

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a comprovação da eficiência da classificação visual obtida da revisão bibliográfica, foi realizada a classificação visual em um lote de madeira do gênero *Pinus*, recolhido em Lages, SC.

Após a classificação visual, as peças foram submetidas à classificação mecânica por uma máquina tipo MSR e por um equipamento de vibração transversal. Posteriormente, as peças foram testadas à flexão estática em relação aos eixos de menor e de maior inércia, sendo determinados os valores do MOE, em relação aos dois eixos principais de inércia, e o valor do MOR, segundo o eixo de maior inércia. Também foram realizados testes de compressão paralela às fibras em corpos-de-prova para caracterização do lote amostrado.

Todos os testes foram desenvolvidos no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM) do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (SET/EESC/USP).

3.1 Material utilizado

Foram utilizadas pranchas de madeira das espécies *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*, sendo que as mesmas encontravam-se misturadas no lote recolhido para análise.

As pranchas de madeira utilizadas apresentam dimensões nominais de 3,5cm × 12,5cm × 2,60m. As peças de madeira foram doadas pela BATTISTELLA INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE MADEIRAS LTDA e são provenientes do Planalto Catarinense, região de Lages, Santa Catarina.

3.2 Método

3.2.1 Classificação visual

A BATTISTELLA separou para o estudo um lote composto por 1200 peças de madeira com dimensões nominais de 3,5cm × 12,5cm × 2,60m. de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, proveniente de Lages, SC.

Foi feita uma pré-seleção neste lote, descartando-se as peças com empenamento excessivo, podridão ou com defeitos que pudessem invalidar os resultados dos testes. Desta pré-seleção restaram em torno de 900 peças.

Para a classificação visual das 900 peças foi aplicado o método de classificação visual do SPIB descrito com detalhes em SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994) e SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1999). O anexo A da dissertação apresenta um resumo deste método de classificação.

As 900 peças foram classificadas como caibros e pranchas (*dimension lumber*). Na classificação foram limitados os diâmetros dos maiores nós presentes no centro da face larga, na borda da face larga e na face estreita, bem como a inclinação das fibras na quatro faces e a presença de fendas, rachas, canto esmoado encanoamento e presença de resina. Também foi considerado o número de anéis de crescimento por 2,5cm (1”) medidos em uma linha radial representativa. Assim, as peças foram classificadas em Densa (D) com 6 ou mais anéis de crescimento e mais de 1/3 da seção transversal contendo madeira de inverno, ou 4 ou mais anéis de crescimento e mais de 1/2 da seção transversal contendo madeira de inverno e Não-Densa (ND) para as demais densidades (média e baixa).

Para a realização posterior do trabalho foram selecionadas 502 peças distribuídas nas classes SS-D, SS-ND, N°2-D e N°2-ND e mais 98 peças distribuídas em outras classes, totalizando 600 peças. Desde a pré-seleção até o final da classificação visual foram gastos dois dias.

As peças foram pré-bitoladas, porém não foram aplainadas, desta maneira apresentavam variação nas dimensões da seção transversal da ordem de 6mm.

Portanto, para a classificação visual considerou-se a seção transversal nominal de 3,5cm × 12,5cm.

A tabela 23 apresenta as dimensões máximas permitidas para os defeitos em cada classe, para peças com seção transversal de 3,5cm × 12,5cm.

Tabela 23 – Limitações nos defeitos em cada classe para peças de seção transversal de 3,5cm × 12,5cm. e comprimento de 2,60m.

Classe	Fibras inclinadas	Nós		Face estreita		Fendas	Racha superficial	Esmoado
		no centro da face	na borda da face larga	D (cm)	L (cm)			
Select Structural	1:12	4,8	2,7	1,7	8,8	12,5	60,0	0,9
Nº 1	1:10	6,2	3,6	2,1	10,4			
Nº 2	1:8	7,5	4,5	2,6	11,4	18,8	90,0	1,2
Nº 3	1:4	9,4	6,2	2,7	12,5	43,3	-	1,8

Durante o procedimento de classificação anotou-se nas peças o seu número e a classe correspondente.

Devido a falta de prática para medir visualmente os defeitos, construiu-se um gabarito de acrílico, no qual foram marcadas as dimensões máximas admissíveis para os nós, e a máxima inclinação permitida para as fibras em cada classe. A figura 38 ilustra a classificação visual realizada utilizando o gabarito.



Figura 38 – Classificação visual e detalhe do gabarito de acrílico.

3.2.2 Classificação mecânica na máquina MSR

Após a classificação visual, as 600 peças foram mecanicamente classificadas utilizando-se uma máquina de classificação por tensão modelo COMPUTERMATIC MK P IVa da marca PLESSEY TELECOMMUNICATIONS.

Ao serem introduzidas na máquina, as peças de madeira interrompem um feixe de luz ativando um foto sensor responsável pelo acionamento do pistão a ar comprimido que flexiona as peças em relação ao eixo de menor inércia. Um encoder mede o deslocamento provocado pela força a cada 15cm de comprimento da peça. A máquina envia os dados para um computador que determina o Módulo de Elasticidade (MOE) de cada seção de 15cm e por sua vez envia dados para a máquina pintar um código de cores em cada seção analisada. No final da peça a máquina imprime uma faixa correspondente ao $MOE_{médio}$ da peça de madeira.

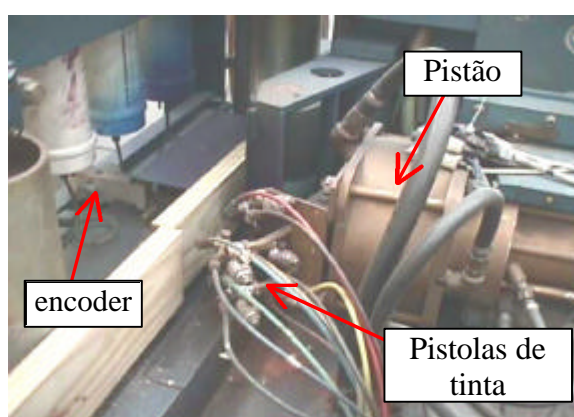


Figura 39 – Elementos da máquina de classificações.

Inicialmente, a máquina foi calibrada. Para tal finalidade, foi colocado um anel dinamométrico alinhado com o pistão pneumático para medir a força aplicada. Para a calibração, foram feitos ajustes da pressão para valores inteiros e em seguida leu-se no anel dinamométrico o valor da força correspondente à pressão lida no manômetro (figura 40).

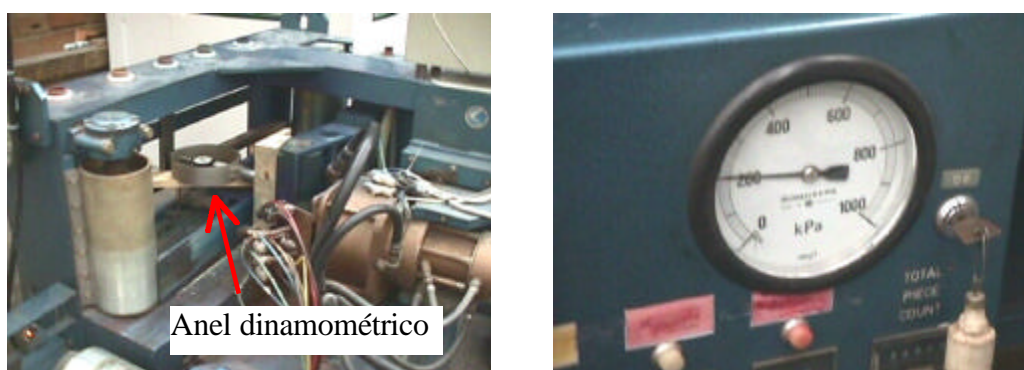


Figura 40 – Detalhes da calibração da máquina MSR.

Assim foi estabelecida uma correlação entre a força aplicada e a pressão lida no manômetro.

Após a calibração da máquina, iniciou-se a classificação das peças. A máquina é ligada a um computador que possui um programa para entrada de dados. Sua operação é bastante simples, bastando informar a seção transversal da peças, a velocidade do ensaio e a força que está sendo aplicada.

A tabela 24 apresenta o código de cores da máquina com os intervalos de MOE referentes a cada cor.

Tabela 24–Código de cores e os correspondentes intervalos de MOE.

Código de cores	Intervalo de MOE (MPa)
Azul	≤ 5.000
Verde	5.001 a 6.000
Amarelo	6.001 a 8.000
Roxo	8.001 a 10.000
Vermelho	≥ 10.001

A figura 41 ilustra o desenvolvimento da classificação com a máquina de tensões.



Figura 41 – Desenvolvimento da classificação com a máquina MSR

A classificação das 600 peças pela máquina MSR demorou um dia. Após a classificação com a máquina MSR, as peças foram transportadas para o Laboratório de Madeira e de Estruturas de Madeira (LaMEM) da Universidade de São Paulo (USP), Campus de São Carlos para a realização dos demais testes.

3.2.3 Classificação mecânica por vibração transversal

Na classificação por vibração transversal foi utilizado o equipamento Transverse Vibration E-Computer, modelo 340 da Metriguard. Antes do teste foram

medidas e anotadas as dimensões da seção transversal, bem como o comprimento das 600 peças selecionadas. As peças foram testadas com um vão livre de 2,40 m.

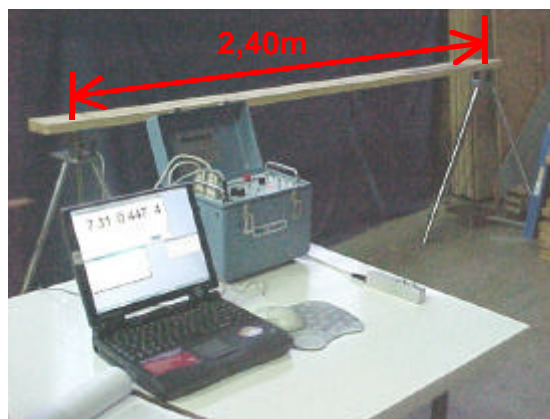


Figura 42 – Equipamento de vibração transversal utilizado nos testes.

Antes do início dos trabalhos de classificação o equipamento foi calibrado utilizando-se para isso uma barra de alumínio de MOE conhecido.

Um dos apoios possui uma célula de carga que estima o peso de cada peça, e a frequência de vibração. Os dados são enviados a um computador que realiza os cálculos e armazena os dados e os resultados dos testes em um arquivo texto. Neste arquivo são gravados o número de cada peça, a seção transversal, a frequência de vibração, o peso e o MOE de cada peça.

No programa de cálculo do MOE foram informadas as dimensões nominais da seção transversal igual a $3,5\text{cm} \times 12,5\text{cm}$. Com as dimensões reais de cada peça os valores do MOE determinados tanto pela vibração transversal, como pela classificação MSR foram corrigidos.

3.2.4 Teste de flexão estática em relação ao eixo de menor inércia

Para verificar a precisão dos métodos de classificação mecânica utilizados neste trabalho foram realizados testes de flexão estática em relação ao eixo de menor inércia, para as 600 peças selecionadas. Os testes foram conduzidos seguindo-se os procedimentos da norma ASTM D4761-96. As pranchas de madeira foram colocadas sobre apoios de aço distanciados de 2,40m. Considerando-se a altura nominal de 3,5cm, as peças foram flexionadas com uma relação L/h igual a 69. No centro dos apoios foi colocado um relógio comparador com resolução de 0,01mm e curso

máximo de 50mm. Foi aplicada uma força no centro das pranchas, com duas intensidades: 100 N e 200 N.



Figura 43 – Teste de flexão estática em relação ao eixo de menor inércia das pranchas e detalhe do apoio.

A intensidade da força foi definida limitando-se o deslocamento vertical máximo em $L/200$, considerando-se um MOE de 10.000 MPa. Foi anotado o valor do deslocamento vertical correspondente a cada nível de carregamento. O MOE à flexão em relação ao eixo de menor inércia foi determinado no segundo incremento de carregamento utilizando-se a seguinte expressão:

$$MOE = \frac{\Delta F \cdot L^3}{48 \cdot \Delta v \cdot I} \quad (8)$$

Sendo:

MOE = Módulo de elasticidade (MPa);

$\Delta P = (F_2 - F_1)$, Incremento de carga (N);

L = Vão da prancha (mm);

$\Delta v = (v_2 - v_1)$, Incremento de deslocamento (mm);

I = Momento de inércia da seção transversal (mm^4).

3.2.5 Teste de flexão estática em relação ao eixo de maior inércia

Para a realização dos testes de flexão estática em relação ao eixo principal de maior inércia foram utilizadas quantidades iguais de peças em cada classe. Como a classe N°2-D apresentava apenas 24 peças, foi adotada a mesma quantidade para as

outras três classes, portanto para as demais classes foram selecionadas aleatoriamente 24 peças de cada classe, totalizando um lote de 96 peças.

Este teste foi realizado para a determinação das propriedades de resistência e rigidez à flexão em relação ao eixo de maior inércia das pranchas. A norma adotada nos ensaios foi a ASTM D4761-96. Nestes testes foram medidas, a rigidez (MOE) bem como o módulo de ruptura à flexão (MOR) das pranchas.

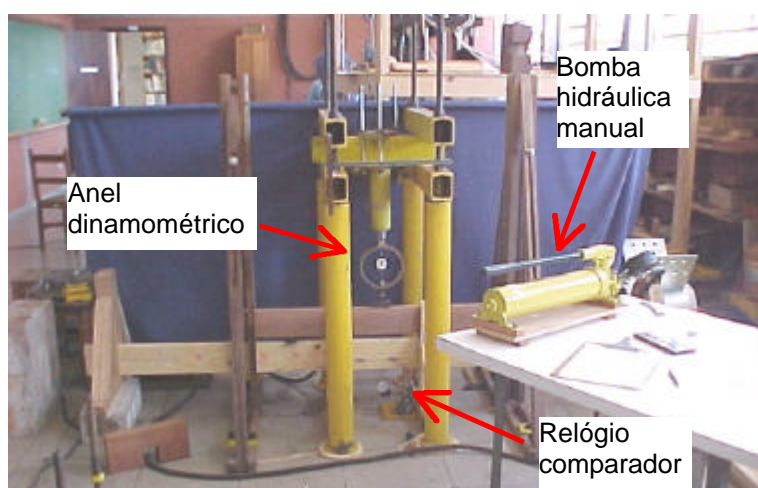


Figura 44 – Arranjo dos testes de flexão estática em relação ao eixo de maior inércia.

As pranchas foram apoiadas sobre duas rótulas espaçadas de 2,40 m e foram aplicadas duas cargas concentradas nos terços das mesmas. A relação L/h deste ensaio foi de 19, dentro dos limites da norma ASTM D4761-96 que estipula valores entre 17 e 21 como aceitáveis. Neste teste foi utilizada uma bomba hidráulica manual, um cilindro de 250 kN, um anel dinamométrico com capacidade de 50 kN e um relógio comparador de 0,01mm. A velocidade de carregamento aplicada foi em torno de 36 MPa/min levando as peças à ruptura entre 1min a 10min. As pranchas de madeira também foram devidamente contraventadas para evitar a perda de estabilidade lateral.



Figura 45 – Detalhe dos contraventamentos.

Para a determinação do MOE foram aplicadas duas intensidades de força: 1400 N e 2800 N. Os carregamentos foram definidos limitando-se o deslocamento vertical máximo em $L/200$ e considerando-se um MOE médio de 10.000 MPa. Em seguida as pranchas foram levadas à ruptura. Para cada peça rompida foi marcada a força última de ruptura e um código correspondente ao modo e a causa da ruptura, de acordo com as convenções da norma ASTM D4761-96. Os códigos para caracterizar o modo e a causa da ruptura são dados no Anexo B deste trabalho.

O MOE foi determinado pela seguinte equação:

$$MOE = \frac{23 \cdot \Delta F \cdot L^3}{1296 \cdot \Delta v \cdot I} \quad (9)$$

sendo:

MOE = Módulo de elasticidade (MPa);

$\Delta F = (F_2 - F_1)$, Incremento de força (N);

L = Vão da prancha (mm);

$\Delta v = (v_2 - v_1)$, Incremento de deslocamento (mm);

I = Momento de inércia da seção transversal (mm^4);

E o MOR foi determinado utilizando-se a seguinte equação:

$$MOR = \frac{M_{máx}}{W} \quad (10)$$

sendo:

MOR = Módulo de ruptura à flexão (MPa);

$$M_{\text{máx}} = \frac{F_{\text{máx}} \cdot L}{6}, \text{ Momento máximo (N} \cdot \text{mm)};$$

$F_{\text{máx}}$ = Força de ruptura (N);

L = Vão da prancha (mm);

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6}, \text{ Módulo resistente (mm}^3\text{)};$$

b, h = Dimensões da seção transversal (mm);

As pranchas foram testadas aleatoriamente, isto é, sem seguir uma seqüência com relação às classes de resistência. A disposição das peças, com relação aos defeitos nas bordas também foi aleatória.

3.2.6 Teste de compressão paralela às fibras em corpos-de-prova

Para a caracterização da madeira ensaiada foram realizados testes de compressão paralela às fibras em corpos-de-prova extraídos de porções não afetadas pelo ensaio de flexão estática. Entretanto não foi possível retirar corpos-de-prova de todas as pranchas devido à propagação da ruptura para as extremidades. No total foram testados 91 corpos-de-prova.

Os corpos-de-prova foram cortados em comprimentos de 15cm, mantendo-se as dimensões transversais originais das pranchas, tendo sido determinadas as suas densidades, foram testados à compressão paralela em uma máquina universal ensaios da marca AMSLER.

O ensaio foi automatizado utilizando-se dois transdutores de deslocamento com resolução de 0,001mm, modelo BCD-5c da Kyowa e uma célula de carga com capacidade para 400 kN ligados a um sistema de aquisição de dados da Lynx.

A base de medida dos deslocamentos foi 100mm.



Figura 46 – Transdutores de deslocamento e célula de carga.

O sistema de aquisição de dados foi configurado para capturar as informações de força e deslocamento a cada 1 segundo. Os corpos-de-prova foram carregados axialmente até atingirem a ruptura. A velocidade de carregamento aplicada foi em torno de 38 MPa/min. O MOE de cada corpo-de-prova foi medido determinando-se o coeficiente angular da reta de regressão entre os pontos $(\epsilon_{10\%}; \sigma_{10\%})$ e $(\epsilon_{50\%}; \sigma_{50\%})$ do gráfico $\epsilon \times \sigma$. Estes pontos são correspondentes aos valores determinados para 10% e 50% da força de ruptura, respectivamente.

3.2.7 Ajuste dos dados

A madeira utilizada nos testes foi seca em estufa. Foi medido o teor de umidade de algumas peças retiradas aleatoriamente do lote com um medido elétrico Digisystem, modelo DUP 8805 e constatou-se que a umidade das mesmas estava em torno de 11%, portanto não foi necessária à correção das propriedades mecânicas em função da umidade. Entretanto, o MOE medido na máquina MSR, bem como o MOE medido na vibração transversal foram corrigidos de modo a considerar a discrepância entre as dimensões reais da seção transversal das peças em relação à dimensão nominal adotada.

3.2.7.1 Ajuste dos valores do MOE medido pela máquina MSR

Com as dimensões reais da seção transversal de cada peça o MOE foi corrigido da seguinte forma:

$$MOE_C = MOE \cdot \frac{I_a}{I_r} \quad (11)$$

Sendo:

MOE_C = Módulo de elasticidade corrigido (MPa);

I_a = Momento de inércia adotado para uma seção transversal nominal de $3,5 \times 12,5$ cm (MPa);

I_r = Momento de inércia real de cada prancha (MPa);

3.2.7.2 Ajuste dos valores do MOE medido pelo equipamento de vibração transversal

Como o equipamento de vibração transversal fornece a massa de cada peça e a frequência natural de vibração, o MOE foi corrigido empregando-se a equação 7, porém com o momento de inércia real de cada peça.