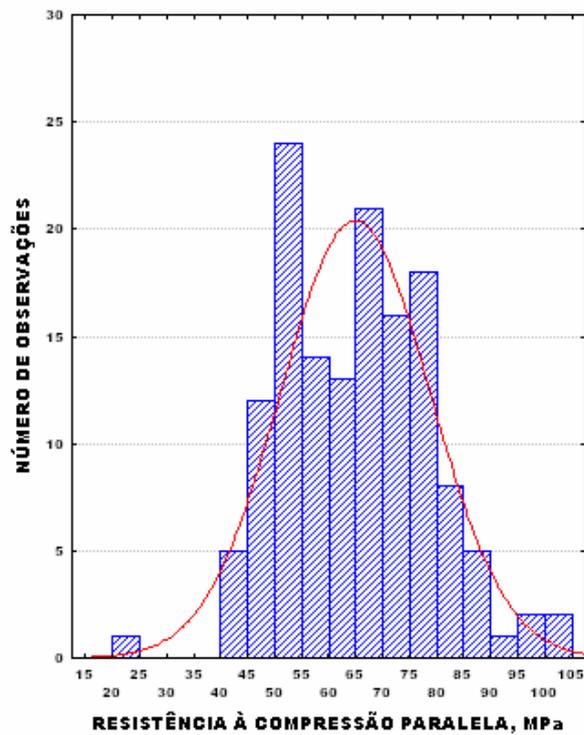


Figura 19 – Histograma da distribuição dos valores de compressão paralela às fibras.

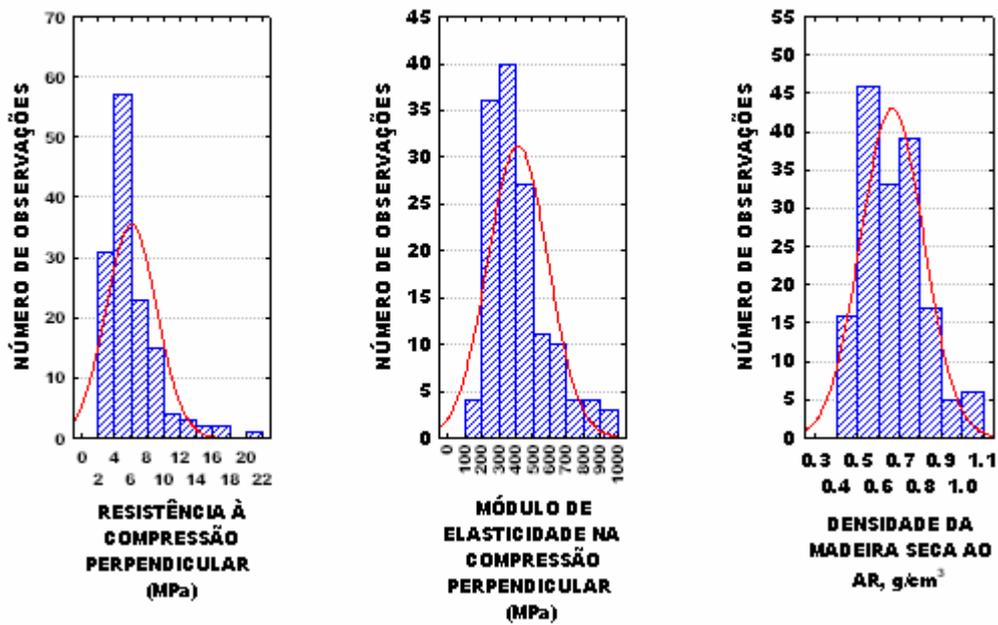


Figura 20 – Histogramas da dispersão dos valores de resistência à compressão perpendicular às fibras, módulo de elasticidade e densidade das amostras.

O valor médio da dureza da mistura de espécies de eucaliptos é menor do que se poderia esperar, especialmente depois de feitas as comparações anteriores. Ele se assemelha mais aos de madeiras de mais baixa massa específica, como a andiroba, do que aos ipês ou angelins.

O coeficiente de variação frequentemente encontrado, quando são ensaiadas amostras para determinação de várias das propriedades citadas, já foi publicado (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999). Ele vale 10%, por exemplo, quando se determina a massa específica. Neste trabalho, o valor calculado atingiu 22%, muito superior, mas esperado, porque se tratava m de várias espécies de eucaliptos. Por outro lado, o relatado para 50 espécies americanas, quando testadas à compressão paralela, atingiu 18%, pouco diferente do aqui encontrado (= 21%). O mesmo pode ser dito do módulo de elasticidade e da resistência à flexão, pouco diferente do encontrado nas publicações.

O coeficiente de variação na compressão perpendicular encontrado é, no entanto, bem mais elevado (50%) do que o publicado, que é de 28%. Este fato talvez seja um reflexo da metodologia de sua determinação, que é diferente da norte-americana.

A madeira norte-americana mais frequentemente utilizada para tabuleiros de pontes laminados é a do *'Southern Pine'*, que, por inspeção visual, alcançou classe "#2". As tensões admissíveis publicadas para essa madeira inspeccionada, de 2 polegadas de espessura e 8 polegadas de largura, são: admissível à flexão, 8,5 MPa; à compressão paralela, 11,1 MPa; à compressão perpendicular, 4,0 MPa; módulo de elasticidade, 11.400 MPa (AMERICAN FOREST AND PAPER ASSOCIATION, 1997). Quando um coeficiente de segurança é aplicado de maneira um pouco aproximada aos valores da mistura de espécies deste trabalho, percebe-se que ela difere pouco em resistência à flexão e à compressão paralela, embora inferior em compressão perpendicular e superior em módulo de elasticidade.

4.2. Caracterização das tábuas laminadas

4.2.1. Rigidez das tábuas

A Tabela 14 mostra os valores médios, mínimos e máximos da rigidez das vigas ensaiadas de acordo com os procedimentos expostos anteriormente, assim como a variação desses valores e o número de unidades amostrais utilizadas.

Tabela 14 – Valores médios, mínimos, máximos e desvios-padrão dos valores do módulo de elasticidade à flexão das vigas (em MPa), bem com o número de unidades amostrais ensaiadas e o coeficiente de variação

Tipo de Determinação	Número de Vigas	Valores do Módulo de Elasticidade (MPa)			Desvios-Padrão
		Mínimo	Máximo	Médio	
Carga na borda A, deflexão no centro	109	10.128	20.777	14.874	1.985 (CV = 13%)
Carga na borda B, deflexão no centro	107	10.246	20.271	14.785	1.982 (CV = 13%)
Carga na borda A, deflexão a ¼ do vão	109	10.535	21.064	15.414	2.075 (CV = 13%)
Carga na borda B, deflexão a ¼ do vão	107	10.610	20.630	15.428	2.147 (CV = 14%)
Carga na borda A, rotação do apoio	107	11.152	22.701	16.141	2.190 (CV = 14%)
Carga na borda B, rotação do apoio	104	11.175	21.777	16.166	2.391 (CV = 15%)

Embora o número de vigas construídas tenha sido de 109, em algumas situações obtiveram-se os valores de uma quantidade menor, freqüentemente por algum problema mecânico dos equipamentos e, em dois casos, por ruptura da viga.

Em todos os seis casos, pelo teste Kolmogorov-Smirnov, para 5% de significância, os valores obtidos seguem distribuição normal. A Figura 21 apresenta os histogramas desses casos.

A dispersão dos valores pode ser mais nitidamente vista na Figura 22, para um dos casos. A linha cheia representa os valores médios; as duas linhas horizontais englobam 95% das unidades amostrais. Com a carga aplicada na borda A, sete unidades amostrais mostraram módulos de valores muito extremos, quatro dos quais elevados e três, muito baixos. Cada uma dessas tábuas com valores extremos foi inspeccionada. Sempre se pôde encontrar uma razão para esses valores. Por exemplo, a de valor mais elevado, a viga 19, caracterizava-se por sua massa específica alta (819 kg/m^3), e pela ausência de defeitos. As de rigidez baixa mostravam, por outro lado, defeitos muito sérios. Elas foram excluídas quando da montagem do tabuleiro da ponte.

As dispersões de todos os seis casos de carregamento foram agrupadas na Figura 23.

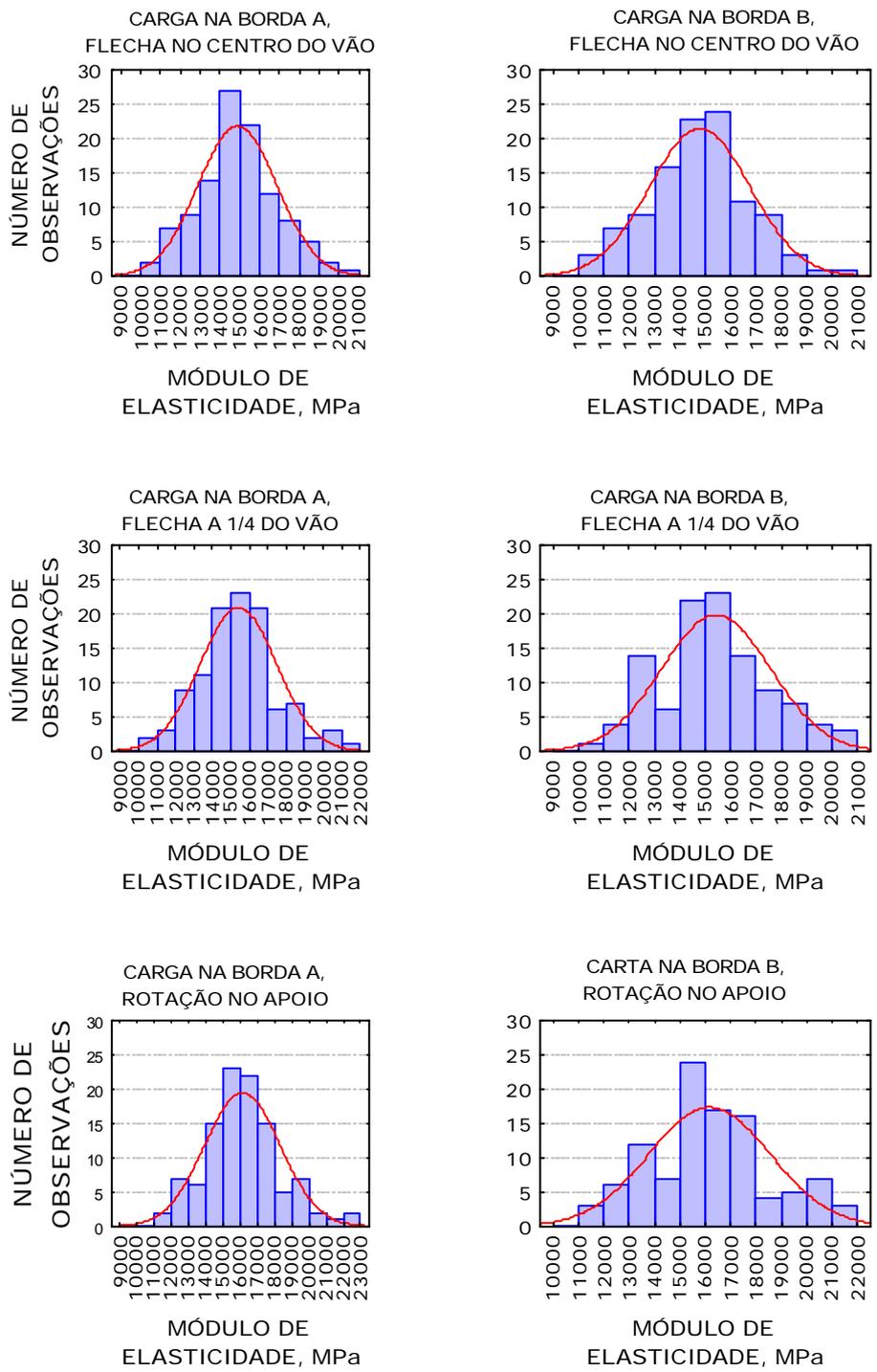


Figura 21 – Histograma dos valores de E, com as combinações de modo de aplicação da carga e maneira de determinação da rigidez.

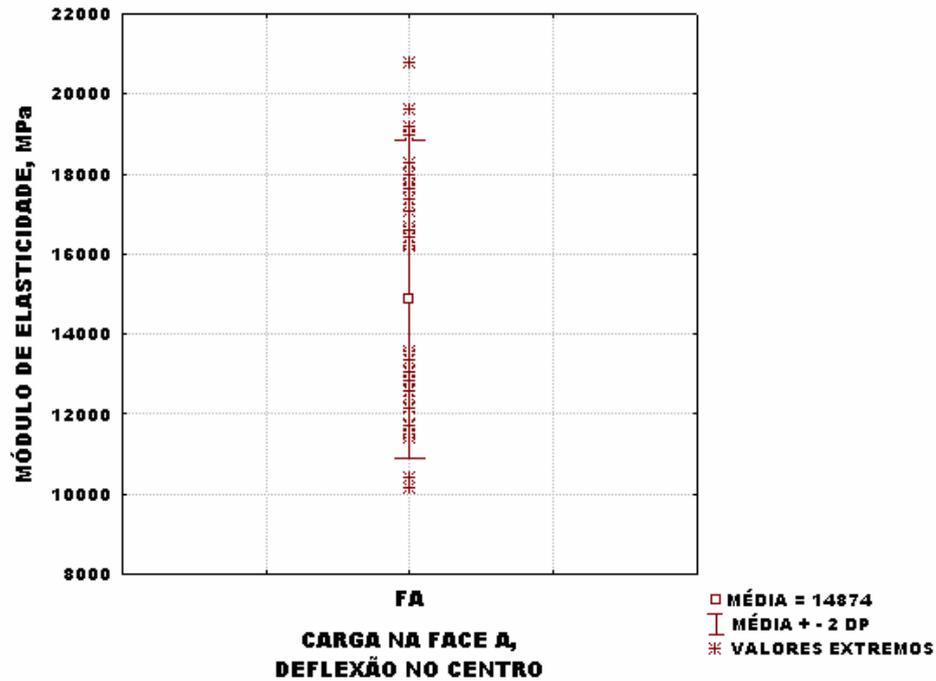


Figura 22 – Dispersão dos valores de ME para deflexão no centro do vão e para cargas na borda A.

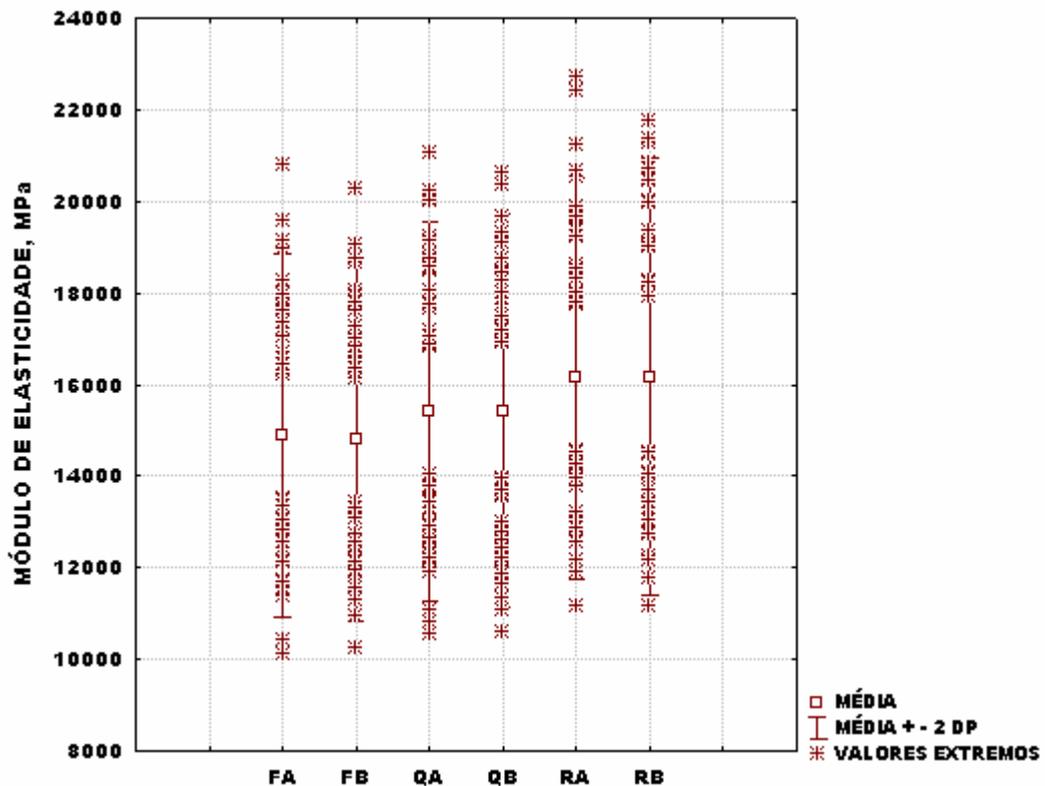


Figura 23 – Dispersão dos valores de E nos seis casos (FA = deflexão lida no centro, carga na face A; FB = o mesmo, face B; QA = deflexão a ¼ do vão, carga na face A; QB = o mesmo, face B; RA = rotação no apoio, face A; e RB = o mesmo, face B).

A correlação entre os valores de ME determinados nas três situações, nas duas bordas, foi sempre elevada (Figura 24). Naquele caso, três unidades amostrais que estão fora do intervalo de confiança de 95% poderiam ser citadas.

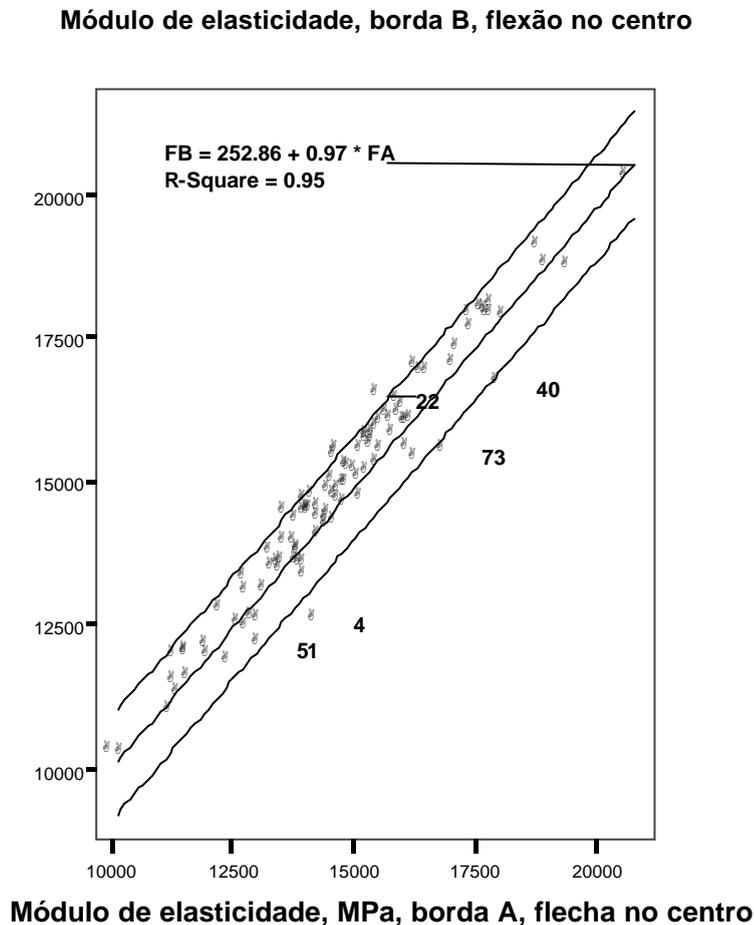


Figura 24 – Relação entre valores observados de ME com a carga aplicada nas duas bordas e determinados pela deflexão no centro do vão.

A correlação de Pearson nas seis possibilidades de comparação é apresentada na Tabela 15.

Os valores de ME determinados das três maneiras estão correlacionados entre si; as médias foram também estatisticamente iguais quando a determinação se deu pela flecha a um quarto do vão ou pela rotação no apoio. A determinação do módulo, no entanto, produz valores diferentes entre bordas quando se usa a flecha tomada no centro do vão. A Tabela 16 mostra os valores da estatística t para amostras dependentes e dá outras informações a respeito dessas diferenças.

Tabela 15 – Correlação de Pearson entre as seis possíveis variáveis, duas a duas

		FB	RA	RB	QA	QB
FA	Correlação	.975(**)	.895(**)	.901(**)	.983(**)	.948(**)
	N	107	107	104	109	107
FB	Correlação	1	.884(**)	.912(**)	.967(**)	.980(**)
	N	107	106	104	107	107
RA	Correlação		1	.823(**)	.905(**)	.884(**)
	N			103	107	106
RB	Correlação			1	.908(**)	.925(**)
	N				104	104
QA	Correlação				1	.963(**)
	N					107
QB	Correlação					
	N					

** A correlação é significativa a 0,01% FA = deflexão lida no centro, carga na face A; FB = o mesmo, face B; QA = deflexão a ¼ do vão, carga na face A; QB = o mesmo, face B; RA = rotação no apoio, face A; e RB = o mesmo, face B.

Tabela 16 – Teste t para amostras dependentes, empregado em unidades amostrais pareadas, para análise da diferença entre valores médios de ME determinados nas duas bordas e nas três situações de medição

	Diferenças entre pares de valores de ME, em MPa					t cal	GL	Prob.
	Média	Desvio-Padrão	Erro-Padrão da Média	Intervalo de Confiança de 95% da Diferença				
				Inferior	Superior			
Par FA - FB*	127,852	447,262	43,238	42,127	213,576	2,957	106	0,00
Par QA - QB	24,539	575,266	55,613	-85,719	134,798	0,441	106	0,66
Par RA - RB	-11,150	1387,173	136,682	-282,258	259,959	-0,082	102	0,93

* Par FA-FB significa a diferença entre valores de ME determinados pela flecha no centro do vão nas bordas A e B; de maneira similar, QA-QB e RA-RB significam a diferença entre as bordas pela determinação dos módulos pela flecha a ¼ do vão e pela rotação no apoio, respectivamente.

A diferença encontrada para flecha no centro do vão (de 128 MPa, ou 0,8% da menor média) é pequena e certamente inferior ao erro associado com a precisão da aparelhagem utilizada e medições de vão, largura e profundidade das vigas etc. Esse erro experimental foi estimado em 400 MPa.

Como pode ser constatado na Tabela 13, a rotação no apoio fornece valores de E superiores (cerca de 8,5 %) aos obtidos pela determinação da flecha no centro do vão, o que pode ser também verificado na Figura 25, em que a inclinação da equação de

regressão é de 0,82. Causa certa preocupação o valor da interseção dessa equação, que atinge o valor de 1.729,95. Tomado como um erro sistemático, ele parece excessivamente elevado e de difícil explicação. Por outro lado, o erro-padrão da estimativa dessa equação vale 894 MPa, bastante reduzido. O valor F é de 421, indicando uma correlação significativa. Ambos os coeficientes do modelo são também significativos. Há alguns resultados extremos; cinco deles, identificados no diagrama de dispersão, ultrapassam três vezes o erro-padrão da estimativa.

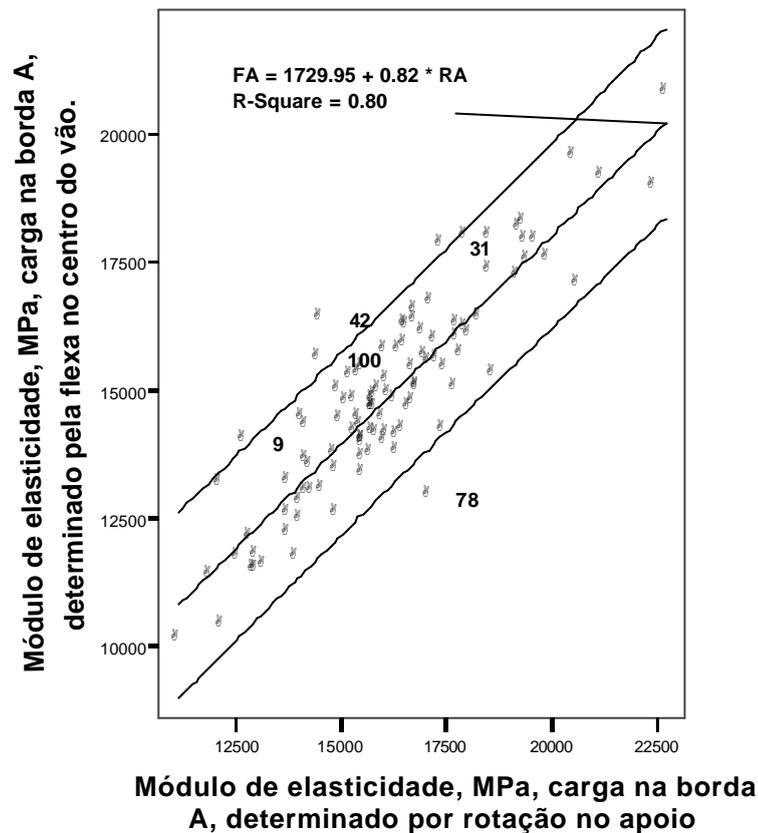


Figura 25 – Relação entre módulos de elasticidade com carga aplicada na borda A e determinados por deflexão no centro do vão ou por rotação no apoio.

De qualquer modo, os resultados parecem indicar que a determinação de E pela rotação do apoio é viável, embora não conservadora. A dispersão poderá estar indicando que essa metodologia discrimina melhor uma viga de outra, pelo menos naquilo que diz respeito à rigidez. Também é possível que a rotação no apoio não seja influenciada tão nitidamente pela presença de algum tipo de defeito, como nós, na região central da viga. Situação semelhante parece ocorrer quando se mede a deflexão a $\frac{1}{4}$ do vão onde os valores de E são sempre maiores.

Freqüentemente, os valores obtidos quando as cargas foram aplicadas nas bordas A e B diferiam entre si, em cada uma das três maneiras de determinar as deflexões ou rotação. Essas diferenças, em valores absolutos, estão sumarizadas na Tabela 17. Há pouco sentido no cálculo da uma diferença média, porque os valores têm distribuição fortemente assimétrica (Figura 26). Mais interessante parece ser a classificação em percentis, vista naquele quadro. Assim, 50% das vigas ensaiadas mostraram diferença entre bordas, pela deflexão no centro, de 261 MPa; em 90% delas, a diferença era de apenas 691 MPa. Na situação em que o módulo era medido pela flecha a $\frac{1}{4}$ do vão, os percentis eram mais elevados. Mais importantes eram os valores dos percentis obtidos pela rotação nos apoios. Os valores de E entre bordas atingiram até cerca de 4.800 MPa; em 50% das unidades amostrais foram inferiores a 797 MPa, mas em 10% das unidades amostrais ela ultrapassava 2.207 MPa. A Figura 27 ilustra melhor essas diferenças.

Tabela 17 – Diferenças mínima e máxima detectadas entre as bordas A e B nos valores de E obtidos com as três maneiras de medição das deflexões, e respectivos percentis

Método de Determinação das Deflexões	Diferença entre Bordas (MPa)		Diferença (MPa) nos Percentis		
	Mínima	Máxima	50	70	90
Flecha no centro do vão	2	1860	261	451	691
Flecha a $\frac{1}{4}$ do vão	7	1631	293	505	1075
Rotação dos apoios	17	4801	797	1394	2207

Apesar dos valores extremos encontrados, das diferenças significativas entre médias e de algumas correlações pouco acentuadas, uma informação muito importante pôde ainda ser vista na Tabela 14: os coeficientes de variação dos valores dos módulos não ultrapassam os 15%, bem aquém dos 22% obtidos em corpos-de-prova isentos de defeitos de 50 espécies de madeira e publicados no *Wood Handbook* (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999). Assim, o processo de adesão de três peças de madeira e conseqüente classificação desses substratos leva à obtenção de material menos variável, pelo menos naquilo que diz respeito à rigidez.

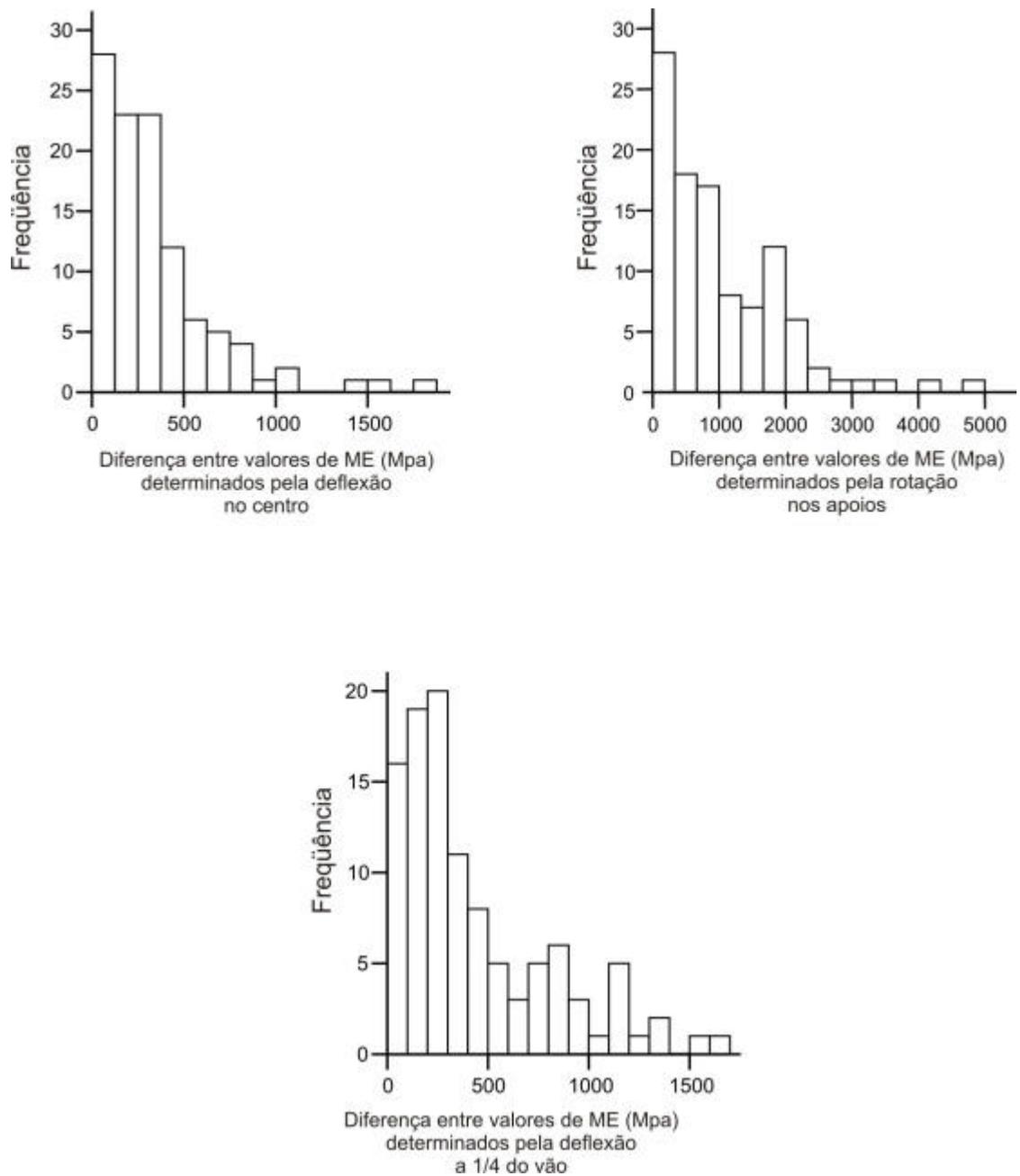


Figura 26 – Frequência observada na diferença entre valores de ME, em MPa, das duas bordas, nas três situações de medição das deflexões.

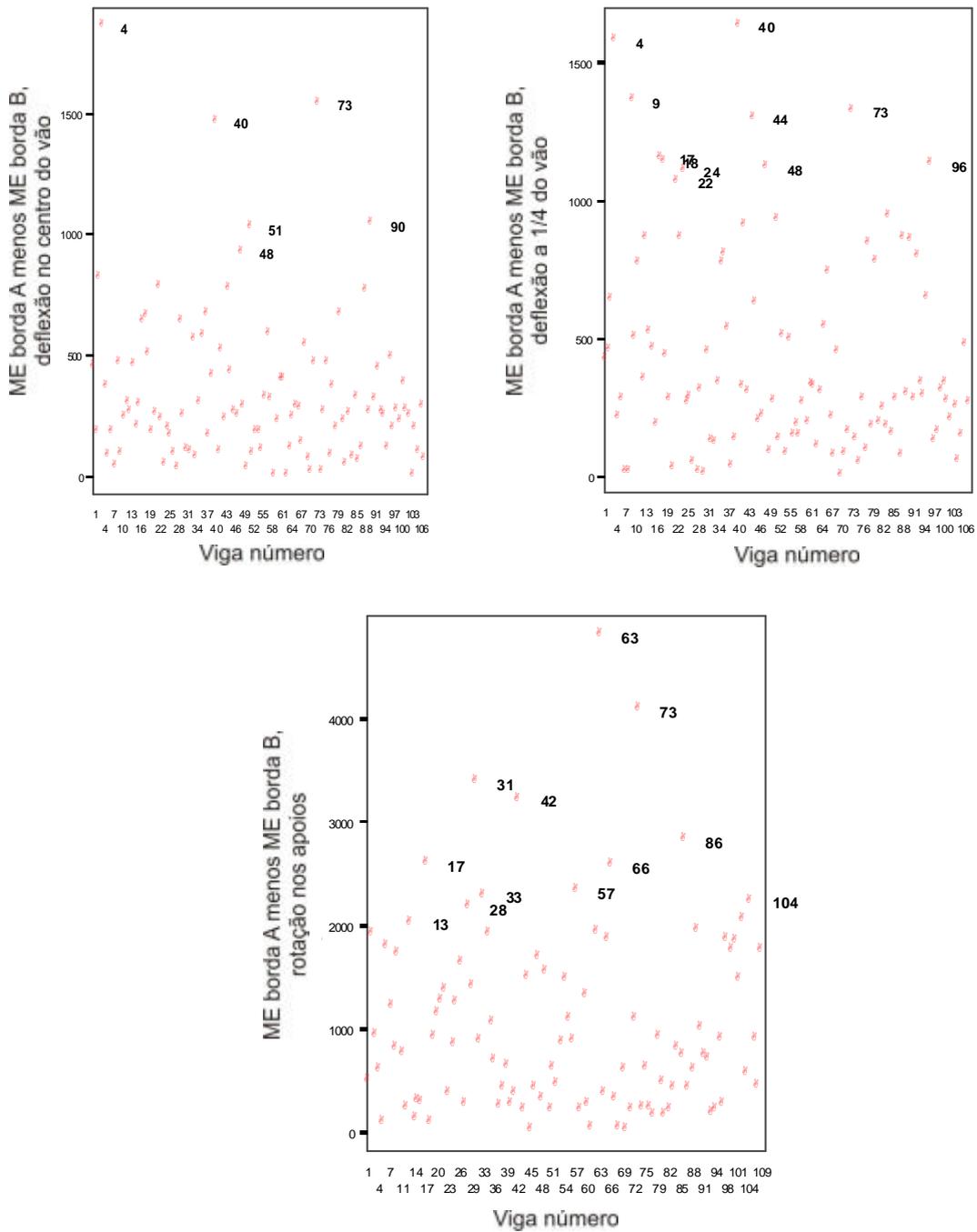


Figura 27 – Dispersão das diferenças entre módulos de elasticidade das duas bordas, das três maneiras de determinação da deflexão.

4.2.2. Massa específica das tábuas

A massa específica média das vigas, calculada com valores de peso e volume da madeira seca ao ar e construídas pela justaposição de três peças de madeira atingiu cerca de 708 kg.m^{-3} , com desvio-padrão de $66,7 \text{ kg.m}^{-3}$, o que resulta em num coeficiente de variação de 9,4%. O valor correspondente do *Wood Handbook* é de 10%. Outras informações importantes constam da Tabela 18.

Tabela 18 – Valor médio, máximo, mínimo e informações adicionais a respeito da massa específica das vigas

		Estatística	Erro-Padrão
Massa específica	Média	707,98	6.386
	Intervalo de confiança de 95% para a média	Menor	695,32
		Maior	720,64
	Mediana	713,00	
	Desvio-padrão	66.669	
	Densidade mínima	542	
	Densidade máxima	851	

A distribuição dos valores segue a curva normal e é ilustrada na Figura 28. O histograma é apresentado na Figura 29.

Como frequentemente relatado, a massa específica explica certa parte da variabilidade dos valores de E (Figura 30) e, como sempre, a correlação é fraca (o valor de R^2 foi de apenas 51%, o erro-padrão da estimativa vale 1.397 MPa) e é de pouco interesse prático. Há vários valores extremos, mostrados na figura.

A situação é ainda mais desfavorável quando se mediu o módulo pela rotação no apoio (Figura 31). O valor de r^2 é menor, e a densidade explica apenas 36% da variação nos valores de ME. Há inúmeros valores que permanecem fora do intervalo de predição de 95%.

Não se pode, portanto, prever a rigidez da viga pela determinação de sua densidade, outros fatores teriam que ser levados em consideração. Por outro lado, não foi constatado qualquer comportamento anômalo dessa relação; o modelo parece ser o mesmo linear já descrito por outros autores.

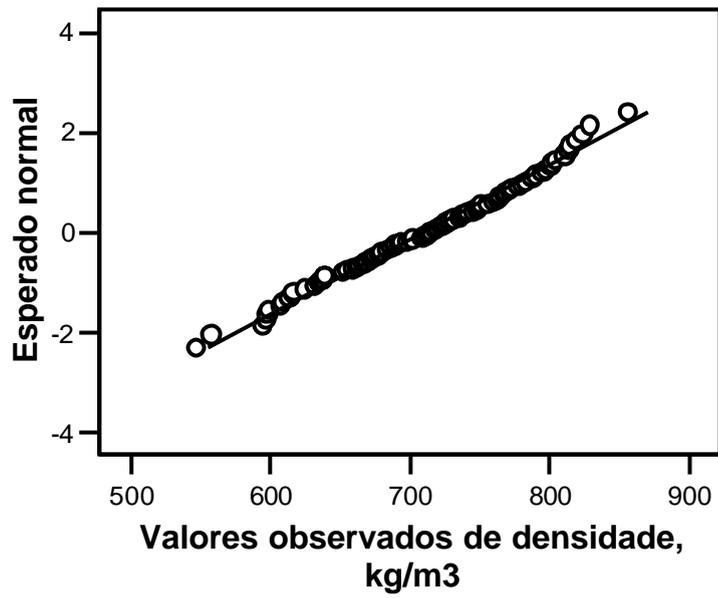


Figura 28 – Diagrama QQ dos valores observados.

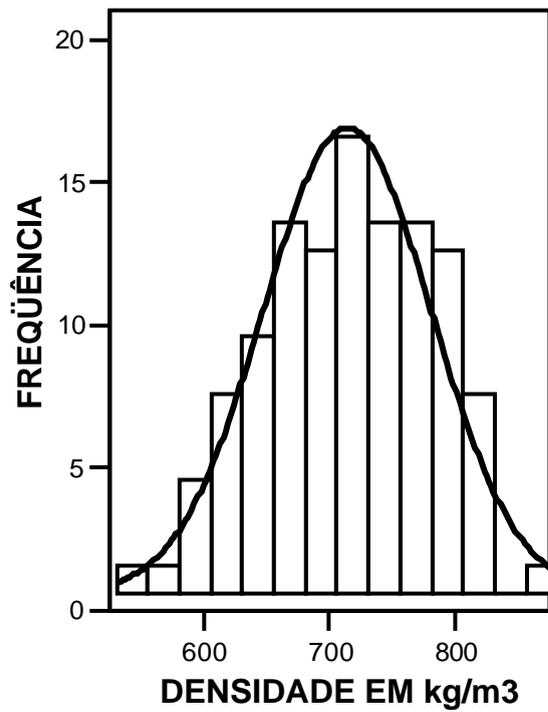


Figura 29 – Histograma dos valores da densidade das vigas.

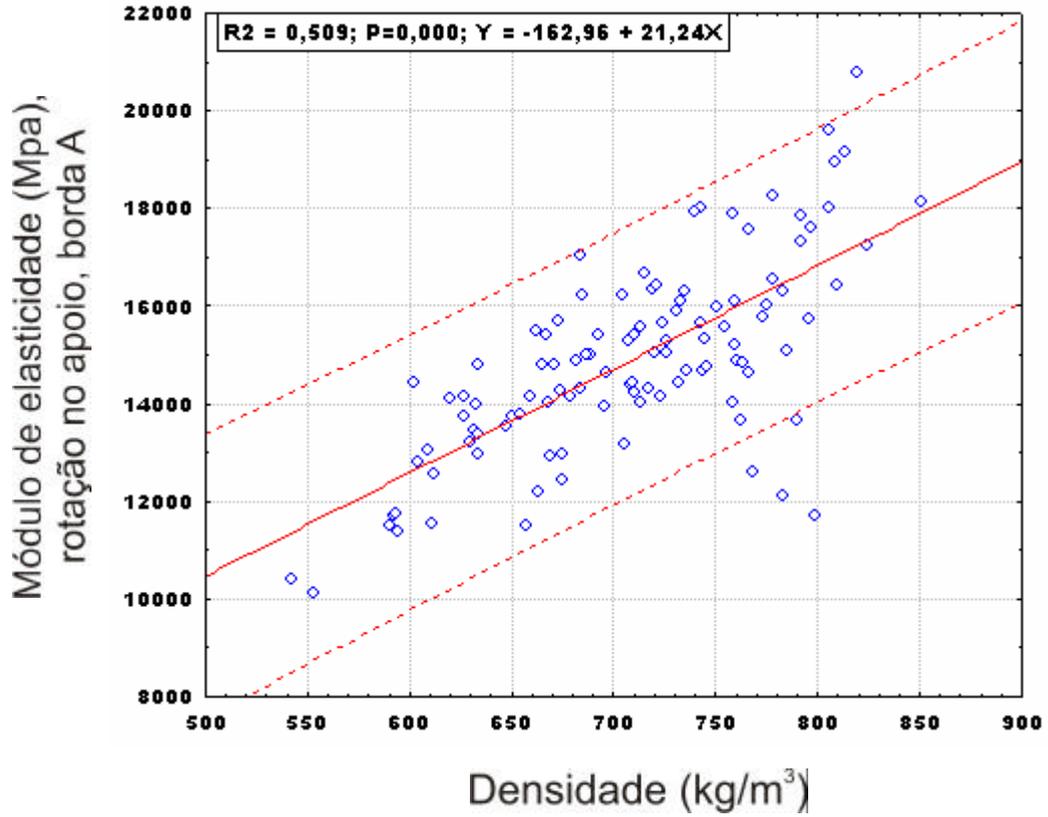


Figura 30 – Regressão entre módulo de elasticidade, flecha no centro, borda A e densidade das vigas.

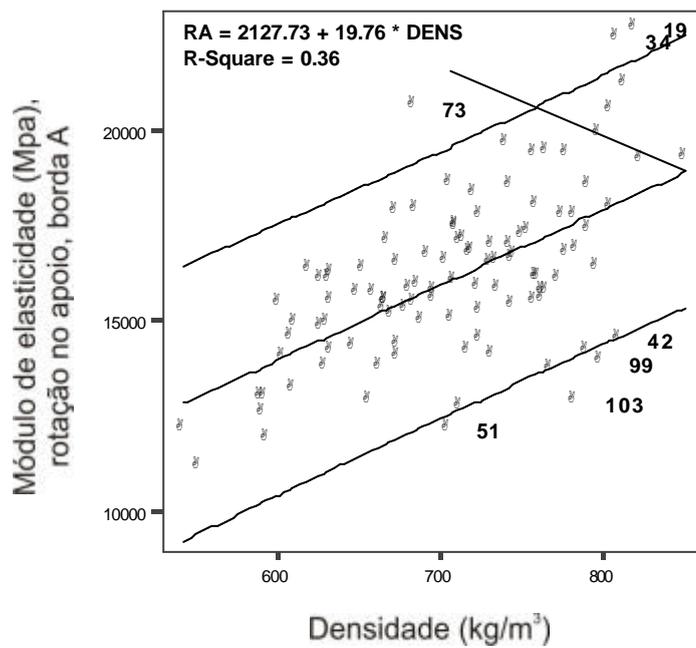


Figura 31 – Regressão entre módulo de elasticidade por rotação no apoio e densidade das vigas.

4.2.3. Defeitos nas tábuas indicados pela velocidade de propagação de ondas de tensão

As tábuas foram submetidas a um ensaio no qual se determinou a velocidade de propagação de ondas de tensão na sua direção transversal, portanto perpendicularmente às fibras, ao longo dos 24 cm de largura.

A Figura 32 mostra uma dessas tábuas, com um diagrama cartesiano mostrando os tempos, em microssegundos, decorridos desde o impacto do martelo até a captação da onda na outra extremidade. Vê-se que os tempos têm valores muito uniformes até certo ponto na extremidade da tábua, onde aumentam muito. Esse local correspondia a um defeito muito sério, uma rachadura longa, que é facilmente vista na imagem ampliada.



Figura 32 – Imagem de uma tábua inteira, com um diagrama mostrando os valores de tempo transcorrido na propagação da onda de tensão, e parte ampliada da imagem, mostrando os locais contendo defeitos.

A Figura 33 é semelhante à Figura 32. Ocorre mudança abrupta, para maior, no valor do tempo de transmissão da onda. O local dessa ocorrência é visto na imagem ampliada. Trata-se de fenda muito longa, entre dois dos caibros que constituem a tábua, e que exame posterior indicou tratar-se de um defeito atribuído a uma usinagem imperfeita da superfície de um deles.

Em ambos os casos, o uso da aparelhagem parece desnecessário. Os defeitos são muito sérios e facilmente percebidos por inspeção visual.

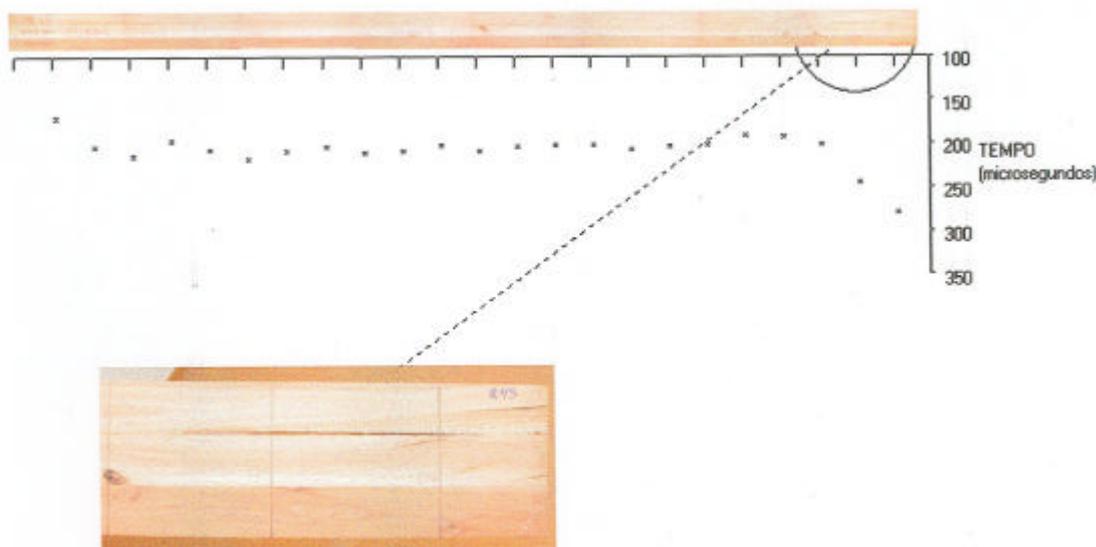


Figura 33 – Imagem de uma tábua inteira, com um diagrama mostrando os valores de tempo transcorrido na propagação da onda de tensão e parte ampliada da imagem, mostrando os locais contendo defeitos.

Algo diferente ocorreu na tábua da Figura 34. O diagrama de tempo mostra aumento muito nítido no interior da tábua, sem se que perceba defeito aparente. Uma inspeção visual posterior não permitiu detectar fendas, rachaduras ou falhas de usinagem. Talvez sim, neste local, houvesse uma falha na adesão, embora outros fatores poderiam estar envolvidos, como apodrecimento incipiente interno, mudança abrupta da densidade por uma razão qualquer.

O procedimento pode ser talvez questionado, porque a distância muito pequena, de 24 cm, com tempos também muito curtos, pode levar à imprecisão na leitura. Entretanto, os valores de rigidez transversal aqui encontrados têm a mesma ordem de grandeza de outros, de espécies diferentes, descritos em publicações especializadas (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999)

4.3. Avaliação experimental do comportamento do tabuleiro

Os resultados dos ensaios do tabuleiro, quando carregado, estão aqui representados. O veículo, não-padronado, tinha carga de 13 toneladas em seu eixo traseiro.

Não se notou qualquer deformação residual após a retirada a carga. Ocorreu, no entanto, pequena movimentação vertical nos apoios, medida por relógio comparadores apoiados no solo e que atingiu 1 mm em uma das extremidades e 2,15 mm, em outra.

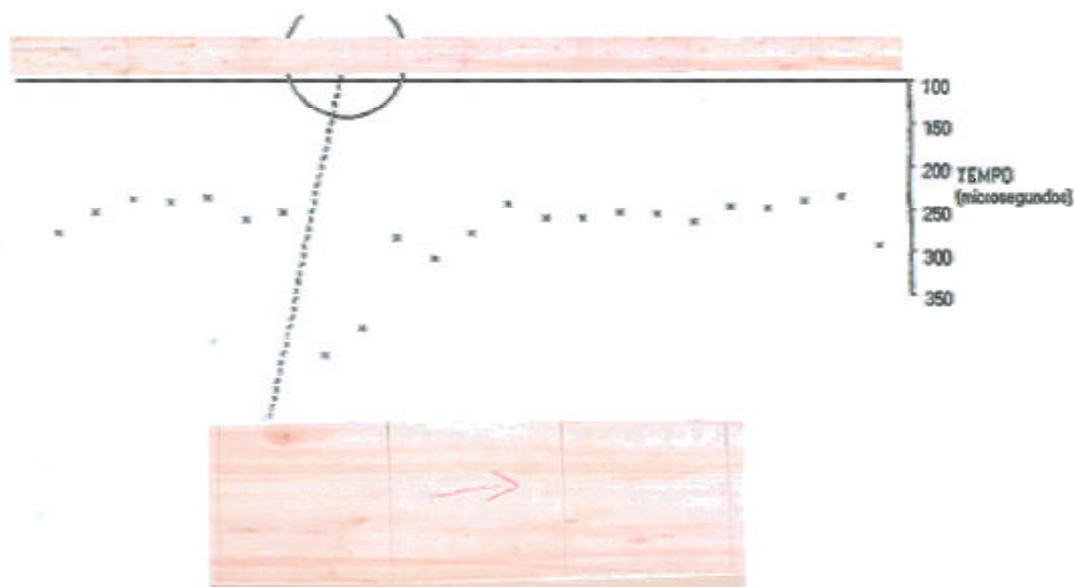


Figura 34 – Imagem de uma tábua inteira, com um diagrama mostrando os valores de tempo transcorrido na propagação da onda de tensão e parte ampliada da imagem.

Esse movimento foi, no entanto, automaticamente extraído dos resultados de deflexão, porque todos os demais deflectômetros estavam suportados em um jugo, barra metálica suspensa nas duas extremidades do tabuleiro e que, portanto, movia-se com ele.

As deflexões longitudinais, isto é, ao longo dos 6 m de comprimento do tabuleiro, estão representadas na Figura 35. A flecha máxima ocorreu, como esperado, no centro, a 3 metros da cada extremidade, e atingiu um valor de 3,2 mm. O tabuleiro testado não possuía outras cargas permanentes (guarda-corpo, piso etc), além do seu peso próprio. A flecha efetiva, que inclui aquelas outras cargas, não pôde, portanto, ser determinada. Assim, a flecha corresponde apenas ao carregamento acidental (o peso do veículo e sua carga). De acordo com a norma NBR 7190, ela não deve ultrapassar o valor $L/200$ ($= 30$ mm), muito superior ao efetivamente encontrado aqui ($= 3,2$ mm). Ainda que se adote um critério mais restritivo em que materiais frágeis não-estruturais são empregados em parte da estrutura e se considere o efeito da fluência (que, por razões óbvias, não foi avaliada), em cujo caso poderia ser adotada uma deformação-limite igual a $L/350$ ($= 17$ mm), o valor de deformação aqui encontrado foi muito inferior, para aquele veículo. Se for considerada alguma vibração, a norma estipula uma deformação-limite de 15 mm, também superior.

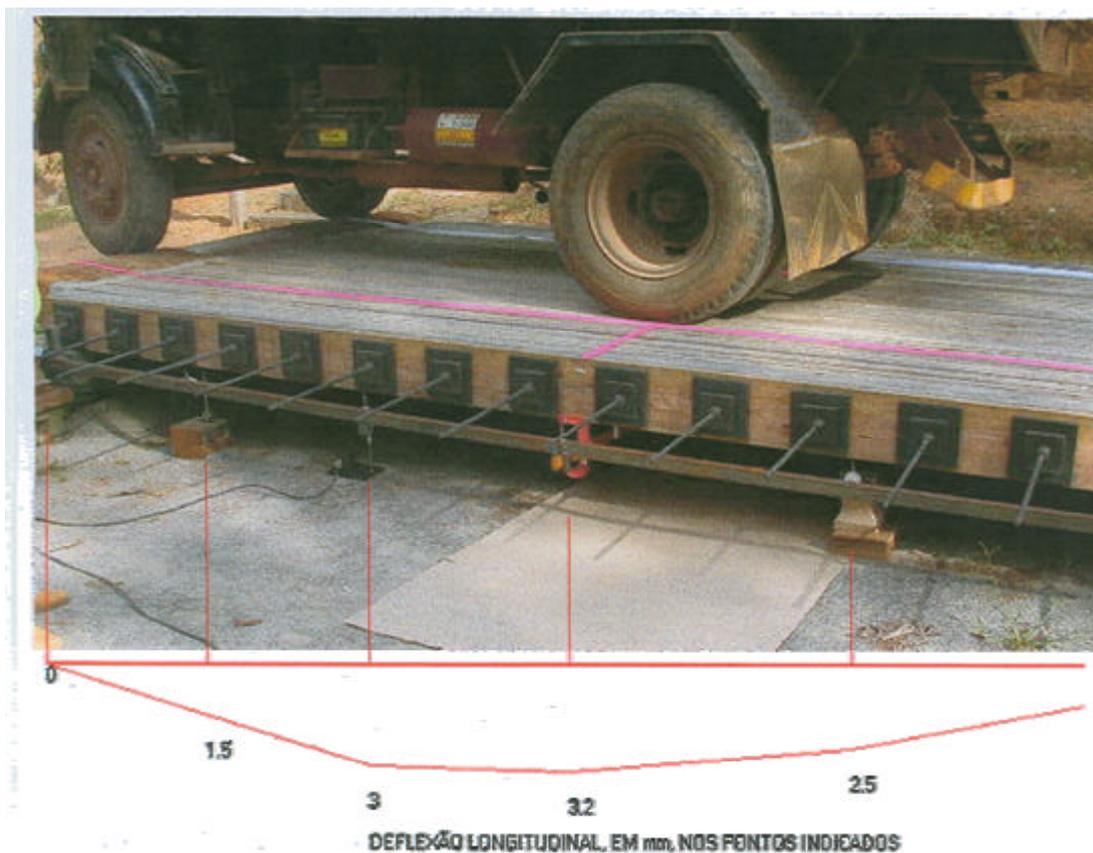


Figura 35 – Deflexões longitudinais, em mm, em cinco pontos ao longo do comprimento do tabuleiro.

O comportamento da deflexão transversal do tabuleiro, quando sob carga, é ilustrado na Figura 36. O diagrama cartesiano abaixo do tabuleiro traz os valores medidos da deflexão sob carga, em 15 pontos equidistantes ao longo dos 3,5 m de largura da ponte.

O sistema adotado para medição dos movimentos verticais parece ter se mostrado adequado. Veja-se, por exemplo, que os maiores valores registrados ocorrem em duas regiões, imediatamente abaixo das rodas do veículo.

Não se pôde encontrar, em vários trabalhos realizados de maneira semelhante, qual deve ser o valor admissível dessa deflexão, ao contrário do que acontece com a deflexão longitudinal. Admitindo para a transversal o mesmo valor-limite, $L/200$ ($= 17,5$ mm), ou mesmo um valor mais restritivo ($L/350 = 10$ mm), o tabuleiro mostrou-se adequado para o veículo, pois a deformação não atingiu 4 mm na vertical. Isso indica que o valor adotado para protensão (66.000 N em cada barra) foi suficiente para que as tábuas adquirissem uma configuração estável e rígida.



Figura 36 – Deflexão transversal do tabuleiro, quando carregado, medida em 15 pontos, em mm.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados e discutidos acerca da avaliação de um tabuleiro de ponte rodoviária, construído através de um sistema de protensão utilizando peças de eucalipto, pode-se concluir que:

- Relativo à caracterização da madeira jovem (9 anos) e proveniente de desbastes, no que diz respeito às propriedades físicas e mecânicas, conclui-se que ela apresentou massa específica moderadamente elevada, o que se refletiu em propriedades de resistência mecânica também satisfatórias para fins estruturais, como foi o caso do emprego na construção da ponte.

- Em função da mistura de materiais genéticos como o híbrido (*Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*), *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus cloeziana*, *Eucalyptus camaldulensis* e alguns clones comerciais do gênero e da presença de árvores jovens, foram encontrados coeficientes de variação para os ensaios físico-mecânicos acima da média daqueles que ocorrem quando são ensaiadas madeiras de espécies individuais e, principalmente, madeira proveniente de árvores maduras.

- Em relação às tábuas produzidas a partir da adesão de peças menores, estas se comportaram de forma satisfatória quanto ao módulo de elasticidade, apresentando valores de rigidez compatíveis com peças produzidas a partir de espécies tradicionalmente utilizadas para a mesma finalidade em países de acentuada tradição madeireira.

- A junção de peças menores para a formação daquelas de maior largura e aptas a serem utilizadas na confecção de tabuleiro proporcionou uma acentuada redução nos

coeficientes de variação, tanto para os ensaios de massa específica (22% para 9,4%), quanto daqueles de determinação do módulo de elasticidades (22% para 14%).

- A utilização de ensaios não-destrutivos, por exemplo, ondas de tensão, poderá ser útil na detecção de defeitos nas peças de madeira, como verificado na alteração da velocidade de propagação de ondas de tensão, provocada pela ocorrência de defeitos, constatada quando as peças utilizadas neste estudo foram submetidas a esta análise.

- O desempenho do tabuleiro foi altamente satisfatório no que diz respeito à sua rigidez na direção longitudinal, pois a deformação com a aplicação da prova de carga (13 t) foi várias vezes inferior ao valor preconizado pela norma NBR 7190, ou seja, $L/200$.

- Também na direção transversal para a largura de 3,5 m, as deformações mensuradas foram também várias vezes inferiores aos valores preconizados pela NBR 7190 da ABNT.

- Diante dos pequenos valores de deformação encontrados nas direções longitudinal e transversal quando da aplicação da carga de 13 t sobre o tabuleiro em questão, também pôde concluir que as cargas de protensão aplicadas nas barras de aço (66.000 N por barra) foram suficientes para permitir o adequado desempenho do tabuleiro.

- É possível a utilização da madeira de eucalipto jovem, de baixa qualidade e ainda proveniente de uma mistura de materiais genéticos para aplicações de maior valor agregado, desde que se utilizem tecnologias disponíveis.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLA, A. C. P. B. **Utilização da madeira de *Eucalyptus* em estruturas de pontes**. 2002. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2002.

ALVAREZ, R. A.; MARTITEGUI, F. A. **Estructuras de madera**: diseño y cálculo. Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho: AITIM, 2. ed., 2000.

ALVES, N. M. P. **Análise de pontes de madeira protendidas transversalmente formadas por vigas-t**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cálculo e execução de estruturas em madeira**. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 55 p.

CARRASCO, E. V. M. **Resistência, elasticidade e distribuição de tensões nas vigas retas de madeira laminada colada (MLC)**. 1989. 80 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989.

CARREIRA, M. R. **Critérios para classificação visual de peças de *Pinus sp.*** 2003. 164 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2003.

CREWS, K.; RITTER, M.; GANGARRO, H.; DICKSON, B. State of art: research on stress laminated timber bridge decks in Australia and Norte America. In: PACIFIC TIMBER ENGINEERING CONFERENCE, 1994, Gold Coast. **Proceedings...** Gold Coast, Austrália, 1994, v. 2, p. 123-130.

DURLO, M. A.; MARCHIORI, J. N. C. **Tecnologia da madeira: retratibilidade**. Santa Maria: CEPEF/FATEC, 1992. 33 p. (Série Técnica, 10)

FERREIRA, O. P. **Madeira**: uso sustentável na construção civil. São Paulo Instituto de Pesquisas Tecnológicas: SVMA SindusCon-SP, 2003. 59 p. (Publicação IPT; 2980)

FLAGA, P. Advances in materials applied in civil engineering. **Journal of materials processing technology**, v. 106, p. 173-183, 2000.

FONTE T. F.; CALIL JUNIOR, C. Pontes protendidas de madeira: alternativa técnico-econômica para vias rurais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 552-559, maio/ago. 2007

FONTE, T. F.; CALIL JUNIOR, C. Desempenho estrutural de ponte protendida transversalmente de Eucalipto citriodora. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 8, n. 33, p. 149-178, 2006.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood Handbook: wood as an engineering material**. Madison, WI: US. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. 466 p. (U.S. Department of Agriculture, Agric. Handb. N^o. 72).

HELLMEISTER, J. C. Pontes de Eucalipto citriodora. In: PRIMEIRO ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, julho 1983. Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos-SP.

HILLIS, W. E.; BROWN, A. G. **Eucalypts for wood production**. Adelaide: CSIRO, 1978. 434 p.

KLOCK, U. **Qualidade da madeira juvenil de *Pinus maximinoi* H. E. Moore**. 2000. 275 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

LEE, P. D. H.; RITTER, M. E., TRICHE, M. **Standard plans for Southern pine bridges**. Madison: Forest Products Laboratory, 1995. 26 p. (General Technical Report FPL-GTR-84)

MATOS, J. L. M. **Estudos sobre a produção de painéis estruturais de lâminas paralelas de *Pinus taeda* L.** 1997. 117 f. (Tese Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1997.

MELLO, **Classificação mecânica de peças estruturais de madeira**. 1984. 84 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1984.

NATTER, J.; SANDOZ, J. L.; REY, M. **Construction en bois**. Matériau: Technologie et dimensionnement, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1997.

NOGUEIRA, M. C. J. A.; NOGUEIRA, J. S.; CARVALHO, A. C. Indicação e aplicação do angelim-pedra na construção civil. In: EMBRAMEM – ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 7., Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos-SP.

OKIMOTO, F. S. **Pontes protendidas de madeira: parâmetros de projeto**. 1997. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Escola de engenharia de São Carlos, São Carlos, 1997.

OKIMOTO, F. S. **Análise da perda de protensão em pontes protendidas de madeira**. 2001. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

OKIMOTO, F. S.; JUNIOR, C. C. Pontes protendidas de madeira. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, n. 18, p. 25-48, 2001.

OLIVEIRA, J. T. S. **Caracterização das madeira de eucalipto para a construção civil**. 1997. Tese (Doutorado) – São Paulo, 1997.

PANSHIN, A. J; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 4 ed., New York, 1980.

PETRAUSKY, A. **Comportamento de ligações adesivas e avaliação experimental de tesouras de telhados feitas de laminado colado com madeira de *Eucalyptus grandis***. 1999. 134 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Viçosa, 1999.

PRATA, D. G. **Pontes protendidas de madeira**. 1995. 312 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

PRATA, D. **Timber bridges in Brazil**: State-of-the-art in Pacific Timber Engineering Conference Gold Coast Austrália, July 11-15, 1994.

REVISTA ARTE E CONSTRUÇÃO ESPECIAL. **Madeiras**: Um mercado por descobrir, Novembro, 2004.

RITTER, M.A. e WILLIAMSON, T.G. State of the art report: glulam timber bridge design in the U.S. In: International Council for Building Research Studies and Documentation Working Commission, 27., 1994. Sydney. **Proceedings...** Sidney, Austrália, 1994. 10 p.

RITTER, M.A. **Timber bridges** – Design, construction, inspection and maintenance. Washington, DC: United States Department of Agriculture, 1992. 944p.

RITTER, M.A., WACKER, J.P. e TICE, E.D. Design, construction and evaluation of a timber bridge constructed of cottonwood lumber. In: INTERNATIONAL BRIDGE ENGINEERING CONFERENCE, IV. 1995. São Francisco. **PROCEEDINGS...** Washington, DC., 1995. V.2. P. 358-370.

RODRIGUES, R. A. D. Variabilidade de propriedades físico-mecânicas em lotes de madeira serrada de eucalipto para a construção civil. Piracicaba, 2002 76 p. Dissertação (mestrado) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2002.

SILVA, J. C.; XAVIER, B. A. **Caracterização da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill Maiden de diferentes idades, visando sua utilização na indústria moveleira.** 2000. 260 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Centro de Ciências Florestais e da Madeira, Curitiba, 2002.

SOUZA, M. H. **Madeiras tropicais brasileiras.** Brasília: Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis. Laboratório de Produtos Florestais, 1997. 152 p.

SZUCS, C. A. Ponte de madeira com vigas principais em treliça contínua. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 1., julho/1983. Escola de Engenharia de São Carlos, USP.

TAYLOR, R.; RITTER, M. Durability in stress laminated timber bridges. In: Pacific Timber Engineering Conference, 1994. Gold Coast. **Proceedings...** Gold Coast, Austrália, 1994, v. 2. 1994. p. 686-694.

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