

SETSUO IWAKIRI

Classificação de Madeiras Tropicais Através do Método Mecânico não Destrutivo

Dissertação submetida à consideração da Comissão Examinadora, como requisito parcial na obtenção de Título de "Mestre em Ciências - M.Sc.", no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná.

CURITIBA

1982

ERRATA :

1. Na página de agradecimentos deveria constar o nome do Engenheiro Florestal Luis Alberto Blanco Jorge, pela sua colaboração nos trabalhos de processamento de dados.
2. Na página 30, lê-se : Hymenaea sp ao invés de Hynèbaea sp e Parkia sp no lugar de Parkia schizolobium sp.



PARECER

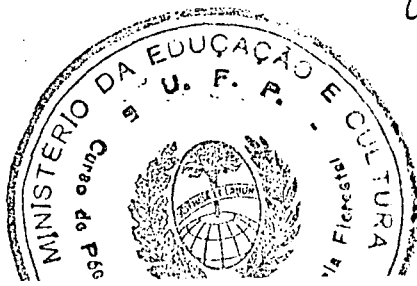
Os membros da Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado apresentada pelo candidato SETSUO IWAKIRI, sob o título "CLASSIFICAÇÃO DE MADEIRAS TROPICAIS ATRAVÉS DO MÉTODO MECÂNICO NÃO DESTRUTIVO" para obtenção do grau de Mestre em Ciências Florestais - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, área de concentração TECNOLOGIA E UTILIZAÇÃO DE PRODUTOS FLORESTAIS, após haver analisado o referido trabalho e arguido o candidato, são de parecer pela "APROVAÇÃO" da Dissertação, completando assim os requisitos necessários para receber o grau e o Diploma de Mestre em Ciências Florestais. Observação: O critério de avaliação da Dissertação e defesa da mesma a partir de novembro de 1980 é apenas APROVADA ou NÃO APROVADA.

Curitiba, 20 de agosto de 1982

Professor Ricardo Marius Della Luccia, DR.
Primeiro Examinador

Professor José Carlos Franque, M.Sc
Segundo Examinador

Professor Ivan Tomaselli, DR.
Presidente



A memória do meu avô

Aos meus pais e irmãos,
que tanto incentivaram
nesta luta.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

O autor deseja expressar seus sinceros agradecimentos:

Ao Prof. Dr. Ivan Tomaselli, pela orientação, e presença constante nas decisões que conduziram à realização deste trabalho.

Aos professores, Dr. Sidon Keinert Junior e João Carlos Moreschi, pela co-orientação.

Ao Prof. Dr. Amauri Simioni, pelo auxílio incondicional na conclusão do presente trabalho.

A coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná.

Ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo suporte financeiro para a realização do Curso.

A CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo auxílio financeiro na fase de conclusão do presente trabalho.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazonia - INPA, através do seu diretor Dr. Henrique Bergamin Filho e, ao chefe do Centro de Pesquisa de Produtos Florestais - CPPF, Dr. Manoel Sobral Filho.

A GUGELMIN S.A. Comércio e Indústria, especialmente na pessoa do Engenheiro Florestal Alceu Gugelmin Jr., pela doação

do material utilizado no presente estudo.

Ao Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, pelo tempo concedido na fase de conclusão do trabalho.

Aos professores e funcionários do Curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná.

Aos demais, colegas do dia a dia, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização do presente trabalho.

BIOGRAFIA

SETSUO IWAKIRI, filho de Tetsuo e Misa Iwakiri, nasceu no dia 05 de maio de 1957, na cidade e província de Miyazaki, Japão.

Realizou os estudos do 1º grau (primário e ginásio) respectivamente, no Educandário Nossa Senhora Aparecida e no Ginásio Estadual de Iporã, ambos no Município de Iporã-Pr, no período de 1964 a 1971.

Iniciou o 2º grau (Colegial) em 1973, no Colégio Estadual Rio Branco, concluindo em 1975, no Instituto Educacional Positivo, ambos na cidade de Curitiba - PR.

Iniciou os estudos de graduação no curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, em março de 1976, tendo recebido o grau de Engenheiro Florestal em 07 de janeiro de 1980.

Em março de 1980, ingressou no Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, tendo concluído os créditos em junho de 1981.

Em abril de 1982, foi contratado como professor visitante, junto ao Departamento de Produtos Florestais do Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

S U M Á R I O

	Página
Lista de Figuras	viii
Lista de Quadros	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DA LITERATURA	3
2.1. Peso específico	3
2.2. Elasticidade da madeira	5
2.3. Resistência da madeira	9
2.4. Classificação de madeiras para fins estrutu- rais	14
2.4.1. Classificação visual	16
2.4.1.1. Parâmetros utilizados	16
2.4.1.2. Classes de qualidade	17
2.4.2. Classificação mecânica	18
2.4.2.1. Correlações entre as variáveis	19
2.4.2.2. Classes de esforços	23
2.4.2.3. Fatores a serem considerados na classifica- ção mecânica	25
3. MATERIAL E MÉTODOS	30
3.1. Coleta e preparo do material	30
3.2. Observações dos parâmetros visuais	31
3.3. Testes em corpos de prova livres de defeitos	33

	Página
3.4.	Testes em corpos de prova de tamanho estrutural - vigas 35
3.4.1.	Teste não destrutivo (máquina de classificação estrutural)..... 35
3.4.2.	Teste destrutivo 41
3.4.3.	Teor de umidade e peso específico aparente.. 43
3.5.	Modelos para estimativa da resistência 43
3.6.	Determinação das classes de esforços 44
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES 47
4.1.	Propriedades físicas e mecânicas 47
4.1.1.	Corpos de prova livres de defeitos 47
4.1.2.	Corpos de prova de tamanho estrutural - <u>vi</u> gas 49
4.1.2.1.	Elasticidade e resistência à flexão 50
4.1.2.2.	Teor de umidade e peso específico 57
4.2.	Correlação entre as variáveis 61
4.2.1.	Corpos de prova livres de defeitos 61
4.2.2.	Corpos de prova de tamanho estrutural - <u>vi</u> gas 63
4.2.2.1.	Valores não corrigidos à 15% de umidade 63
4.2.2.2.	Valores corrigidos à 15% de umidade 66
4.3.	Modelo estimador 67
4.4.	Classes de esforços 71
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 78
6.	RESUMO 81
	SUMMARY 83
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 84
	APÊNDICE 88

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Diagrama de carga-deformação da madeira sujeita à flexão estática adaptado de WANGAARD ³⁸	7
2	Esquema de testes para obtenção do Módulo de Elasticidade na máquina de classificação estrutural (ANTON ³)	20
3	Esquema de testes para obtenção do Módulo de Ruptura em máquina universal de ensaios (ANTON ³)	20
4	Fator de modificação na resistência da madeira, segundo as diferentes alturas das vigas	26
5	Obtenção dos corpos de prova de tamanho estrutural e extremidade seccionada destinada à confecção de corpos de prova livres de defeitos.	32
6	Instrumento utilizado para medição da inclinação da grã	34
7	Detalhes do método de medição da inclinação da grã	34
8	Esquema de testes em corpos de prova livres de defeitos (COPANT 30: 1/006).....	36
9	Vista frontal da máquina de classificação estrutural	38
10	Esquema de aplicação de carga na máquina de classificação estrutural	38

Figura		Página
11	Pontos de carregamento da viga (<u>a</u> , <u>b</u> e <u>c</u>) na máquina de classificação estrutural.....	40
12	Aspectos geral dos testes na máquina universal de ensaios (teste destrutivo).....	41
13	Esquema de carregamento no teste destrutivo de vigas.....	42
14a	Diagrama carga-deformação - Parkia sp. (Pinho cuiabano).....	58
14b	Diagrama carga-deformação - Vochysia sp (Cambará).....	59
14c	Diagrama carga-deformação - Hymenaea sp. (Jatobá).....	60
15	Linha de regressão da equação $MOR = 0,0061 \times Mb(p') - 11,43816$ (Modelo estimador para as espécies agrupadas).....	70
16	Classes de esforços para peças de tamanho estrutural - Parkia sp. (Pinho cuiabano).....	73
17	Classes de esforços para peças de tamanho estrutural - Vochysia sp. (Cambará).....	74
18	Classes de esforços para peças de tamanho estrutural - Hymenaea sp. (Jatobá).....	75

LISTA DE QUADROS

Quadro		Página
1	Relação entre o peso específico aparente e as propriedades de resistência à flexão estática para algumas espécies de madeiras nacionais (IPT ¹⁸)...	13
2	Propriedades físicas e mecânicas - corpos de prova livre de defeitos.....	48
3	Propriedades físicas e mecânicas - corpos de prova de tamanho estrutural - Vigas. Espécie : <u>Par</u> <u>kia</u> sp. (Pinho cuiabano).....	51
4	Propriedades físicas e mecânicas - corpos de prova de tamanho estrutural - vigas. Espécies : <u>Vo</u> <u>chysia</u> sp. (Cambará).....	52
5	Propriedades físicas e mecânicas - corpos de prova de tamanho estrutural - vigas. Espécie : <u>Hy</u> <u>menaea</u> sp. (Jatobá).....	53
6	Influência da inclinação da grã sobre a resistência da madeira.....	54
7	Equações testadas e coeficientes de correlação obtidos para corpos de prova livres de defeitos..	62
8	Equações testadas e coeficientes de correlação obtidos para corpos de prova de tamanho estrutural Valores não corrigidos a 15% de umidade.....	
9	Equações testadas e coeficientes de correlação obtidos para corpos de prova de tamanho estrutural. Valores corrigidos à 15% de umidade.....	68

Quadro		Página
10	Classes de esforços: vigas de Parkia sp. (Pinho Cuiabano), Vochysia sp. (Cambará) e Hymenae sp. (Jatobá), com dimensões nominais de 60 x 120 mm.	72
11	Porcentagem das vigas nas classes de esforços...	77
12	Análise de variância e teste de significância (SNK) Espécie : Parkia sp. (Pinho cuiabano).....	89
13	Análise de variância e teste de significância (SNK) Espécie : Vochysia sp. (Cambará).....	90
14	Análise de variância e teste de significância (SNK) Espécie : Hymenaea sp. (Jatobá).....	91

1. INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda da madeira como matéria prima para os mais variados setores de atividades do homem, torna-se necessária a racionalização e otimização cada vez maior no uso da mesma como produto acabado ou industrializado.

Com relação às madeiras serradas para fins estruturais, as mesmas, podem ser classificadas abaixo ou acima de sua capacidade real de carga, devido às falhas ou ausência completa de classificação. No primeiro caso, a indústria estaria comercializando os produtos abaixo do seu valor real. No segundo, o consumidor seria o prejudicado, pois, a utilização desses produtos comprometeria a resistência da estrutura.

A classificação de madeiras para fins estruturais utilizada no Brasil é feita pelo método visual, pelo qual, as peças de madeira são classificadas de acordo com as dimensões e localização dos defeitos visíveis. Desta forma, a madeira serrada é classificada em várias classes de resistência. No entanto, na maioria dos casos, a classificação visual não é suficientemente eficiente. Muitas das falhas da classificação visual podem ser atribuídas a diferença na caracterização dos defeitos, de um classificador para outro.

A classificação de madeiras para fins estruturais através do método mecânico não destrutivo "Stress Grading", utiliza-se do princípio da correlação entre a elasticidade e a resistência da madeira. Esse método traz inúmeras vantagens

com relação ao método visual, principalmente quanto à maior precisão na estimativa da resistência. A outra vantagem seria a rapidez na operação de classificação. Quanto à alguns aspectos desvantajosos, poderiam ser citados, equipamento para classificação, a sua manutenção e a necessidade de mão-de-obra especializada.

No entanto, em muitos países, não se tem ainda serriarias utilizando esse método de classificação, fato este que pode ser atribuído à carência de estudos no sentido de elaborar tabelas de classificação para diversas espécies utilizadas como vigas estruturais.

O presente trabalho, tem os seguintes objetivos :

- . Determinação das propriedades físicas e mecânicas para três espécies de folhosas tropicais.
- . Verificar o nível de relacionamento entre o Módulo de Ruptura e os Módulos de Elasticidade e/ou Peso Específico, visando a obtenção do modelo estimador de resistência.
- . Estabelecimento de classes de esforços a serem utilizadas para classificação de madeira serrada das espécies mencionadas, para utilização na máquina de classificação estrutural marca TRU TIMBER GRADER, modelo MK-3.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. PESO ESPECÍFICO

A densidade de um material é definida como sendo a relação massa por unidade de volume; portanto, para um corpo de prova qualquer de madeira, o seu peso específico é obtido, dividindo o seu peso pelo volume correspondente (DESCH¹⁰). A diferença em arranjo e dimensões das cavidades celulares e a espessura das paredes celulares determinam valores específicos de peso específico para cada espécie de madeira. Salienta-se que, a resistência da madeira é estreitamente relacionada com seu peso específico (PARKER²⁸).

O peso específico real da madeira é similar para madeiras de todas as espécies, ou seja, em torno de 1,5 g/cm³ (DESCH¹⁰; GURFINKEL¹³), e pode ser definida através da equação:

$$PE_r = P_r / V_r \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (01)$$

onde:

P_r = peso em grama do material lenhoso de uma amostra;

V_r = volume em cm³ da amostra sem considerar os espaços vazios (material lenhoso)

Da mesma forma, o peso específico aparente é definido através da fórmula:

$$PE_a = P / V \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (02)$$

onde:

P = peso em grama da amostra;

V = volume em cm³ da amostra considerando os espaços vazios.

O peso específico aparente básico:

$$PE_{ab} = P_o / V_u \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (03)$$

onde:

P_o = peso da amostra seca na estufa à 103 ± 2°C (g);

V_u = volume da amostra em estado saturado (cm³).

De acordo com vários autores, o peso específico aparente da madeira varia com a espécie, entre árvores da mesma espécie e em partes diferentes da mesma árvore e podem ser assim explicadas:

- Espessura da parede celular: a variação do peso específico aparente é devido principalmente à proporção da parede celular com relação a cavidade celular e portanto dos diferentes tipos de tecidos que formam a estrutura da madeira. Desta forma, quanto maior a relação matéria lenhosa/cavidade celular de uma madeira, maior será o peso específico. Por outro lado, uma madeira com maior proporção de fibras ou traqueóides, terá maior peso específico. Isso porque, as paredes das células que constituem as mesmas, são mais espessas que as dos parênquimas (BROWN et al.⁶ e DESCH¹⁰).

- Posição no tronco: KOLLMANN & COTÉ JR.²¹, mencionam que, como uma regra geral, no sentido longitudinal, o peso específico da madeira diminui da base para a copa. No sentido transversal, para as madeiras de coníferas o peso específico aumenta da medula para as camadas mais externas, ocorrendo o inverso para as madeiras de folhosas.

- Largura dos anéis de crescimento: a largura do anel de crescimento ou número de anéis por polegada, expressa a taxa de crescimento de uma árvore. Considerava-se que para conífera, as madeiras consideradas pesadas eram caracterizadas por anéis de crescimento estreitos, ocorrendo o inverso para as madeiras de folhosas. No entanto, as investigações mais recentes indicam que a percentagem do lenho outonal no anel de crescimento tem maior efeito sobre o peso específico do que a largura do anel de crescimento (GURFINKEL¹³).

Lenho primaveril e outonal: de acordo com BROWN et al.⁶, o efeito do lenho outonal no peso específico, é devido ao fato de que o lenho outonal contém maior quantidade de material lenhoso por unidade de volume do que o lenho primaveril. Este fato é muito evidenciado para madeiras de coníferas, nas quais, a transição do lenho primaveril para o lenho outonal é abrupta e nas madeiras de folhosas com porosidade em anel. Nesta última, a alta densidade do lenho outonal se deve ao menor diâmetro e quantidade dos vasos e há uma maior proporção das fibras.

2.2. ELASTICIDADE DA MADEIRA

Um corpo sólido sujeito a uma determinada carga, sofre uma certa deformação. Quando essa carga é removida, esse corpo tem a tendência de retornar à forma e posição original. Essa tendência é denominada de elasticidade. Isto ocorre somente quando o esforço não excede o limite elástico (PARKER²⁸).

A propriedade elástica é característica dos corpos sólidos.

lidos abaixo de um certo limite de esforços. Acima deste limite ocorrerão deformações plásticas, até a ruptura. Um corpo sólido é chamado elástico quando a deformação produzida devido à aplicação de uma carga abaixo do limite proporcional, é completamente retomada após o relaxamento desta carga. Além do limite proporcional, as deformações plásticas sofridas pelo material são irreversíveis (KOLLMANN & CÔTÉ JR.²¹).

Na prática, o limite proporcional de um material é determinado no diagrama carga-deformação. O ponto sobre o diagrama onde a linha começa perceptivelmente a curvar-se é o limite proporcional (WANGAARD³⁸) (Figura 1).

A relação entre as cargas aplicadas e as deformações correspondentes até o limite proporcional, é expressa pela lei de Hooke, através da seguinte equação:

$$E = \alpha \cdot \sigma^n \quad (04)$$

onde:

E = deformação relativa $\frac{\Delta l}{l}$ = alongação/comprimento original;

σ = tensão em N/mm^2 ;

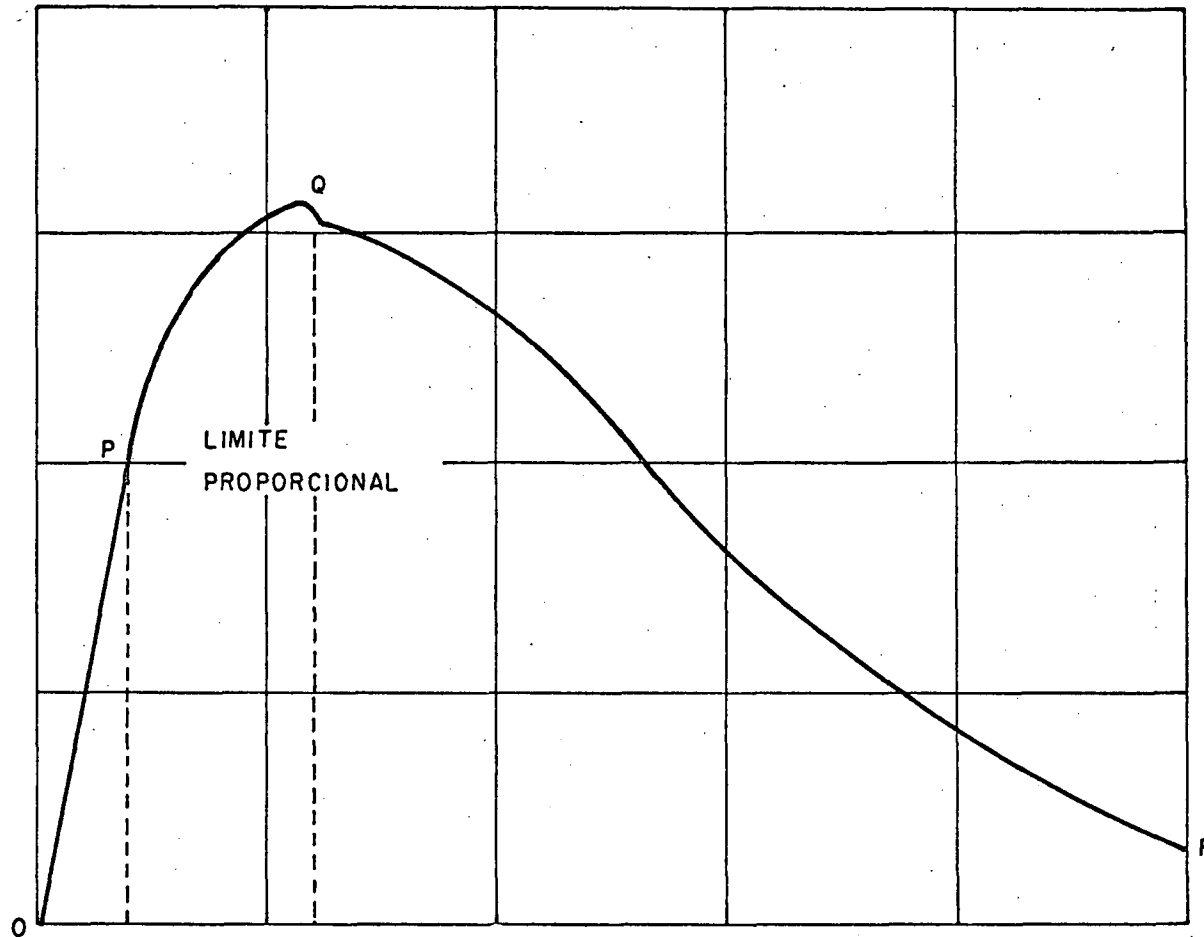
α = coeficiente de deformação;

n = constante específico para cada material, no caso da madeira é considerado o valor igual a 1.

HOWARD* afirma que a teoria elástica em membros sujeitos à flexão, a secção transversal, normal ao eixo central longitudinal da viga, permanecerá plana após a aplicação da carga, ou seja, as tensões de tração e compressão, localizadas em extremos opostos desta secção, possuem valores idênti

* HOWARD, J.H. Timber engineers' handbook. New York, John Wiley & Son, 1948. 382 p.

CARGA



Deformação

Figura 1. Diagrama de carga-deformação da madeira sujeita à flexão estática adaptado de WANGAARD³⁸.

P = limite proporcional

Q = carga máxima

R = ponto de ruptura

cos para qualquer momento fletor dado; e ainda, para qualquer momento fletor dado, as fibras localizadas a um certo nível da secção permanecem sem sofrer esforços, e por definição, este ponto é denominado de linha neutra da secção (SIMIONI³²).

Nas literaturas técnicas, normalmente é usado o valor recíproco $1/\alpha \neq E$, onde E é chamado de módulo de elasticidade ou módulo de Young, e expressa o esforço hipotético, pelo qual, um corpo de 1 cm^2 de área transversal pode ser estendido ao dobro do seu comprimento original. Na realidade, o valor real do E é impossível de ser atingido, pois ocorre antes disso a ruptura do material. Em teste de flexão estática, a determinação do módulo de elasticidade pode ser feita com a parte reta da linha descrita pelas avaliações carga-deformação, onde o primeiro ponto de inflexão da curva a carga e deformação no limite de proporcionalidade ou limite elástico (KOLLMANN & CÔTÉ JR.²¹).

Segundo WANGAARD³⁸, a rigidez da madeira é uma medida de sua aptidão de resistir à deformação imposta pela carga. Desta forma, em termos práticos, um material que é difícil de curvar ou deformar, pode ser chamado de rígido. Por outro lado, um material que é fácil a se curvar sem quebrar, é dito flexível. A rigidez é expressa numericamente através do módulo de elasticidade, e em testes de flexão estática, com dois apoios e um ponto de aplicação da carga, este valor pode ser obtido através da fórmula:

$$\text{MOE} = (P' \cdot L^3) / (4 \cdot d \cdot b \cdot h^3) \quad (05)$$

onde:

MOE = Módulo de Elasticidade (N/mm²);

P' = carga no limite proporcional (N);

L = comprimento do vão (mm) ;

d = deformação correspondente à carga no limite proporcional (mm) ;

b = largura do corpo de prova (mm) ;

h = altura do corpo de prova (mm).

Pará o cálculo do Módulo de Elasticidade para dois pontos de aplicação de carga, dispostos simetricamente a equação passaria a ser :

$$MOE = \frac{P'.a}{4.d.b.h^3} \cdot (3L^2 - 4a^2) \quad (06)$$

onde :

a = distância entre o ponto de aplicação da carga ao apoio mais próximo (mm).

Vários fatores influem sobre a elasticidade da madeira. Esses fatores possuem influência mais ou menos similares na resistência da madeira, diferindo apenas na proporção desses efeitos. Esses fatores serão mencionados no item referente à resistência da madeira, apresentados na seqüência.

2.3. RESISTÊNCIA DA MADEIRA

A resistência máxima de um material é definida como o esforço máximo que ocorre antes ou no momento da ruptura. Alguns materiais possuem reservas consideráveis de resistência entre o limite elástico e a resistência máxima, no entanto essa faixa de resistência chamada "inelástica" não é considerada na aplicação da teoria de resistência para vigas estruturais de madeira, por ser essa faixa muito variável com relação a outros materiais de construção como estruturas de aço. Testes em corpos de prova da mesma espécie e

dimensões, e nas mesmas condições, podem resultar numa considerável variação em valores de resistência. Esta variabilidade nos resultados dos testes é levada em consideração quando o esforço admissível para diferentes espécies e classes de madeiras para fins estruturais são estabelecidas (PARKER²⁸).

A resistência de uma viga de madeira à ruptura é expressa em termos de esforços por unidade de área, através do Módulo de Ruptura, o qual expressa o esforço máximo na fibra verificando nos extremos superior e inferior da secção transversal da viga. Os valores dos Módulos de Ruptura são utilizados para a obtenção de tensões admissíveis para diversas formas de utilização da madeira (WANGAARD³⁸).

De acordo com DESCH¹⁰ e WANGAARD³⁸, a resistência da madeira expressa numericamente através do Módulo de Ruptura, pode ser obtido em testes de flexão estática, com viga apoiada livremente em ambas as extremidades com aplicação da carga no centro do vão, através da fórmula:

$$MOR = (1,5 \cdot P \cdot L) / (b \cdot h^2) \quad (07)$$

onde:

MOR = Módulo de Ruptura (N/mm²);

P = carga máxima (N);

L = distância entre os apoios (mm);

b = largura da viga (mm);

h = altura da viga (mm).

No caso de dois pontos de aplicação de carga sobre a viga, a fórmula passa a ser:

$$MOR = (3 \cdot P \cdot a) / (b \cdot h^2) \quad (08)$$

onde:

a = distância entre o ponto de aplicação da carga ao apoio mais próximo (mm).

De acordo com várias fontes (CURRY & COVINGTON⁸, GURFINKEL¹³; LAVERS²³; KOLLMANN & COTÉ JR.²¹ e SUNLEY³⁴), as características mais importantes que influem sobre a resistência da madeira são :

- Ângulo de inclinação da grã: a inclinação da grã é a medida do desvio das fibras com relação ao eixo longitudinal da peça. Se um membro contendo fibras à um determinado ângulo do eixo longitudinal, é sujeito aos esforços de tração ou compressão, o efeito dos componentes da força acompanha a direção da grã e a madeira se torna mais fraca nesta direção do que ao longo do eixo longitudinal da peça. A inclinação da grã excessivamente alta é também indesejável, porque a madeira se torna mais frágil e tem uma maior tendência para distorção, com mudança no conteúdo de umidade da madeira. Normalmente considera-se que o efeito da inclinação da grã sobre as propriedades de resistência, é maior em membros estruturais do que em pequenos corpos de prova. A variação nas propriedades de resistência devido ao afastamento das fibras com relação ao eixo longitudinal da peça, pode ser calculada através da fórmula de Hankinson, mencionada no MECHANICAL PROPERTIES OF WOOD²⁷.

$$N = \frac{P \cdot Q}{P \cdot \text{sen}^n \theta + Q \cdot \text{cos}^n \theta} \quad (09)$$

onde :

N = propriedades de resistência à um desvio de ângulo θ do plano longitudinal da peça ;

Q = resistência perpendicular à grã;

P = resistência paralela à grã ;

n = constante determinada empiricamente para cada propriedade.

- Nó : nó é definido como uma porção de um galho, o qual foi incorporado no tronco da árvore. A influência de um nó sobre a resistência da madeira é devido a interrupção da continuidade e mudança na direção das fibras da madeira em torno do mesmo. A sua influência sobre a resistência depende da dimensão, solidez e localização relativa na peça. Em membros estruturais sujeitos à flexão estática, os esforços são maiores na porção média do comprimento e nas partes extremas da altura. Por esta razão, o efeito do nó sobre a resistência é maior quando localizados nas partes mencionadas.

- Peso específico: como já mencionado, o peso específico da madeira dá uma medida real da quantidade do material lenhoso presente num determinado volume. As propriedades de resistência da madeira dependem da quantidade do material lenhoso presente. A relação entre o peso específico e as diversas propriedades de resistência em madeira verde e seca, demonstram que tais propriedades aumentam, com o aumento no peso específico, sendo que, essa relação é mais acentuada para madeiras secas do que para as verdes. O peso específico é um excelente indicativo das propriedades mecânicas somente para madeiras de grã direita e livre de defeitos, ou seja, sem a influência de outros fatores, que influem negativamente sobre o tal relacionamento.

O Quadro 1, baseado em dados fornecidos por IPT¹⁸ exemplifica a correlação entre o peso específico e as propriedades de resistência a flexão estática.

- Teor de umidade: a madeira verde contém uma quantidade considerável de água, a qual é mantida parcialmente nas

QUADRO 1. Relação entre o peso específico aparente e as propriedades de resistência à flexão estática para algumas espécies de madeiras nacionais (IPT¹⁸)

Espécie	PE _a (15% u)	MOE (verde)	MOR (15% u)
<i>Hymenaea stilbocarpa</i> *	0,91-1,02	14.230-16.580	152,0-180,3
<i>Cordia hipoleuca</i>	0,73	11.710	114,7
<i>Beilschmiedia</i> sp	0,75	12.120	108,4
<i>Cecropia</i> sp	0,41	8.510	61,7
<i>Tabebuia cassinioides</i>	0,39	5.630	55,5

* Regiões de ocorrência = São Paulo, Paraná e Goiás

u = teor de umidade

PE_a = Peso específico aparente (g/cm³)

MOE = Módulo de Elasticidade (N/mm²)

MOR = Módulo de Ruptura (N/mm²)

paredes celulares e como água livre nas cavidades celulares. Quando a madeira é submetida a secagem, a maioria da água livre é evaporada antes das paredes celulares perderem umidade. A condição existente quando toda água livre é removida e as paredes celulares estão saturadas, é conhecida como ponto de saturação das fibras. Se a secagem continua, as paredes celulares perdem sua umidade e ocorre então a contração da madeira devido à aproximação das microfibrilas, resultando no aumento das propriedades de resistência. Acima do ponto de saturação das fibras, mudanças no conteúdo de umidade não tem efeitos aparentes sobre a resistência da madeira.

- Defeitos: como empenamento, torção e encanoamento, normalmente não afetam a resistência da madeira, e em termos de classificação, algumas limitações sobre esses tipos de defeitos são geralmente por outras razões.

- Fungos manchadores: normalmente não afetam a resistência da madeira, e as limitações quanto a esse defeito são determinadas pelo seu efeito sobre a aparência da madeira.

- Madeiras com podridões: tem uma baixa resistência mecânica e não devem estar presentes em vigas para fins estruturais.

- Fendas ou rachaduras: é a separação das fibras num plano longitudinal da madeira. Seu efeito sobre as tensões de cisalhamento que se desenvolvem durante os testes de flexão estática, é diretamente proporcional à sua taxa de projeção em altura da viga.

2.4. CLASSIFICAÇÃO DE MADEIRAS PARA FINS ESTRUTURAIIS

De acordo com LEICESTER²⁴, a classificação da madeira

ra em termos de sua capacidade de carga pode ser definida como o ato de ordenar a madeira dentro de grupos, sendo que cada grupo tem uma determinada propriedade para fins estruturais especificadas.

Um requisito na comercialização ordenada de madeira é o estabelecimento de classes de qualidade para permitir a procura de madeiras adequadas para os fins desejados. As classes estruturais são estabelecidas com relação a propriedades de resistência e segundo BENDSTEN & YOUNGS⁵, normalmente são considerados os efeitos dos seguintes fatores sobre a resistência:

- 1) variabilidade da madeira livre de defeitos;
- 2) peso específico;
- 3) teor de umidade;
- 4) características tais como nós, inclinação da grã, etc;
- 5) duração da carga;
- 6) Temperatura.

Segundo MADSEN²⁶, o sistema de classificação Norte Americano é baseado em dois conceitos básicos:

- A resistência do produto final (viga) de uma determinada espécie é proporcional à resistência da madeira dessa espécie livre de defeitos.

- A redução em resistência causada por algumas características naturais de crescimento, tal como nó, pode ser expressa como uma simples taxa de resistência que reflete para uma determinada dimensão do defeito, o seu efeito redutor sobre as vigas de qualquer espécie.

2.4.1. CLASSIFICAÇÃO VISUAL

A classificação visual da madeira é o método mais antigo e mais amplamente utilizado. Na classificação visual de termina-se a quantidade e a dimensão dos defeitos visíveis, individualmente ou combinados. A quantificação dos defeitos são especificados numa seqüência de passos, de acordo com os diversos métodos e normas existentes (LEICESTER²⁴).

De acordo com GURFINKEL¹³, a classificação visual é realizada através de um exame minucioso de todas as quatro faces e as extremidades das peças, onde, a localização, tamanho e natureza dos nós e outros defeitos que aparecem sobre a superfície das peças são avaliados no comprimento total da peça a ser classificada.

2.4.1.1. PARÂMETROS UTILIZADOS

O nó é um dos mais importantes defeitos redutores da resistência que ocorre na madeira. As normas enquadram nós dentro de três classes, de acordo com a sua localização na peça, quais sejam:

- a) nó sobre a face menor;
- b) nó nas partes extremas da face maior;
- c) nó na parte central da face maior.

O efeito redutor desse "parâmetro" sobre a resistência da viga, é medido com base na sua dimensão e localização na viga.

Outro "parâmetro" importante na classificação visual é a inclinação da grã. O seu efeito sobre a resistência da ma

deira é definido de acordo com o ângulo de inclinação com relação ao eixo longitudinal da viga e é expressa em termos de porcentagem de resistência, com base na viga em que esse defeito não está presente.

Outros defeitos tais como rachaduras, empenamentos, bolsas de resina, são defeitos de menor importância como redutores da resistência e não são considerados pelas normas Norte americanas (ASTM²).

SENFY & DELLA LUCIA³¹, mencionam que nas madeiras de coníferas, norte americanas, os defeitos mais importantes, na maioria dos casos, consistem de nós e desvios na direção normal da grã. Ainda segundo os autores, nas madeiras de folhosas tropicais, muitas vezes, não existem nós e a inclinação da grã é altamente variável dentro da mesma peça.

2.4.1.2. CLASSES DE QUALIDADE

O princípio básico utilizado na classificação estrutural da madeira através do método visual, é a avaliação do nível de influência dos defeitos redutores da resistência, e o mesmo é expresso como porcentagens de resistência de uma peça sem defeitos. Portanto, uma determinada peça com uma taxa de 75, significa que a mesma teria 75% da resistência, que teria se fosse livre de defeitos. Em outras palavras, os defeitos presentes na peça, reduzem em 25% a sua resistência (ASTM²).

O valor do esforço correspondente à uma determinada porcentagem ou taxa de resistência é obtido a partir do esforço básico, o qual, de acordo com CURRY & COVINGTON⁸, é a

capacidade de resistência de um membro estrutural, quando livre de defeitos.

Segundo SUNLEY³⁴, a derivação do esforço admissível para vigas classificadas visualmente é feita em dois estágios. O primeiro, envolve a determinação da resistência através dos testes em corpos de prova livres de defeitos. O segundo estágio, a derivação das classes de esforços, taxando influência dos defeitos sobre a resistência, a qual, é feita de acordo com a formulação das regras de classificação.

2.4.2. CLASSIFICAÇÃO MECÂNICA

A pouca precisão dos métodos de classificação visual, faz com que muitas madeiras classificadas para fins estruturais, são alocadas abaixo ou acima de sua capacidade real de carregamento. Na classificação mecânica destrutiva (proof grading), o critério para aceitação de cada peça de madeira dentro de uma determinada classe, é a sua capacidade de resistir à aplicação de uma determinada carga de prova, sem quebrar. Assim, todas as peças que resistem à essa carga, tem uma resistência mínima assegurada (KLOOT & LEICESTER²⁰).

Segundo HILDEBRAND & MILLER¹⁴, o conceito sobre o teste mecânico não destrutivo tem sido introduzido como um meio mais preciso e econômico de avaliar propriedades de resistência em peças individuais, sem destruir e afetar o seu uso potencial. Segundo SENFT & DELLA LUCIA³¹, a classificação mecânica não destrutiva utiliza-se de um princípio mecânico, pelo qual, a viga é rapidamente flexionada, medindo-se o valor de sua rigidez. Com base neste valor é estimado a sua resistên-

cia à flexão, através da correlação entre o Módulo de Elasticidade e o Módulo de Ruptura.

BENDSTEN & YOUNGS⁵, mencionam três componentes básicos para classificação mecânica não destrutiva, sendo eles:

- prognose da resistência através do parâmetro medido na máquina de classificação;
- designação de esforços admissíveis com base na estimativa da resistência;
- controle de qualidade, o qual visa assegurar uma perfeita operação da máquina de classificação estrutural.

A classificação da madeira pelo esforço, depende da existência de uma relação entre a resistência máxima à flexão e o módulo de elasticidade da madeira. Com base nesta relação, será possível selecionar a madeira pela sua resistência, muito mais eficientemente do que pela inspeção visual (SUNLEY³⁴).

A metodologia comumente usada para ensaios em vigas, para obtenção do Módulo de Elasticidade e do Módulo de Ruptura a serem utilizadas como variáveis independentes e dependentes na equação de estimativa de Resistência, é demonstrado por ANTON³. O Módulo de Elasticidade é determinado através da máquina de classificação, com aplicação central de uma carga constante sobre a face maior da viga, medindo-se a deformação correspondente (Figura 2), e o Módulo de Ruptura é determinado pela máquina "Universal" para ensaios, com a aplicação de carga sobre a face menor, pelo sistema de esforços em 4 pontos (Figura 3).

2.4.2.1. CORRELAÇÕES ENTRE AS VARIÁVEIS

Durante as duas últimas décadas, pesquisadores tem

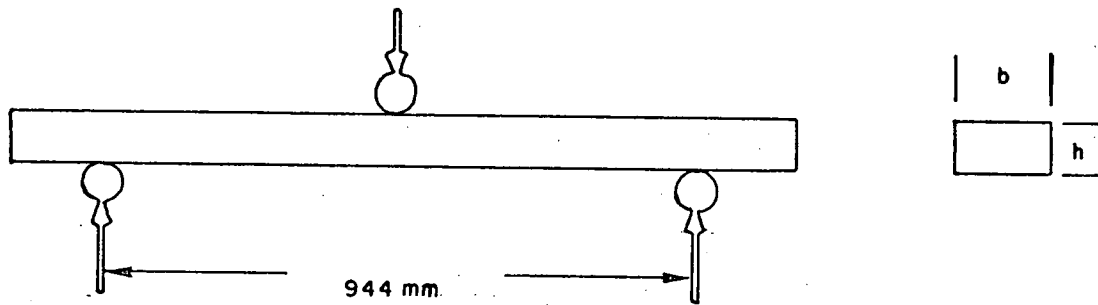


Figura 2. Esquema de testes para obtenção do Módulo de Elasticidade na máquina de classificação estrutural (ANTON³).

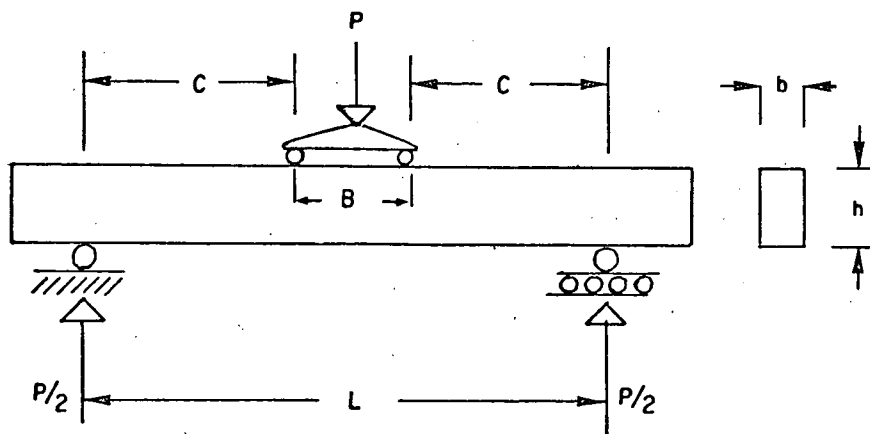


Figura 3. Esquema de testes para obtenção do Módulo de Ruptura em máquina universal de ensaios (ANTON³).

feito esforços consideráveis no sentido de desenvolver eficientes testes não destrutivos para estimar a resistência da madeira. A maioria desses estudos foram dirigidos com base na correlação entre o Módulo de Ruptura e o Módulo de Elasticidade através da técnica de regressão (EL-OSTA et al.¹²).

O relacionamento entre o MOE* e MOR** é de grande interesse, particularmente, quando os valores do MOR** podem ser prognosticados a partir dos valores do MOE* pelos testes mecânicos não destrutivos, o que possibilitaria a classificação da madeira através da sua rigidez (WALTERS et al.³⁶).

Existem ainda outras variáveis que podem ser utilizadas como parâmetros estimadores da resistência; no entanto, das muitas variáveis estudadas, o MOE* em flexão, tem sido mencionado como o melhor. O nível de relacionamento entre o MOR** e o MOE* pode ser verificado através do coeficiente de correlação, onde, o coeficiente igual a uma unidade, significa um perfeito relacionamento linear entre as duas variáveis. O quadrado do coeficiente de correlação é conhecido como coeficiente de determinação, e indica a percentagem de variabilidade de uma variável considerada com relação a outra. Por exemplo, um coeficiente de correlação de 0,707 entre MOR** e MOE*, corresponde a um coeficiente de determinação de cerca de 0,5 e indica que 50% da variabilidade do MOR é explicada pelo MOE (HOYLE¹⁵).

Muitos pesquisadores de vários países, estudaram a correlação entre o Módulo de Ruptura e o Módulo de Elasticidade e/ou peso específico para diversas espécies.

* MOE - Módulo de Elasticidade

** MOR - Módulo de Ruptura

KRAMER²², estudou o relacionamento entre o MOE e o MOR para madeiras de southern yellow pine*, com o objetivo de verificar a possibilidade de desenvolver equipamento automático para classificação mecânica, adequado para uma linha de produção, e os resultados demonstraram uma pronunciada correlação entre as variáveis. O coeficiente de correlação obtido para esse caso, foi de 0,875 para a equação:

$$\text{MOR} = 0,00619 \times \text{MOE} - 1,88 \text{ (Libra/Pol.}^2\text{)}$$

No estudo realizado por EL-OSTA et al.¹², para seis espécies de madeiras de folhosas egípcias, a correlação entre o MOR e o MOE foram boas para quatro espécies, no entanto, para duas espécies, foram encontrados os coeficientes de correlação de 0,24 e 0,40, cujos valores, os autores consideraram como baixos. JOHNSON¹⁹, também encontrou baixa correlação para duas espécies de coníferas Norte americanas. Isto indica que, nem para todas as espécies são obtidas boas correlações.

No trabalho realizado por SUNLEY & HUDSON³⁵, os dados de MOR e MOE de duas espécies foram agrupados e o nível de correlação entre as variáveis não foi afetado com relação ao mesmo obtido para espécies individualmente; isto indica que uma equação de regressão comum para as duas espécies, pode ser utilizada para prever a resistência. Similarmente, ALEXANDER & ANTON¹, afirmaram no seu trabalho, que as diversas espécies de madeiras de folhosas do sudeste da Austrália, quando no estado verde, podem ser classificadas dentro de um único grupo de resistência, para classificação mecânica. O coeficiente de correlação entre MOR e MOE de 0,72 foi considerado como aceitável pelos autores.

* *Pinus palustris* (Mill).

SENFY & DELLA LUCIA³¹, estudaram a correlação entre o MOR e o MOE e/ou peso específico (PE), para três espécies de madeiras tropicais brasileiras. Os resultados demonstraram que a correlação MOR-MOE foi melhor que a MOR-PE, para as três espécies individualmente, ocorrendo o mesmo para modelo de equação com as três espécies agrupadas. No entanto, a melhor correlação obtida pelos autores, foi para a equação de regressão múltipla, com as variáveis independentes MOE e PE. Concluíram então, que essa equação seria a mais indicada para estimativa da resistência, nesse caso particular.

Num estudo preliminar, ATHERTON⁴, fez uma comparação da eficiência das variáveis independentes MOE e carga no limite proporcional (CLP) como estimadores do MOR. Os coeficientes de correlação encontrados para MOR-MOE e MOR-CLP em madeiras de Redwood* foram de 0,68 e 0,90 respectivamente, demonstrando que a variável CLP estima melhor a resistência do que o MOE. No entanto, a utilização dessa variável na prática seria desaconselhável porque o valor do CLP é diferente entre as vigas, impossibilitando a utilização de uma carga constante.

2.4.2.2. CLASSES DE ESFORÇOS

De acordo com CURRY & COVINGTON⁸, os resultados dos testes em corpos de prova livres de defeitos, do material retirado das vigas, podem ser usados para determinar valores das classes de esforços, conforme o procedimento padrão empregado na Grã-Bretanha. Esse procedimento seria a determinação do es

* *Sequoia sempervirens*

forço básico usando sobretudo os valores médios dos testes em corpos de prova livres de defeitos, feitos à 18 e 12% de teor de umidade. Desta forma, os resultados dos testes podem ser usados para calcular diretamente os valores dos esforços apropriados para cada limite de classe.

Conforme mencionado por SUNLEY³⁴, os valores de resistência correspondentes à cada limite de classes de esforços, podem ser obtidos multiplicando o valor do esforço básico por $3/4$, $2/3$, $1/2$ e $2/5$, que correspondem às respectivas taxas de resistência de 75, 65, 50 e 40.

Nos Estados Unidos e Canadá, as classes de esforços são ordenadas em vários intervalos constantes de Módulo de Elasticidade (MOE). Com base nos valores mínimos de MOE de cada classe, são estimados os respectivos valores do Módulo de Ruptura (MOR). O limite inferior de confiança ao nível de probabilidade de 95% é obtido a partir da linha de regressão da correlação entre MOE-MOR e é chamado de modelo estimador, cuja finalidade é a de assegurar que aproximadamente 97,5% das peças se encontrem acima deste limite. A seguir, este valor do MOR ao nível de 95% é dividido por 2,1 correspondente ao fator de ajuste referente a duração de carga e de segurança, obtendo-se desta forma, o valor do esforço ou tensão admissível na fibra extrema em flexão. O fator de 2,1 é aplicado para madeiras classificadas tanto pelo método visual, como pelo mecânico não destrutivo. Embora seja diferente em detalhes, os princípios para designação do esforço admissível em flexão nos outros países, são basicamente similares ao descrito (BENDSTEN & YOUNGS⁵).

2.4.2.3. FATORES A SEREM CONSIDERADOS NA CLASSIFICAÇÃO MECÂNICA

Segundo CURRY & COVINGTON⁸, o efeito da altura de uma viga de madeira sobre a sua resistência tem sido estudado por vários pesquisadores. Esses estudos tem mostrado que o MOR ou resistência equivalente a carga máxima, obtido através da simples teoria da flexão, diminui com o aumento na altura da viga. Normalmente é atribuído para a classe de esforço especificado para viga de 12 polegadas de altura, o fator 1,0. Para vigas com altura menor que 12 polegadas, o esforço aplicado poderia ser reduzido sem afetar a margem de segurança efetiva. Com base na equação genérica resistência-altura da viga descrita pela norma Britânica, os fatores de modificação apropriado para várias alturas das vigas, pelos quais o esforço máximo e classe de esforço em flexão devem ser reduzidos para vigas menor que 12 polegadas em altura são mostrados na Figura 4.

A resistência da madeira é menos afetada pela alteração na secção transversal devido às alterações dimensionais, que pelo ganho em resistência devido à secagem (HILDEBRAND & MILLER¹⁴). Num trabalho realizado por MADSEN²⁵, com Häm-fir, surpreendentemente, não se constatou o efeito do conteúdo de umidade sobre a resistência à flexão ao nível de 5%. Esta observação poderia simplificar enormemente o procedimento dos testes, não sendo necessárias medições precisas de umidade para ajustar os valores de resistência obtidos para vigas individualmente. No entanto HOYLE¹⁵, afirma que, a madeira clas

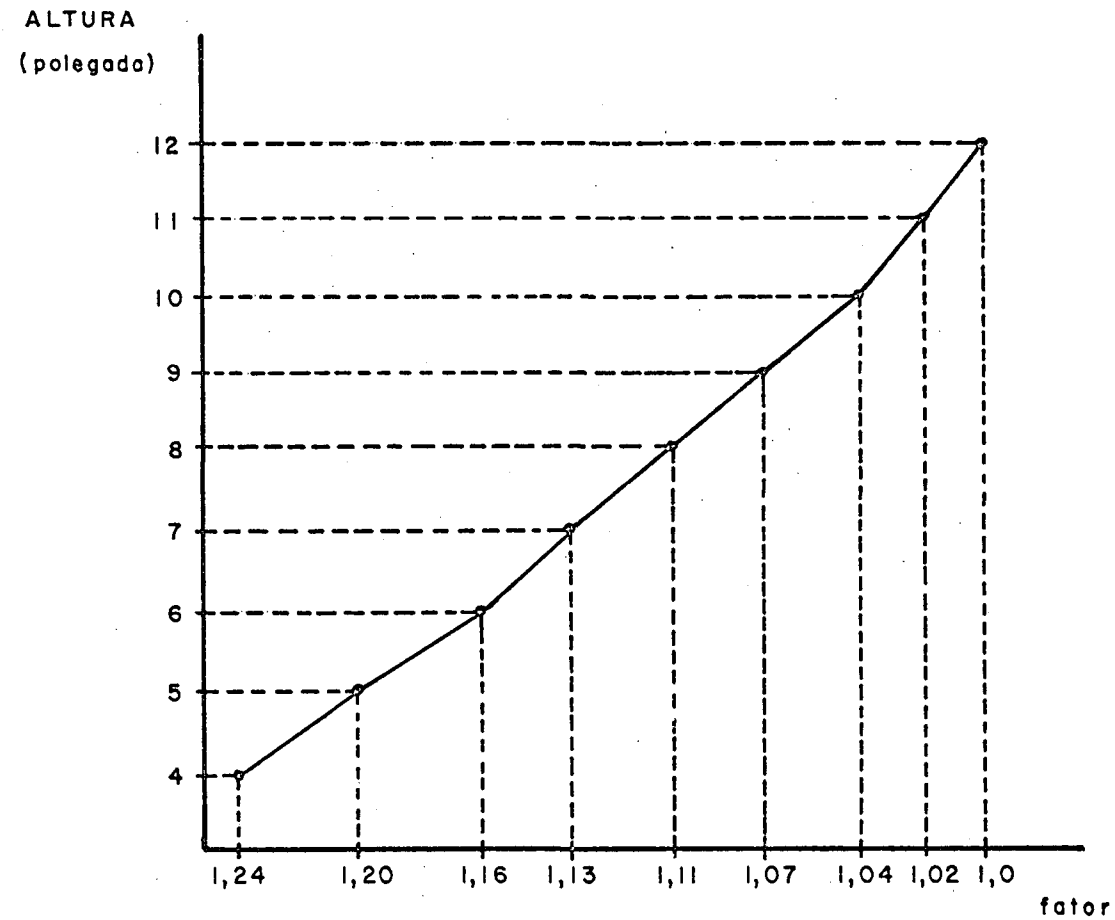


FIGURA 4. Fator de modificação na resistência da madeira, segundo as diferentes alturas das vigas.

sificada mecanicamente na condição verde, o alto conteúdo de umidade reduz a resistência, e como consequência, resultará na redução de classe com relação à classe que seria designada se a mesma estiver com o teor de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras.

De acordo com HOYLE¹⁵, os resultados obtidos em algumas experiências em laboratório tem demonstrado que o Módulo de Elasticidade de Douglas-fir*, aumentou em cerca de 0,13% com a redução em temperatura a 1^oF.

Segundo MADSEN²⁵, diferentes valores de resistência são obtidos para diferentes relaçõesvão-altura da viga. Porém, investigações recentes tem demonstrado que, além de uma relação vão-altura de 20, a redução em resistência é insignificante. Portanto, sugere-se o uso dessa relação, para os testes. SUNLEY & HUDSON³⁵, verificaram a influência da relação vão-altura da viga sobre a correlação entre a carga máxima e a rigidez para duas espécies de folhosas. Os estudos foram realizados com uma relação de 15/1 e 30/1 e os resultados encontrados para ambas as espécies mostraram que a melhor correlação entre as variáveis foi para o vão mais longo.

Tem sido demonstrado também que diferentes arranjos de carga resultam em diferentes valores de resistência. Ensaio realizados na Universidade de British Columbia mostraram que a carga central resulta em valores médios de resistência superior com relação a carga em dois pontos, no 1/3 médio do comprimento total do vão (MADSEN²⁵). Observou-se também que quanto maior a velocidade de carregamento maior será a resistência oferecida pela madeira.

* *Pseudotsuga menziessii*

Com relação à velocidade de carregamento, De BONIS et al.⁹ encontraram diferenças estatisticamente não significantes na correlação entre o MOR e o MOE comparando-se as velocidades de carregamento de 0,2 e 5,0 polegadas por minuto. Isso indica que os valores da resistência e rigidez obtidos através de uma velocidade de carregamento maior, pode não requerer ajustamento, para a determinação do modelo estimador da resistência.

A máquina de classificação mede a rigidez das vigas sobre a face maior das mesmas. SUNLEY & HUDSON³⁵, afirmam que para trabalho estrutural normal, a resistência da madeira observada sobre a face menor é mais importante. No entanto, por razões práticas, é preferível medir a sua rigidez segundo a face maior, por ser maior a deformação obtida para uma determinada carga. Estudos realizados nesse sentido, tem demonstrado que, a diferença na correlação entre o MOR obtido segundo a face menor e a rigidez medida nas faces menor e maior, não são estatisticamente significantes.

Segundo HOYLE¹⁶, as medições adicionais dos defeitos redutores da resistência como, a inclinação da grã, nós, taxas de crescimento, umidade, são excessivas e desnecessárias, uma vez que, quando a rigidez de uma viga da classe comercial de madeira é medida, todos esses defeitos estão sendo percebidos. WALTERS et al.³⁶, afirmam que os defeitos, tais como nós, localizados na zona de tração de uma viga, tem um efeito redutor na resistência maior do que os nós localizados na zona de compressão da viga.

Quanto ao aspecto econômico no que se refere à viabilidade da máquina de classificação estrutural, INCE¹⁷, rela-

ta que o custo por unidade de madeira processada é muito sensível com relação a quantidade de madeira classificada pela máquina, por causa da alta taxa de custos fixos em comparação com os custos variáveis. O autor conclui que para minimização dos custos de classificação seria necessária a operação contínua da máquina de classificação, ou seja, o aumento na produtividade reduziria o custo fixo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. COLETA E PREPARO DO MATERIAL

O material objeto do presente estudo, foi três espécies de folhosas tropicais. *Hynebaea* sp (Jatobá), *Vochysia* sp (Cambará) e *Parkia Schizolobium* sp (Pinho cuiabano), sendo respectivamente madeiras consideradas de alto, médio e baixo peso específico. Os critérios para escolha dessas espécies foram :

- distribuição e ocorrência das espécies na região;
- árvores com dimensões industrializáveis em termos de vigas estruturais;
- fustes normalmente retos;
- pesos específicos distintos.

A coleta da madeira de jatobá e pinho cuiabano, foi realizada no pátio de uma serraria no município de Tangará da Serra e a de cambará, no município de Sinop, ambos no Estado de Mato Grosso. Adotou-se o critério de que fossem incluídos no lote em estudo, no mínimo de cinco árvores diferentes por espécie.

O lote assim amostrado, foi composto de 126 vigas com dimensões nominais de 60 X 120 X 4000mm, sendo 46 vigas de jatobá, 45 de cambará e 35 de pinho cuiabano.

No Laboratório de Tecnologia da Madeira do Curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, as vi

gas foram secas numa estufa convencional até atingir teor de umidade de 15 a 20%, sendo à seguir, deixadas ao ar livre até atingir a umidade de equilíbrio com o ambiente, obtendo-se dessa forma, vigas em condições de madeiras secas ao ar.

As vigas foram seccionadas numa das extremidades, obtendo-se assim, dimensões finais para ensaios de 60 X 120 X 3600 mm (Figura 5). Das partes seccionadas das extremidades, foram retirados corpos de prova livres de defeitos com as dimensões nominais de 20 X 20 X 300mm, conforme as especificações da norma COPANT 30: 1/006. Estes corpos de prova foram acondicionados à temperatura de $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $65 \pm 2\%$, até atingir um teor de umidade em torno de 12%.

3.2. OBSERVAÇÕES DOS PARÂMETROS VISUAIS

Os parâmetros visuais considerados a priori, no presente estudo foram: (a) localizações e dimensões dos nós, e (b) inclinação da grã. A escolha desses parâmetros foi com base na sua maior influência na resistência da viga sujeita ao esforço de flexão, de acordo com a norma ASTM-D245.

No entanto, a maioria das vigas não apresentaram nós, e quando presentes, as dimensões dos mesmos, foram menores do que as dimensões mínimas consideradas pela norma por essa razão, esse parâmetro foi desconsiderado no estudo.

As observações quanto à inclinação da grã, foram feitas com duas repetições, na face maior, no meio do comprimento do vão de 3000 mm.

O instrumento utilizado para medição, foi confeccionado com base no instrumento citado pela RPA³⁰, conforme a Figura 6.

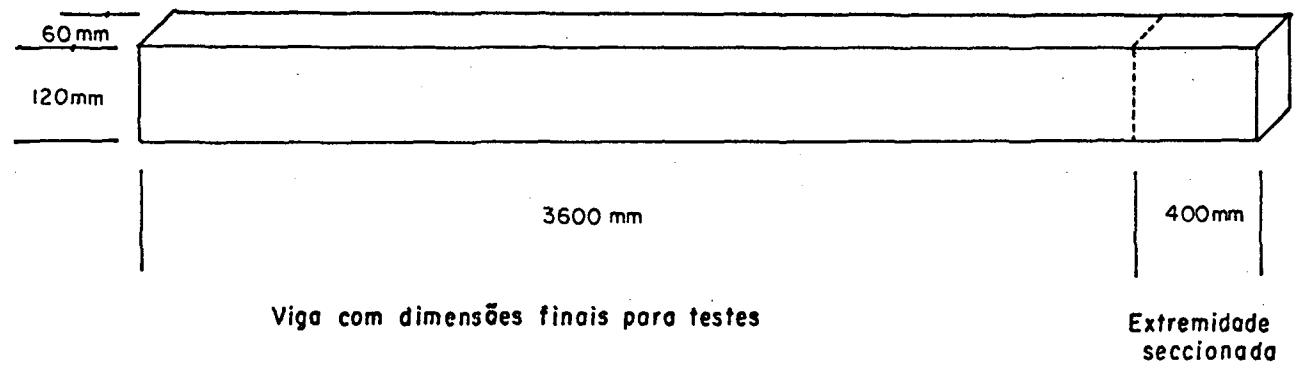


Figura 5. Obtenção dos corpos de prova de tamanho estrutural e extremidade seccionada destinada à confecção de corpos de prova livres de defeitos.

De acordo com a Figura 7, os procedimentos para medição da inclinação da grã foram :

A extremidade de contacto da agulha é cravada na madeira à uma certa profundidade, percorrendo no sentido do esforço manual, acompanhando a direção da grã.

As medições foram feitas da seguinte forma: tomou-se um ponto ao acaso na linha traçada pela agulha, denominando-se de ponto 0, a partir desse ponto, traçou-se uma reta paralela ao eixo longitudinal da peça; a seguir, com uma escala no sentido perpendicular à reta, marcou-se o afastamento de 10 mm entre as duas linhas, denominando-se de ponto P. Sendo a distância 0-P, o percurso necessário para o afastamento de 1 cm da direção da grã com relação ao eixo longitudinal da peça.

De acordo com a Figura 7, a inclinação de 1:15 significa um desvio de 10mm, em 150mm de percurso da reta (0-P).

Os resultados médios das duas observações, obtidos para cada viga, foram tabulados de acordo com a taxa de resistência correspondentes a inclinação da grã, conforme a norma (ASTM-D245 tab. 1), e verificou-se a sua inter-relação com o Módulo de Ruptura segundo a face menor. Para tal, foi considerado os valores médios dos Módulos de Ruptura das vigas pertencentes a cada intervalo de inclinação da grã o qual foi denominado classe de inclinação da grã.

3.3. TESTES EM CORPOS DE PROVA LIVRES DE DEFEITOS

Com corpos de prova de 20X20X300 mm, determinou-se peso específico aparente; teor de umidade e resistência à flexão estática.

Peso específico: a determinação do peso específico aparente ao teor de umidade na ocasião dos testes, foi feito através do método estereométrico no mesmo corpo de prova utilizado para testes em flexão estática, sendo que, as medições do peso (Pu) e volume (Vu) foram feitos antes da realização dos testes.

Fórmula utilizada:

$$PEa = Pu/vu \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (10)$$

Teor de umidade: o teor de umidade foi determinado pelo método de pesagem, através da fórmula:

$$U = ((Pu - Po)/Po) \cdot 100 \text{ (\%)} \quad (11)$$

onde:

Po = peso seco na estufa à 103 ± 2°C

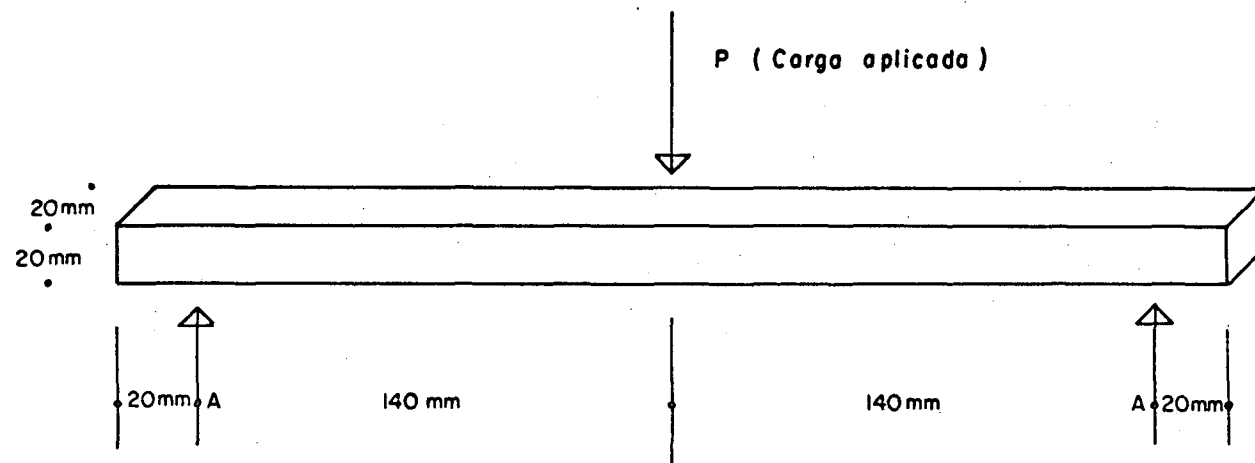
Flexão estática: os testes em flexão estática foram realizados conforme as determinações da norma COPANT 30: 1/006 (Figura 8). O número de corpos de prova por espécie foram: 37 para pinho cuiabano, 39 para cambará e 40 para jatobá.

O Módulo de Elasticidade e o Módulo de Ruptura para cada corpo de prova foram determinados através das equações 05 e 07, descritos nos itens 2.2 e 2.3 respectivamente.

3.4. TESTES EM CORPOS DE PROVA DE TAMANHO ESTRUTURAL - VIGAS

3.4.1. TESTE NÃO DESTRUTIVO (MÁQUINA DE CLASSIFICAÇÃO ESTRUTURAL)

As vigas, após as observações dos parâmetros visuais



A = apoio

Figura 8. Esquema de testes em corpos de prova livres de defeitos
(COPANT 30:1/006)

(item 3.2), foram testadas na máquina de classificação estrutural (Figura 9), para a determinação dos Módulos de Elasticidade segundo a face maior, em vários pontos e às diferentes cargas.

O princípio de funcionamento da máquina (Figura 10), consiste em colocar a viga sobre dois roletes inferiores separados entre si a uma distância de 1200 mm e presa por dois roletes superiores. Uma carga constante, é aplicada sobre a face maior da viga através de cabeçote movido pneumáticamente. O controle da carga constante definida para cada espécie, é feito através de uma válvula e manômetro. A deformação é medida através de um deflectômetro acoplado à máquina.

A carga constante, específica para cada espécie, foi determinada, baseando-se no princípio de que, a resistência da madeira à um determinado esforço, aumenta com o peso específico, e com a condição de que essa carga não ultrapasse o limite de elasticidade das vigas com defeitos. Dessa forma, os seguintes critérios foram adotados para a determinação da carga constante para cada espécie:

- tomou-se uma carga logo abaixo do menor valor da carga no limite proporcional (LPmin.) para corpos de prova livres de defeitos com dimensões de 20 X 20 mm e através de uma regra de três, obteve-se a respectiva carga (x) para vigas de 60 X 120 mm, de dimensões da seção transversal;

$$\text{LPmin.} \quad - \quad 400 \text{ mm}^2$$

$$x \quad - \quad 7200 \text{ mm}^2$$

$$x = (7200 \cdot \text{LPmin}) / 400(N)$$

- na determinação da carga constante específica, para vigas com defeitos, tomou-se uma margem de segurança, para as

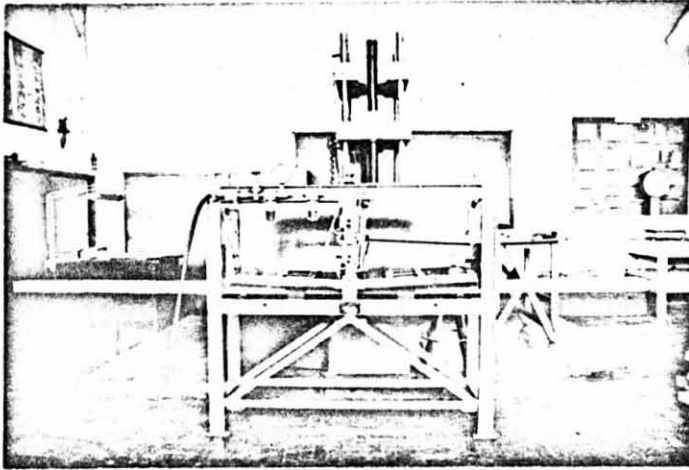


Figura 9. Vista frontal da máquina de classificação estrutural.

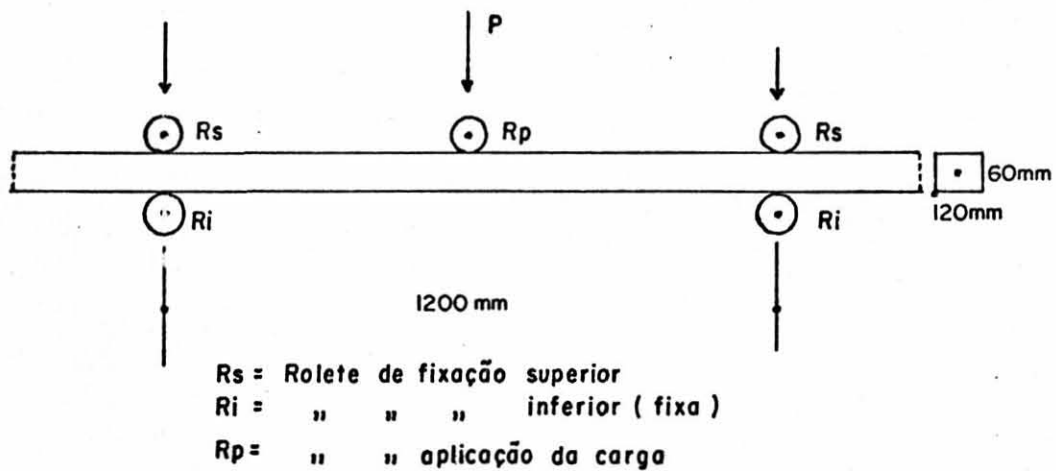


Figura 10 Esquema de aplicação de carga na máquina de classificação estrutural.

segurar que essa carga não ultrapassasse a carga no limite proporcional, devido aos efeitos redutores dos defeitos.

Da forma mencionada anteriormente, foram obtidas para cada espécie em estudo, as cargas constantes específicas P'_{pc} , P'_{ca} e P'_{ja} , correspondentes ao pinho cuiabano, cambará e jatobá respectivamente. Utilizou-se ainda, uma carga fixa de 1000 N (P'_{l}), para as três espécies, com o objetivo de verificar a sua influência nas medições das deformações e determinações do MOE, assim como, possibilitar a obtenção do diferencial em deformação correspondente ao diferencial das cargas constantes (comum-específica).

As deformações foram medidas em três pontos diferentes e denominadas de d_a , d_b e d_c conforme a Figura 11.

O Módulo de Elasticidade foi calculado através da equação 05 descrita no item 2.2, onde P' passa a ser para esse caso, carga constante abaixo do limite proporcional, e d a deformação correspondente.

Para o MOE correspondente aos diferenciais em carga-deformação, a equação utilizada passou a ser:

$$MOE = \frac{L^3}{4 \cdot b \cdot h^3} \cdot \frac{\Delta P'}{\Delta d} \quad (N/mm^2) \quad (12)$$

onde:

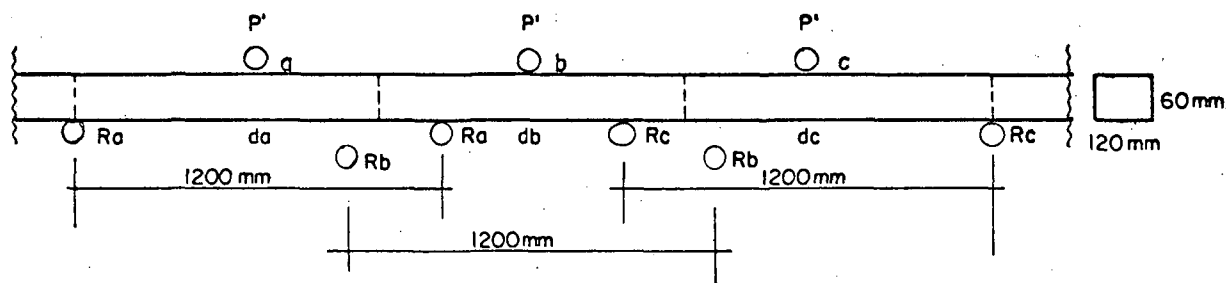
$\Delta P'$ = diferencial carga comum-específica;

Δd = deformação correspondente.

Foram calculados os seguintes Módulos de Elasticidade (MOE) para cada espécie:

$M_{bP'}$ = Módulo de Elasticidade à carga específica, no ponto

b;



P = carga constante
 R_a, R_b, R_c = apoios
 d_a, d_b, d_c = deformações correspondentes à aplicação de cargas nos pontos a, b e c.

Figura 11. Pontos de carregamento da viga (a, b e c) na máquina de classificação estrutural.

- MmP' = Módulo de Elasticidade à carga específica, correspondente à média das deformações nos pontos a, b, c;
- $MbP'1$ = Módulo de Elasticidade à carga comum de 1000 N, no ponto b;
- $MmP'1$ = Módulo de Elasticidade à carga comum de 1000 N, correspondente à deformação média nos pontos a, b, c;
- MbD = Módulo de Elasticidade correspondente ao diferencial carga específica - carga comum e respectivo diferencial das deformações no ponto b;
- MmD = Módulo de Elasticidade correspondente ao diferencial carga específica - carga comum e respectivo diferencial das deformações médias nos pontos a, b, c.

3.4.2. TESTE DESTRUTIVO

As vigas, após os testes na máquina de classificação estrutural, foram testadas em máquina universal de ensaios, com carregamento em dois pontos, no terço médio do vão, de acordo com as especificações da norma DIN 52186, utilizando-se de um aparato especial, adaptado para testar vigas (Figuras 12 e 13).

Para cada viga, obteve-se os seguintes dados: dimensões médias das bases e alturas; carga e deformação aos intervalos constantes de 1750 N para pinho cuiabano e cambarã e de 3600 N para jatobá, até o limite proporcional; tempo até a ruptura.

O Módulo de Elasticidade (MOE) segundo a face menor, foi calculado através da equação 06, descrito no item 2.2.

A obtenção do MOE segundo a face menor, foi com o

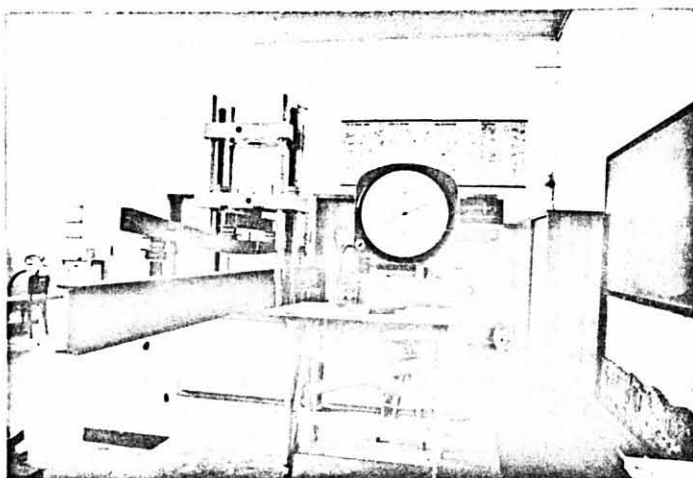


Figura 12. Aspecto geral dos testes na máquina universal de ensaios (teste destrutivo).

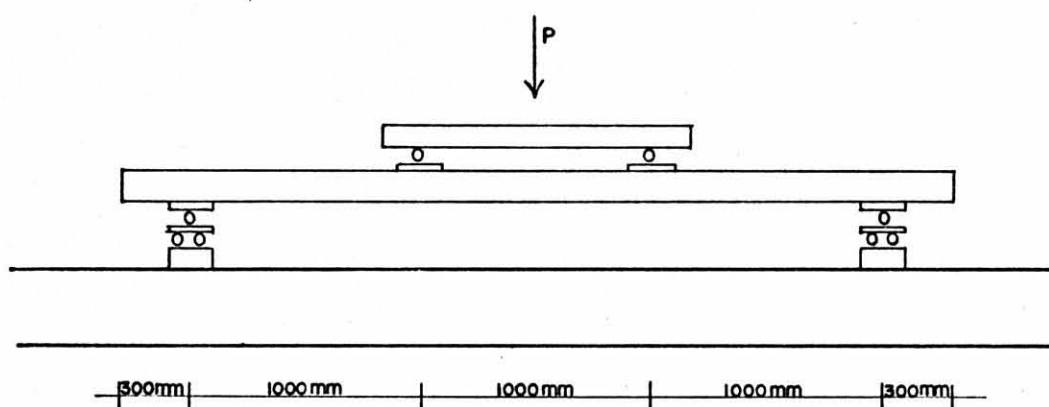


Figura 13. Esquema de carregamento no teste destrutivo de vigas.

objetivo de verificar se há diferença significativa com relação aos MOE obtidos segundo a face maior, na máquina de classificação estrutural.

O Módulo de Ruptura para cada viga, foi calculado através da equação 08, citado no item 2.3.

3.4.3. TEOR DE UMIDADE E PESO ESPECÍFICO APARENTE

O teor de umidade, peso específico aparente seco e ao teor de umidade na ocasião dos testes, para cada viga, foram determinados a partir das amostras retiradas próximo ao local de ruptura, logo após a realização dos testes. Para os cálculos, utilizou-se das equações 10 e 11 mencionadas no item 3.3.

3.5. MODELOS PARA ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA

Como princípio básico para classificação mecânica não destrutiva de vigas estruturais, a correlação entre as variáveis medidas em flexão estática é de suma importância para a determinação do modelo estimador da resistência da madeira através da técnica de regressão linear. Variáveis independentes foram testadas, utilizando as equações propostas por vários pesquisadores conforme as equações 12 e 13 (ALEXANDER & ANTON¹, KRAMER²², SENFT & DELLA LUCIA³¹).

$$y = a + bx \quad (12)$$

onde:

$$y = MOR$$

$$x = PE_u, PE_o, MOE, MbP', MmP', MbP'l, MmP'l, MbD, MmD.$$

$$y = a + bx + cz \quad (13)$$

onde:

$$y = \text{MOR}$$

$$x = \text{PE}_u, \text{PE}_o$$

$$z = \text{MOE}, \text{MbP}', \text{MmP}', \text{MbP}'1, \text{MmP}'1, \text{MbD}, \text{MmD}.$$

As equações foram empregadas para as espécies individualmente e para as espécies agrupadas. As variáveis, foram empregadas para os valores corrigidos e não corrigidos à 15% de umidade.

Para as regressões lineares simples e múltiplas, foram calculados os valores do (F) e do coeficiente de correlação (r). A escolha da equação como modelo estimador do MOR foi feita com base nos valores dos coeficientes de correlação e do teste (F) ao nível de 95% de probabilidade.

3.6. DETERMINAÇÃO DAS CLASSES DE ESFORÇOS

De acordo com BENDSTEN & YOUNGS⁵, os limites de classes de esforços podem ser definidos em intervalos constantes de Módulo de Elasticidade. A partir desses valores, são estimados os Módulos de Ruptura e a obtenção dos respectivos valores de tensões admissíveis ao nível de 95% de probabilidade.

No presente trabalho, o critério para a determinação dos limites de classes para cada espécie, foi baseado na média e desvio padrão do Módulo de Elasticidade dos corpos de prova livres de defeitos. Tratando-se de material biológico, a curva de frequência dos Módulos de Elasticidade assume a forma de uma distribuição normal, devido a variabilidade dos dados que representam uma população amostrada. As classes de

esforços foram definidas em:

Classe 1: acima do MOE médio;

Classe 2: entre MOE médio e MOE médio - s;

Classe 3: entre MOE médio - s e MOE médio - 2 s;

Classe 4: abaixo do MOE médio - 2 s

Com os valores do MOE dos limites de classes obtidos, utilizou-se da equação escolhida para prognose da resistência (modelo estimador) para estimar os respectivos valores do MOR.

O limite inferior de confiança ao nível de 95% de probabilidade foi obtido, de acordo com os procedimentos descritos por STELL & TORRIE³³, com o objetivo de assegurar que, para um determinado valor do MOE, existe probabilidade de 97,5% dos valores correspondentes ao MOR estarem acima do valor definido por esse limite.

Os valores do MOR correspondentes ao limite inferior de confiança, de cada classe, foram divididos por um fator de ajuste de 2.3 (valor numérico para as madeiras de folhosas, ASTM-D245) obtendo desta forma, a tensão admissível para cada classe.

Com base nos valores do MOE correspondentes aos limites de classes, determinaram as deformações correspondentes (equação 14), com o objetivo de facilitar a prática de classificação, uma vez que, a máquina de classificação estrutural, mede a deformação sofrida pela viga com a aplicação de uma carga constante. Isso possibilita a elaboração de tabela para classificação estrutural com base nas deformações medidas.

$$y = \frac{P'.L^3}{4.b.h^3.MOE} \quad (14)$$

onde:

- y = deformação correspondente ao limite de classe (mm);
- P' = carga constante aplicada (N);
- MOE = Módulo de Elasticidade correspondente ao limite de classe (N/mm²)
- b, h = base e altura da viga respectivamente (mm);
- L = distância entre os apoios (mm).

Posteriormente, as vigas das três espécies em estudo, foram classificadas individualmente de acordo com as respectivas classes de esforços obtidos, verificando-se desta forma, a percentagem das peças em cada classe.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS

4.1.1. CORPOS DE PROVA LIVRES DE DEFEITOS

Os valores das propriedades físicas e mecânicas dos corpos de prova livres de defeitos para as três espécies são apresentados no Quadro 2, e as seguintes avaliações podem ser feitas:

Os valores dos pesos específicos aparentes para Pinho cuiabano, Cambará e Jatobá, foram respectivamente 0,39, 0,73 e 0,95 g/cm³. Os valores estão dentro das faixas de baixo, médio e alto peso específico, conforme foram pré-estabelecidos na escolha das espécies para o estudo. Os coeficientes de variação de 13,48, 4,87 e 4,02%, demonstram maior variação do peso específico aparente entre os corpos de provas de Pinho cuiabano comparando-se com os obtidos para Cambará e Jatobá.

O teor de umidade médio de 12,01, 11,94 e 11,51% para pinho cuiabano, cambará e jatobá respectivamente, indicam que os corpos de prova estão acondicionados dentro dos limites estabelecidos pela Norma COPANT 30:1/006, para ensaios físicos e mecânicos. Os respectivos coeficientes de variação de 2,54, 3,35 e 1,95%, demonstram uma alta homogeneidade no teor de umidade entre os corpos de prova.

QUADRO 2. Propriedades físicas e mecânicas

corpos de prova livres de defeitos.

ESPÉCIE	PROPRIEDADES	\bar{x}	s	C.V.
Parkia sp. (Pinho cuiabano)	Teor de umidade (%)	12,01	0,30	2,54
	Peso específico aparente (g/cm ³)	0,39	0,052	13,48
	Carga no limite proporcional (N/mm ²)	731,96	166,89	22,80
	Módulo de elasticidade (N/mm ²)	9156,37	1488,66	16,26
	Módulo de ruptura (N/mm ²)	61,76	10,16	16,45
Vochysia sp (Cambarã)	Teor de umidade (%)	11,94	0,40	3,35
	Peso específico aparente (g/cm ³)	0,73	0,036	4,87
	Carga no limite proporcional (N/mm ²)	1247,74	241,77	19,37
	Módulo de elasticidade (N/mm ²)	14136,98	2030,82	14,37
	Módulo de ruptura (N/mm ²)	113,24	15,22	13,44
Hymenaea sp (Jatobã)	Teor de umidade (%)	11,51	0,22	1,95
	Peso específico aparente (g/cm ³)	0,95	0,038	4,02
	Carga no limite proporcional (N/mm ²)	1824,76	353,49	19,37
	Módulo de elasticidade (N/mm ²)	18002,07	2356,57	13,09
	Módulo de ruptura (N/mm ²)	156,26	26,57	17,00

\bar{x} = média

s = desvio padrão

C.V.= coeficiente de variação

Os coeficientes de variação dos Módulos de Elasticidade de (16,26, 14,37 e 13,09) e dos Módulos de Ruptura (16,45, 13,44 e 17,0%) respectivamente para pinho cuiabano, cambará e jatobá, estão dentro dos limites normais para flexão estática em corpos de prova livres de defeitos.

As relações entre os valores dos Pesos Específicos aparente e dos Módulos de Elasticidade: (0,39 g/cm³- 9156,37 N/mm²; 0,73 g/cm³- 14136,98 N/mm²; 0,95- 18002,07 N/mm²) respectivamente para pinho cuiabano, cambará e jatobá, demonstram uma compatibilidade com os valores citados por IPT¹⁸ (Quadro 1).

A comparação entre as relações Peso Específico aparente - Módulo de Ruptura: (0,39 g/cm³- 61,76 N/mm²; 0,73 g/cm³- 113,24 N/mm²; 0,95 g/cm³- 156,26 N/mm²), para pinho cuiabano, cambará e jatobá, com as tais relações citadas por IPT¹⁸ (Quadro 1), foram similares.

4.1.2. CORPOS DE PROVA DE TAMANHO ESTRUTURAL - VIGAS

As cargas específicas utilizadas para cada espécie, na máquina de classificação estrutural, obtidas conforme os procedimentos descritos no item 3.4.1, foram respectivamente de 3000, 4000 e 5000 N para pinho cuiabano, cambará e jatobá.

Conforme observado no teste de flexão estática, a menor carga no limite proporcional para as vigas testadas, foram 3500, 4250 e 7200 N respectivamente para pinho cuiabano, cambará e jatobá. Isso indica que, para nenhuma viga das três espécies, a carga aplicada pela máquina de classificação estrutu

ral ultrapassou a carga no limite proporcional.

Os resultados das propriedades físicas e mecânicas, tanto para o teste destrutivo, como para o não destrutivo, são apresentados nos Quadros 3, 4 e 5.

4.1.2.1. ELASTICIDADE E RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Os valores médios dos Módulos de Ruptura foram: 37,29 N/mm² para o Pinho cuiabano; 47,87 N/mm² para o Cambará, e 88,69 N/mm² para o Jatobá. Estes valores foram menores que os correspondentes aos corpos de prova livre de defeitos. Os respectivos coeficientes de variação de 26,36, 22,09 e 17,10%, demonstram maior variação dos Módulos de Ruptura para as vigas, do que para corpos de prova livres de defeitos. Os resultados acima, podem ser justificados pela influência dos defeitos presentes nas vigas, os quais reduzem os valores das propriedades mecânicas e aumentam a variabilidade entre resultados individuais, fato este minimizado em corpos de prova livres de defeitos.

Os valores médios dos Módulos de Ruptura das vigas correspondentes à cada classe de inclinação da grã, são apresentados no Quadro 6, e permitem as seguintes análises:

- Pinho cuiabano: o maior valor do M $\bar{O}R^*$ de 47,59 N/mm², foi para a classe de inclinação da grã de 1 x 14, e o menor valor 36,83 N/mm², de classe 1 x 16. As relações acima, demonstram que para essa espécie, não houve uma relação concomitante entre a inclinação da grã e a resistência das vigas

* Valores médios dos Módulos de Ruptura das vigas correspondentes à cada classe de inclinação da grã.

QUADRO 3. Propriedades físicas e mecânicas

Corpos de prova de tamanho estrutural - vigas

Valores não corrigidos a 15% de umidade

Espécie: Parkia sp. (Pinho cuiabano)

PROPRIEDADES		Média	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)	
Físicas	Teor de umidade	16,95	2,71	15,97	
	Peso específico aparente (0%)	0,37	0,052	14,14	
	Peso específico aparente (u%)	0,40	0,053	13,19	
Teste destrutivo					
Mecânicas (N/mm ²)	. Módulo de Ruptura (MOR)	37,29	9,83	26,36	
	. Módulo de Elasticidade (MOE)	9432,09	914,82	9,72	
	Teste não destrutivo				
	. Mb ₃	8050,67	887,01	11,02	
	. Mb ₁	7544,56	1113,86	14,75	
	. MbD	8427,98	1166,34	13,84	
. Mm ₃	7973,66	755,35	9,47		
. Mm ₁	7501,27	742,64	9,90		
. MmD	8158,22	1060,71	13,0		

Mb₃ = Módulo de Elasticidade no ponto b, à carga de 3000 N.

Mb₁ = Módulo de Elasticidade no ponto b, à carga de 1000 N.

MbD = Módulo de Elasticidade no ponto b, ao diferencial carga-deformação no intervalo (3000-1000N)

Mm₃ = Módulo de Elasticidade correspondente à média das deformações nos pontos a, b e c, à carga de 3000 N.

Mm₁ = Módulo de Elasticidade correspondente à média das deformações nos pontos a, b e c, à carga de 1000 N.

MmD = Módulo de Elasticidade correspondente à média das deformações nos pontos a, b e c, ao diferencial carga - deformação no intervalo (3000 - 1000 N).

QUADRO 4. Propriedades físicas e mecânicas

Corpos de prova de tamanho estrutural - vigas

Valores não corrigidos a 15% de umidade

Espécie: *Vochysia* sp (Cambará)

PROPRIEDADES		Média	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
Físicas	Teor de umidade	26,77	5,08	18,95
	Peso específico aparente (0%)	0,70	0,035	5,04
	Peso específico aparente (u%)	0,79	0,047	6,02
<u>Teste destrutivo</u>				
	. Módulo de Ruptura (MOR)	47,87	10,57	22,09
	. Módulo de Elasticidade (MOE)	14501,72	2461,81	16,97
Mecânicas	<u>Teste não destrutivo</u>			
(N/mm ²)	. Mb ₄	11193,69	2013,50	17,99
	. Mb ₁	10304,43	2333,21	22,64
	. Mb _D	11617,56	2130,13	18,34
	. Mm ₃	11174,03	1727,59	15,46
	. Mm ₁	10193,84	1953,84	19,17
	. Mm _D	11614,16	1831,93	15,77

Mb₄ = Módulo de Elasticidade no ponto b, à carga de 4000 N.

Mb₁ = Módulo de Elasticidade no ponto b, à carga de 1000 N.

Mb_D = Módulo de Elasticidade no ponto b, ao diferencial carga - deformação no intervalo (4000-1000 N)

Mm₃ = Módulo de Elasticidade correspondente à média das deformações nos pontos a, b e c, a carga de 4000 N.

Mm₁ = Módulo de Elasticidade correspondente à média das deformações nos pontos a, b e c, a carga de 1000 N.

Mm_D = Módulo de Elasticidade correspondente à média das deformações nos pontos a, b e c, ao diferencial carga - deformação no intervalo (4000 - 1000 N).

QUADRO 5. Propriedades físicas e mecânicas.

Corpos de prova de tamanho estrutural - vigas

Valores não corrigidos a 15% de umidade

Espécie: *Hymenaea* sp (Jatobá)

PROPRIEDADES		Média	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
Físicas	Teor de umidade	14,34	2,34	16,34
	Peso específico aparente (0%)	0,92	0,025	2,73
	Peso específico aparente (u%)	0,98	0,033	3,41
<u>Teste destrutivo</u>				
Mecânicas (N/mm ²)	. Módulo de Ruptura (MOR)	88,69	15,16	17,10
	. Módulo de Elasticidade (MOE)	18451,75	1961,68	10,63
	<u>Teste não destrutivo</u>			
Mecânicas (N/mm ²)	. Mb ₅	14925,51	2108,02	14,12
	. Mb ₁	11657,53	2212,24	18,98
	. Mb _D	16161,90	2413,65	14,93
	. Mm ₅	14827,87	1492,46	10,07
	. Mm ₁	11575,12	1420,04	12,27
	. Mm _D	16017,15	1788,76	11,17

Mb₅ = Módulo de Elasticidade no ponto b, à carga de 5000 N.

Mb₁ = Módulo de Elasticidade no ponto b, à carga de 1000 N.

Mb_D = Módulo de Elasticidade no ponto b, ao diferencial carga - deformação no intervalo (5000-1000 N)

Mm₅ = Módulo de Elasticidade correspondente à média das deformações nos pontos a, b e c, a carga de 5000 N.

Mm₁ = Módulo de Elasticidade correspondente à média das deformações nos pontos a, b e c, a carga de 1000 N.

Mm_D = Módulo de Elasticidade correspondente à média das deformações nos pontos a, b e c, ao diferencial carga - deformação no intervalo (5000 - 1000 N).

QUADRO 6. Influência da inclinação da grã sobre a resistência da madeira.

ESPÉCIE	Parkia sp. (Pinho cuiabano)		Vochysia sp. (Cambarã)		Hymenaea sp. (Jatobá)			
	IG	TR	M̄OR	f	M̄OR	f	M̄OR	f
1 x 20	100		39,13	15	72,13	12	97,21	9
1 x 18	85		42,34	1	-		93,65	1
1 x 16	80		36,83	3	80,16	2	85,54	4
1 x 15	76		40,84	1	62,62	1	-	-
1 x 14	74		47,59	3	-	-	92,44	3
1 x 12	69		40,10	3	89,42	1	90,15	5
1 x 10	61		40,39	4	63,86	4	89,26	6
1 x 8	53		40,70	4	64,99	10	82,70	8
1 x 6	40		40,00	1	57,30	6	74,54	5

IG = limite inferior da classe de inclinação da grã;

TR = taxa de resistência correspondente;

M̄OR = média dos módulos de rupturas das vigas de cada classe (N/mm²)

F = Frequência

(MOR). Conforme é de conhecimento, de acordo com (ASTM D-245), quanto menor a inclinação da grã, maior será a resistência da viga à flexão. Portanto, o esperado seria de que o maior valor de M $\bar{O}R$, fosse para a classe de inclinação da grã de 1x20, e o menor valor na classe de 1 x 6.

- Cambará: para as vigas dessa espécie, ocorreram as mesmas relações verificadas para a espécie anterior. Embora o menor valor de M $\bar{O}R$, ter sido da classe de maior inclinação da grã, os valores intermediários não apresentaram nenhuma tendência clara.

- Jatobá: as vigas dessa espécie, apresentaram um melhor relacionamento entre a inclinação da grã e a resistência, sendo o maior e o menor valor do M $\bar{O}R$ correspondente às classes de menor e maior inclinação da grã respectivamente.

Os resultados obtidos para pinho cuiabano e cambará indicam que a utilização de um único parâmetro (inclinação da grã), não é suficiente para avaliação da resistência. Isso porque, existem outros fatores, tal como o peso específico, que influi na resistência da madeira. Em duas vigas com mesmo ângulo de inclinação da grã livre de quaisquer outros defeitos, porém com diferentes pesos específicos, a viga de maior peso específico terá maior resistência.

Os valores médios dos Módulos de Elasticidade (MOE) para as três espécies foram: 9432,09, 14501,72 e 18451,75 N/mm², e os coeficientes de variação de 9,72, 16,97 e 10,63% respectivamente para pinho cuiabano, cambará e jatobá. O coeficiente de variação para as vigas de cambará, demonstram uma maior variação com relação às vigas de pinho cuiabano e jatobá.

A diferença observada entre os valores das médias dos Módulos de Elasticidade obtidos pelo teste destrutivo e os Módulos de Elasticidade obtidos pelo teste não destrutivo foi analisada através da análise da variância e teste de significância (SNK), para verificar se as diferenças são significantes ao nível de probabilidade, de 95%. A mesma análise foi feita também entre as médias dos Módulos de Elasticidade obtidos pelo teste não destrutivo. A utilização do teste SNK* se justifica pelo maior rigor na detecção da diferença significativa entre as médias (STEEL & TORRIE³³). Os resultados são apresentados nos Quadros 12, 13 e 14 (Apêndice). Verifica-se que para:

- Pinho cuiabano - houve diferença significativa entre as médias dos Módulos de Elasticidade à carga comum de 1000 N e ao diferencial carga-deformação no intervalo carga comum-específica (1000 - 3000 N).

- Cambará - houve diferenças significantes entre as médias dos Módulos de Elasticidade:

. à carga comum de 1000 N e ao diferencial carga-deformação no intervalo de cargas comum-específica (1000-4000 N);

. à carga comum de 1000 N e à carga específica de 4000 N.

- Jatobá - para as vigas dessa espécie, houve diferenças significantes entre as médias dos Módulos de Elasticidade:

. à carga comum de 1000 N e ao diferencial carga-deformação no intervalo de cargas comum-específica (1000-5000 N);

. à carga comum de 1000 N e à carga específica de 5000 N;

* Student-Newmans-Keul's.

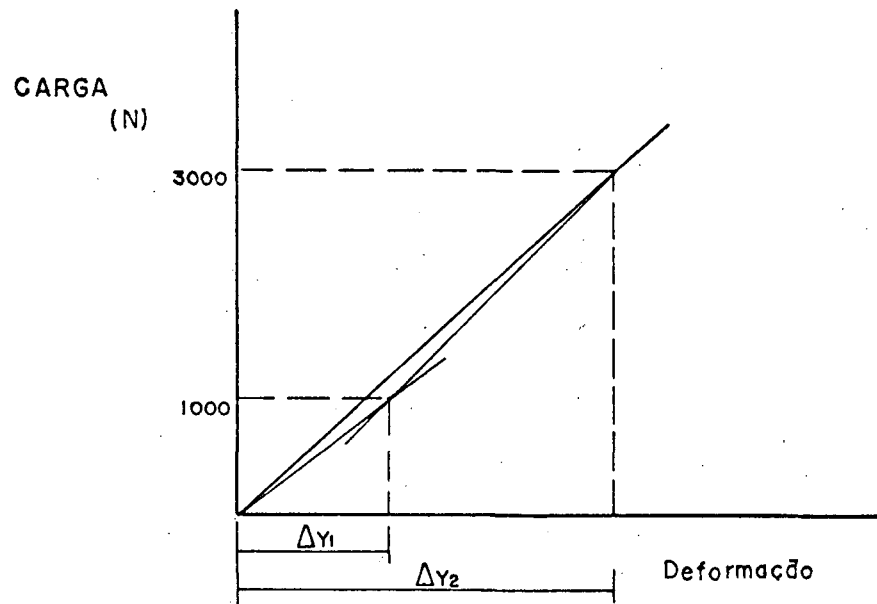
. à carga específica de 5000 N e ao diferencial carga-deformação no intervalo de cargas comum-específica (1000 - 5000 N).

Os fatos acima podem ser atribuídos à maior deformação relativa obtida à carga de 1000 N, conforme Figuras 14a, 14b e 14c. Provavelmente, isto se deve ao valor da pré-carga aplicada pela máquina de classificação estrutural, ser insuficiente para o perfeito ajustamento das vigas antes da aplicação da carga de prova. Para espécies de maior peso específico, esse efeito foi mais marcante, isso porque, a resistência oferecida pela viga é maior, e portanto, a pré-carga, foi ainda mais insuficiente.

4.1.2.2. TEOR DE UMIDADE E PESO ESPECÍFICO

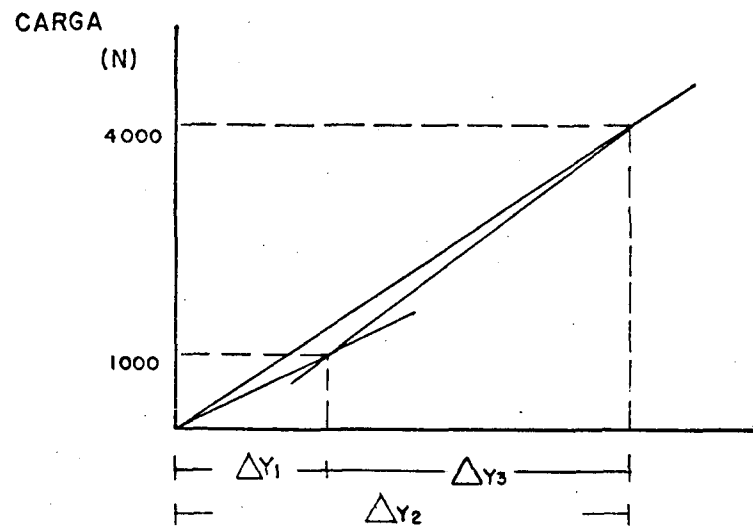
O teor de umidade médio das vigas de pinho cuiabano e de jatobá, estão dentro dos níveis desejados para madeiras secas ao ar. Por outro lado, para as vigas de cambará, este nível de teor de umidade não foi alcançado, devido a erros de medições causados pelo aparelho utilizado na determinação do teor de umidade antes da realização dos testes. Fato este, constatado na determinação através do método de pesagem após os testes. Esta variabilidade fez com que em fase posterior desse estudo, fosse realizada a correção dos valores obtidos para resistência da madeira, utilizando-se de fatores de correções desenvolvidos por Laboratório de Produtos Florestais - EUA²⁷.

Comparando as relações MOR médio e o Peso específico, entre as três espécies, as vigas de cambará apresentaram um baixo valor de MOR médio com relação ao seu Peso específico.



$$\frac{\Delta Y_2}{\Delta Y_1} < 3$$

Figura 14a. Diagrama carga-deformação -Parkia sp. (Pinho cuiabano)

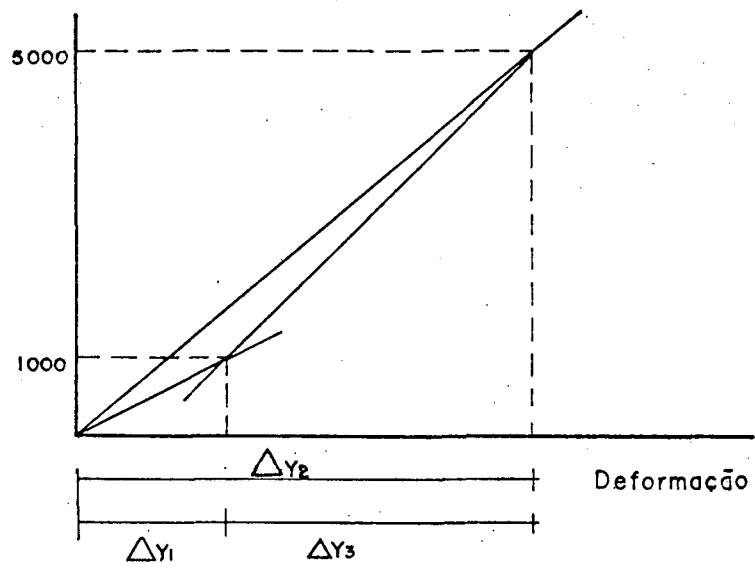


$$\frac{\Delta Y_3}{\Delta Y_1} < 3$$

$$\frac{\Delta Y_2}{\Delta Y_1} < 4$$

Figura 14b: Diagrama carga-deformação - Vochysia sp. (Cambarã)

CARGA
(N)



$$\frac{\Delta Y3}{\Delta Y1} < 4$$
$$\frac{\Delta Y2}{\Delta Y1} < 5$$
$$\frac{\Delta Y2}{\Delta Y3} > \frac{5}{4}$$

Figura 14c: Diagrama carga-deformação - Hymenaea sp. (Jatobá)

Por outro lado, as relações MOE médio e o Peso específico, não apresentaram diferenças tão marcantes entre as espécies. Provavelmente isto pode ser explicado pela menor influência do teor de umidade sobre o Módulo de Elasticidade do que para o Módulo de Ruptura (Laboratório de Produtos Florestais-EUA²⁷).

Os valores dos coeficientes de variação, do Peso específico, para cambará e jatobá, são baixos com relação aos valores obtidos para pinho cuiabano. No entanto, esses coeficientes foram baixos também para corpos de provas livres de defeitos.

4.2. CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS

4.2.1. CORPOS DE PROVA LIVRES DE DEFEITOS

Os valores dos coeficientes de correlação (r) e dos testes de significância (F), para as equações testadas são apresentados no Quadro 7. As seguintes observações podem ser feitas:

- As correlações entre a variável dependente (MOR) e as independentes (PE, CLP e MOE), para Jatobá, foram em geral baixas. Para o Pinho cuiabano e cambará, as correlações entre tais variáveis, apresentaram melhores resultados.

- O modelo combinado entre as variáveis (PE e MOE) proporcionaram uma melhor correlação com o MOR, para as três espécies, sendo os respectivos valores do r , 0,92, 0,81 e 0,50.

- Os resultados encontrados demonstram que o teor de umidade não deve ser isoladamente a causa da baixa corre-

QUADRO 1, Equações testadas e coeficientes de correlação obtidos para corpos de prova livres de defeitos.

ESPÉCIE	Parkia sp. (Pinho cuiabano)		Vochysia sp. (Cambará)		Hymenaea sp. (Jatobá)	
	r	F	r	F	r	F
MOR = a + b . PE	0,90	*	0,53	*	0,22	ns
MOR = a + b . CLP	0,88	*	0,62	*	0,81	*
MOR = a + b . MOE	0,77	*	0,79	*	0,41	*
MOR = a + b . PE + c . MOE	0,92	*	0,81	*	0,50	*

MOR = Módulo de Ruptura

MOE = Módulo de Elasticidade

PE = peso Específico

CLP = Carga no Limite Proporcional

(*) = significativo ao nível de 95% de probabilidade

ns = não significativo ao nível de 95% de probabilidade

lação entre as variáveis. Fato este, que pode ser justificado pela alta homogeneidade no teor de umidade dos corpos de prova.

- Podem ser observados também que apesar dos corpos de prova serem livres de defeitos ocorreram correlações baixas entre algumas variáveis. Exemplo, das encontradas para Jatobá (MOR - PE, MOE).

- A correlação entre MOR e o CLP, não foi a melhor encontrada para todas as espécies. Não ocorrendo para esse caso, o fato observado por ATHERTON⁴.

4.2.2. CORPOS DE PROVA DE TAMANHO ESTRUTURAL - VIGAS

4.2.2.1. VALORES NÃO CORRIGIDOS À 15% DE UMIDADE

No quadro 8 são apresentadas várias equações testadas para as três espécies. As correlações entre as variáveis para cada espécie foram verificadas através dos valores de coeficientes de correlação (r) e do teste de significância (F). Utilizou-se também de valores das variáveis das três espécies agrupadas.

. Pinho cuiabano:

- Para essa espécie, a melhor correlação obtida foi para a equação (MOR = variável dependente e MOE = variável independente) com valor de $r = 0,69$. Provavelmente, isso se deve às condições de obtenção do MOR serem as mesmas para o MOE.

- Observou-se uma baixa correlação entre o MOR e o PE ($r = 0,39$). O que pode ser atribuído à influência dos defeitos presentes nas vigas, tais como, a inclinação da grã.

QUADRO 8. Equações testadas e coeficiente de correlação obtidas para corpos de prova de Valores não corrigidos a 15% de umidade.

ESPECIE:	Parkia sp. (Pinho cuiabano)	Vochysia sp. (Cambará)	Hymenaea sp. (Jatobá)	Agrupadas (Espécies combinadas)
MODELO DE EQUAÇÃO	r	r	r	r
MOR = a + b . PE _u	0,39 *	0,24 ns	0,37 *	0,75 *
MOR = a + b . MOE	0,69 *	0,07 ns	0,67 *	0,80 *
MOR = a + b . Mb(P')	0,54 *	0,00 ns	0,49 *	0,79 *
MOR = a + b . Mb1	0,40 *	0,10 ns	0,45 *	0,56 *
MOR = a + b . MbD	0,41 *	0,04 ns	0,43 *	0,80 *
MOR = a + b . Mm(P')	0,60 *	0,14 ns	0,62 *	0,84 *
MOR = a + b . Mm1	0,59 *	0,05 ns	0,40 *	0,65 *
MOR = a + b . MmD	0,37 *	0,15 ns	0,59 *	0,84 *
MOR = a + b . PE _u + c . MOE	0,69 *	0,24 ns	0,67 *	0,81 *
MOR = a + b . PE _u + c . Mb(P')	0,56 *	0,24 ns	0,54 *	0,82 *
MOR = a + b . PE _u + c . Mb1	0,51 *	0,25 ns	0,51 *	0,76 *
MOR = a + b . PE _u + c . MbD	0,48 *	0,24 ns	0,51 *	0,82 *
MOR = a + b . PE _u + c . Mm(P')	0,62 *	0,28 ns	0,62 *	0,84 *
MOR = a + b . PE _u + c . Mm1	0,64 *	0,25 ns	0,48 *	0,77 *
MOR = a + b . PE _u + c . MmD	0,46 *	0,28 ns	0,60 *	0,85 *

(*) = Os valores de F, significantes ao nível de 95% de probabilidade.

(ns) = Os valores de F, não significantes ao nível de 95% de probabilidade.

PE_u = Peso Específico aparente (uZ)

MOR = Módulo de Ruptura

MOE = Módulo de Elasticidade (teste destrutivo)

Mb(P') = Módulo de Elasticidade no ponto b, sendo:

(P') = 3000 N (pinho cuiabano)

= 4000 N (cambará)

= 5000 N (jatobá)

Mb1 = Módulo de Elasticidade no ponto b, à carga de 1000 N

MbD = Módulo de Elasticidade no ponto b, ao diferencial carga-deformação nos intervalos de cargas (P')- 1000 N

Mm(P') = Módulo de Elasticidade correspondente à média das deformações nos pontos a, b e c, às cargas (P')

Mm1 = Módulo de Elasticidade correspondente à média das deformações nos pontos a, b e c, à carga de 1000 N

MmD = Módulo de Elasticidade correspondente à média das deformações nos pontos a, b e c, ao diferencial carga-deformação nos intervalos de cargas (P-1000N)

- Entre os Módulos de Elasticidade obtidos na máquina de classificação estrutural, a melhor correlação com o MOR, foi para a equação utilizando-se da variável independente (MmP) à carga de 3000 N. Fato este, que pode ser atribuído à observação de todos os defeitos presentes no intervalo de vão considerado para obtenção do MOR (300 cm).

- Os modelos combinados entre as variáveis (PE e os Módulos de Elasticidade), proporcionaram melhor correlação. Isto vem a confirmar os resultados obtidos por SENFT & DELLA LUCIA³¹.

- Nas correlações entre as variáveis MOR e os Módulos de Elasticidade no ponto b (Mb3, Mb1 e MbD), a melhor foi para a variável Mb3 ($r = 0,54$). Portanto, a obtenção do Módulo de Elasticidade através do diferencial carga comum-específica de conformidade com os estudos conduzidos por ANTON³, não é justificável para esse caso.

. Cambará:

Como pode ser observado (Quadro 8), praticamente não houve correlação entre as variáveis testadas para essa espécie, e as regressões lineares não foram significantes ao nível de probabilidade de 95%. No entanto, os resultados obtidos por EL-DSTA et al.¹², indicam que nem para todas as espécies, são obtidos os níveis de correlações satisfatórios.

. Jatobá:

- As mesmas observações feitas nas correlações entre as variáveis para pinho cuiabano, podem ser feitas também para jatobá. Os resultados obtidos para essa espécie, indicam as mesmas tendências verificadas para pinho cuiabano.

- Num caso à parte, as correlações entre as variáveis (MOR-MOE) $r = 0,67$ pra vigas de Jatobá, foram melhores que àquelas obtidas para corpos de prova livres de defeitos ($r = 0,41$). Sendo as vigas, com defeitos e com maior variação no teor de umidade entre as mesmas, pode se afirmar que para essa espécie, a homogeneidade no teor de umidade entre os corpos de prova não foi um fator condicionante para correlação entre as variáveis.

. Espécies combinadas:

Como foi mencionado por SUNLEY & HUDSON³⁵, de que, uma única equação de estimativa da resistência pode ser utilizada para mais de uma espécie, para essas espécies em estudo, verificou-se também essa possibilidade.

Os valores dos coeficientes de correlação das equações testadas, para as três espécies agrupadas, demonstraram uma melhor correlação que para as espécies individuais. Nesse caso particular, provavelmente isto se deve ao aumento no número de observações, quando são mesclados os valores correspondentes às três espécies.

4.2.2.2. VALORES CORRIGIDOS À 15% DE UMIDADE

Conforme salientado anteriormente, os teores de umidade para as vigas apresentaram em determinados casos, uma alta variação. A fim de verificar o efeito dessa variação na correlação, corrigiu-se os valores das propriedades mecânicas para teor de umidade de 15%, utilizando-se de fatores de correção desenvolvidos pelo Laboratório de Produtos Florestais-EUA²⁷, quais sejam:

MOR = 4% para cada 1% de variação no teor de umidade;
MOE = 1,5% para cada 1% de variação no teor de umidade.

Esses fatores são válidas para madeiras de coníferas e foram utilizados para essas espécies em estudo, por não se encontrar em literatura, fatores de correção para madeiras de folhosas. As regressões lineares simples e múltiplas, referentes aos valores corrigidos, são apresentados no Quadro 9.

De uma maneira geral, a correção dos valores a 15% de umidade não resultou em melhora acentuada na correlação entre as variáveis (MOR-MOE e/ou PE).

Com base nessa observação, pode-se afirmar que para essas espécies em estudo, não houve influência acentuada do teor de umidade sobre a correlação entre as variáveis. No entanto, existe a possibilidade de que os fatores de correções utilizados para essas espécies de madeiras tropicais não sejam adequados, uma vez que esses fatores são indicados para madeiras de coníferas. Portanto, recomenda-se maiores estudos sobre a influência do teor de umidade sobre a correlação entre as variáveis utilizadas para prognose de resistência.

4.3. MODELO ESTIMADOR

Com base nas correlações entre as variáveis para prognose da resistência, o modelo de equação escolhido para ser utilizado como equação de prognose da resistência, através

QUADRO 9. Equações testadas e coeficientes de correlação obtidos para corpos de tamanho estrutural.

ESPECIE:	Parkia sp.	Vochysia sp.	Hymenaea sp.	Espécies agrupadas
	Pinho cuiabano	Cambarã	Jatobá	
MODELO DE EQUAÇÃO	r	r	r	r
MOR = a + b . PE _o	0,36 *	0,22 ns	0,21 ns	0,77 *
MOR = a + b . MOE	0,71 *	0,17 ns	0,62 *	0,75 *
MOR = a + b . Mb(P')	0,55 *	0,06 ns	0,48 *	0,73 *
MOR = a + b . Mb1	0,45 *	0,09 ns	0,40 *	0,51 *
MOR = a + b . MbD	0,41 *	0,07 ns	0,45 *	0,72 *
MOR = a + b . Mm(P')	0,61 *	0,19 ns	0,58 *	0,78 *
MOR = a + b . Mm1	0,62 *	0,07 ns	0,41 *	0,60 *
MOR = a + b . MmD	0,37 *	0,07 ns	0,54 *	0,78 *
MOR = a + b . PE _o + c . MOE	0,71 *	0,27 ns	0,64 *	0,80 *
MOR = a + b . PE _o + c . Mb(P')	0,56 *	0,24 ns	0,49 *	0,79 *
MOR = a + b . PE _o + c . Mb1	0,53 *	0,26 ns	0,41 *	0,77 *
MOR = a + b . PE _o + c . MbD	0,46 *	0,24 ns	0,46 *	0,79 *
MOR = a + b . PE _o + c . Mm(P')	0,62 *	0,29 ns	0,58 *	0,81 *
MOR = a + b . PE _o + c . Mm1	0,65 *	0,24 ns	0,42 *	0,78 *
MOR = a + b . PE _o + c . MmD	0,43 *	0,30 ns	0,54 *	0,81 *

(*) = os valores de F, significantes ao nível de 95% de probabilidade

(ns) = os valores de F, não significantes ao nível de 95% de probabilidade

PE_u = Peso específico aparente (u%)

MOR = Módulo de Ruptura

MOE = Módulo de Elasticidade (teste destrutivo)

Mb(P') = Módulo de elasticidade no ponto b, sendo:

(P') = 3000 N (pinho cuiabano)

= 4000 N (cambarã)

= 5000 N (jatobá)

Mb1 = Módulo de Elasticidade no ponto b, à carga de 1000 N

MbD = Módulo de Elasticidade no ponto b, ao diferencial carga-deformação nos intervalos de cargas (P - 1000 N)

Mm(P') = Módulo de Elasticidade correspondente à média das deformações nos pontos a, b e c, às cargas (P)

Mm1 = Módulo de Elasticidade correspondente à média das deformações nos pontos a, b e c, à carga de 1000 N

MmD = Módulo de Elasticidade correspondente à média das deformações nos pontos a, b e c, ao diferencial carga-deformação nos intervalos de cargas (P-1000N)

da máquina de classificação estrutural, para as três espécies em estudo foi:

$$\text{"MOR} = 0,00610 \cdot \text{MbP}' - 11,43816\text{"}$$

o coeficiente de correlação obtido para esta equação de regressão foi de 0,79, e está dentro dos níveis considerados na literatura, como válidos para equação de prognose da resistência (ALEXANDER & ANTON¹, KRAMER²²). A equação poderá ser utilizada para predizer a resistência da madeira das três espécies em estudo nas seguintes condições:

- Vigas com as dimensões nominais da secção transversal de 60 x 120 mm;
- Vão entre os apoios de 1200 mm;
- Módulo de Elasticidade obtido com a aplicação da carga de 3000, 4000 e 5000 N respectivamente para Pinho cuibano, Cambará e Jatobá.

A Figura 15 mostra a linha de regressão da equação escolhida, bem como a visualização da dispersão dos pontos em torno da reta definida pela equação.

Embora as equações de regressão linear múltipla, tenham sido melhores do que as equações de regressão simples, a inclusão do peso específico como uma das variáveis, não seria aconselhável. Essa inclusão, acarretaria em maior tempo dispendido na classificação, porque seria necessária a determinação do peso e volume das vigas. Esse problema poderia ser contornado, se houvesse um sistema contínuo para determinação do peso específico através de radiações (PEREIRA²⁸).

A equação $\text{MOR} = a + b \cdot \text{MmP}'$, deu melhores resultados do que a equação escolhida, no entanto, a sua utilização na prática, estaria condicionada à classificação da viga dentro

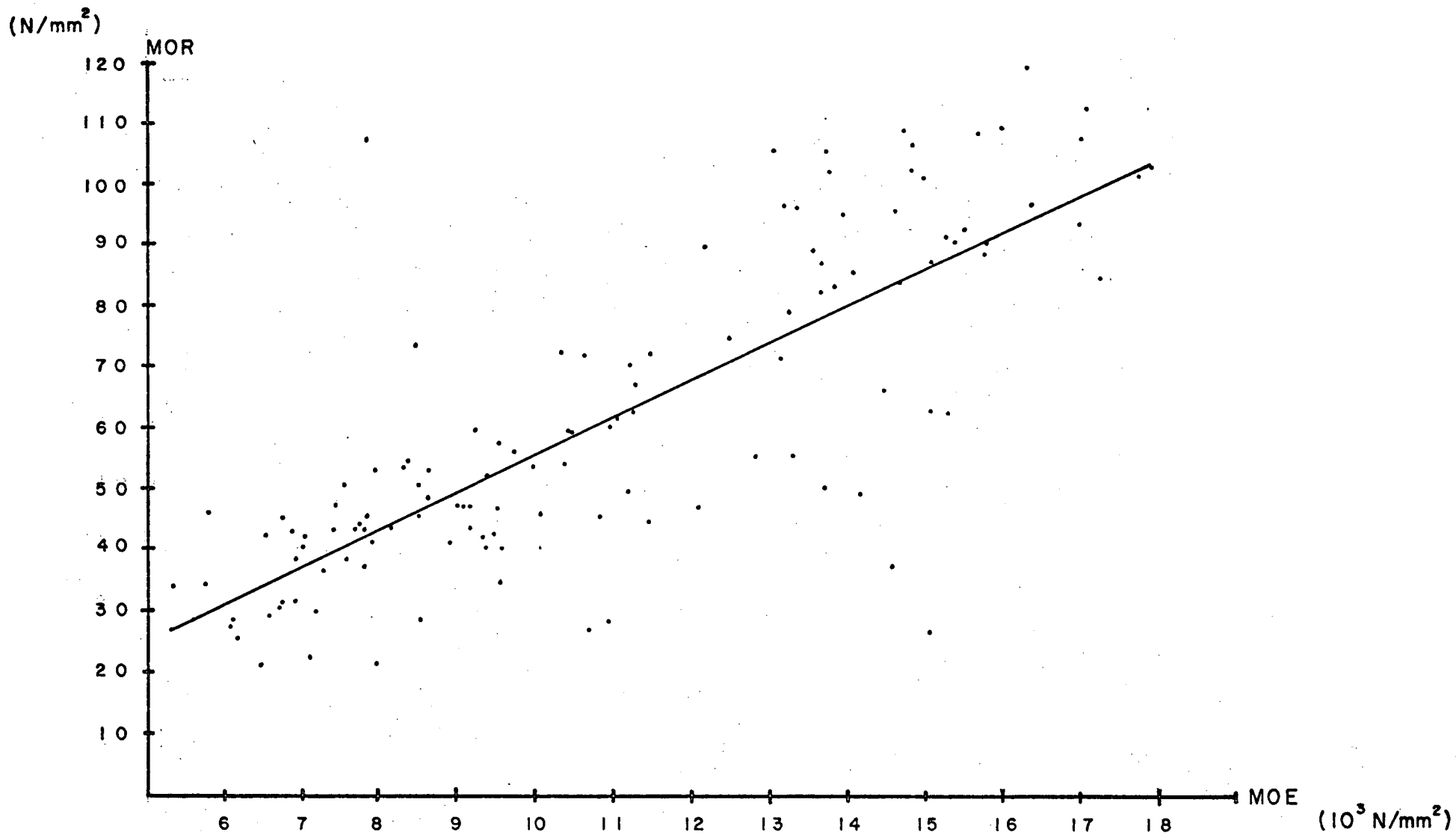


Figura 15. Linha de regressão da equação $MOR = 0,0061 \times Mb (P') - 11,43816$
 (Modelo estimador para as espécies agrupadas.)

do intervalo de 3000 mm, o que de certa forma, traria alguns inconvenientes. Um defeito localizado numa determinada parte da viga, resultaria no efeito redutor sobre as partes sem defeitos, sendo que a mesma estaria sendo classificada abaixo ou acima de sua capacidade real de carregamento.

4.4. CLASSES DE ESFORÇOS

As classes de esforços obtidos para cada espécie, utilizando-se do modelo estimador definido no item 4.3, e de acordo com os procedimentos referentes ao item 3.6, estão no Quadro 10 e ilustradas nas Figuras 16, 17 e 18.

De acordo com o Quadro 10, para as vigas de pinho cuiabano, com dimensões nominais de 60 X 120 mm, com aplicação de uma carga específica de 3000 N, as classes de esforços ficaram definidas da seguinte forma:

Classe 01: definidas pelas peças com deformação menor que 5,46 mm.

Classe 02: deformação entre 5,46 a 6,52 mm.

Classe 03: deformação entre 6,52 a 8,09 mm.

Classe 04: deformação maior que 8,09 mm.

Para o caso do Cambará, com a aplicação da carga de 4000 N, as classes de esforços são as seguintes:

Classe 01: vigas com deformação menor que 4,71 mm

Classe 02: vigas com deformação entre 4,71 a 5,51 mm

Classe 03: vigas com deformação entre 5,51 a 6,61 mm

Classe 04: vigas com deformação maior que 6,61 mm.

Para as vigas de Jatobá, com a aplicação da carga de 5000 N, as classes de esforços ficaram assim definidas:

Classe 01: vigas com deformação menor que 4,63.

QUADRO 10. Classes de esforços: vigas de *Parkia* sp. (Pinho cuiabano), *Vochysia* sp. (Cambará) e *Hymenaea* sp. (Jatobá), com dimensões nominais de 60 X 120 mm.

ESPÉCIES		LIMITES DE CLASSE		
		1	2	3
Parkia sp. Pinho cuiabano	MOE	9155,51	7666,83	6178,17
	MOR	44,41	35,33	26,25
	LIC	40,93	30,98	20,88
	Ta	17,80	13,47	9,08
	y	5,46	6,52	8,09
Vochysia sp. Cambará	MOE	14136,98	12106,16	10075,34
	MOR	74,80	62,41	50,02
	LIC	71,35	59,60	46,94
	Ta	31,02	25,91	20,41
	y	4,71	5,51	6,61
Hymenaea sp. Jatobá	MOE	18003,07	15646,49	13289,9
	MOR	98,38	84,01	69,63
	LIC	92,43	81,23	65,55
	Ta	40,19	35,32	28,93
	y	4,63	5,33	6,27

MOE = módulo de elasticidade (N/mm²);

MOR = módulo de ruptura (N/mm²);

LIC = limite inferior de confiança ao nível de 95% de probabilidade (N/mm²);

Ta = tensão admissível (N/mm²);

y = deformação correspondente aos limites de classes (mm).

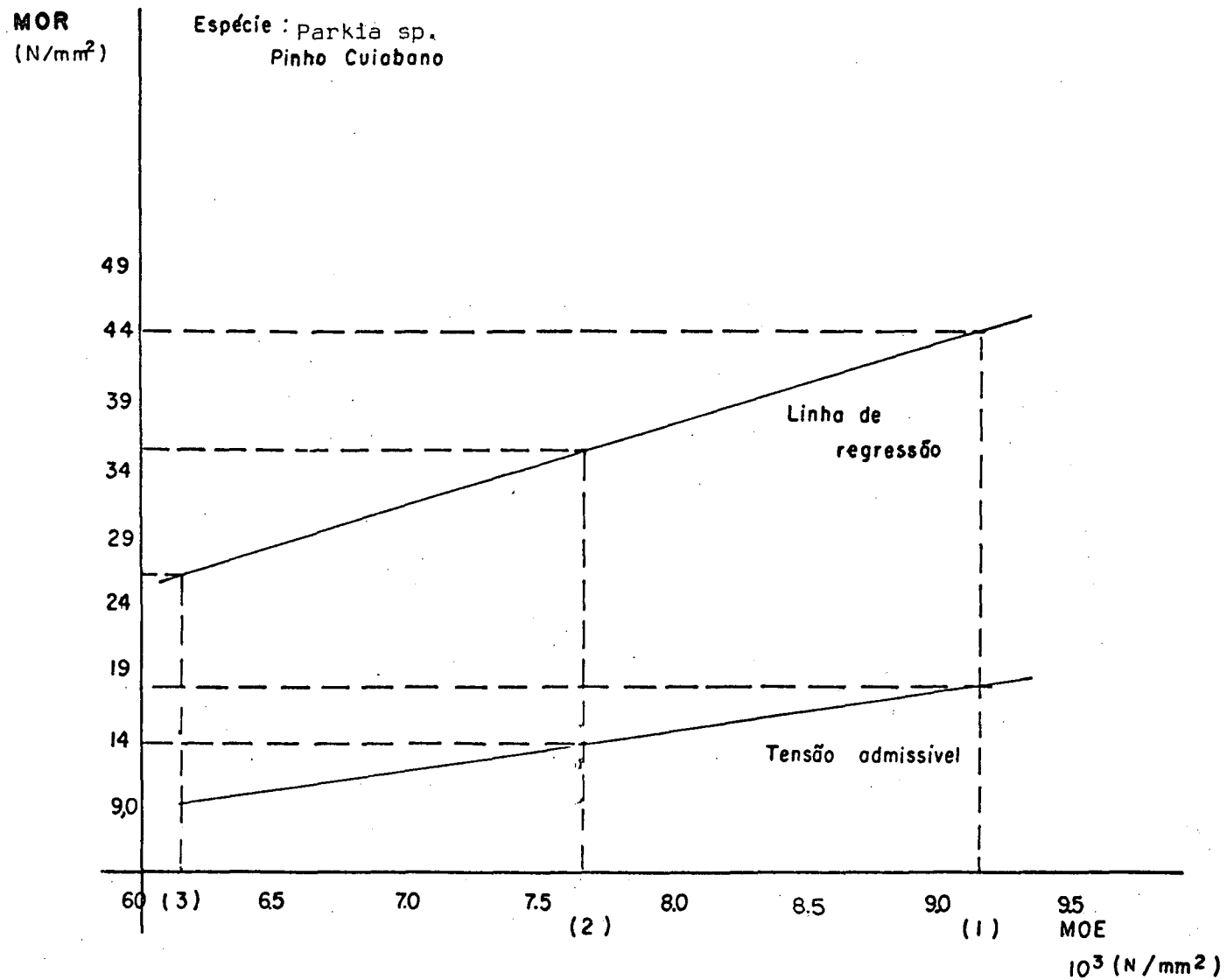


Figura 16. Classes de esforços para peças de tamanho estrutural de Pinho cuiabano.

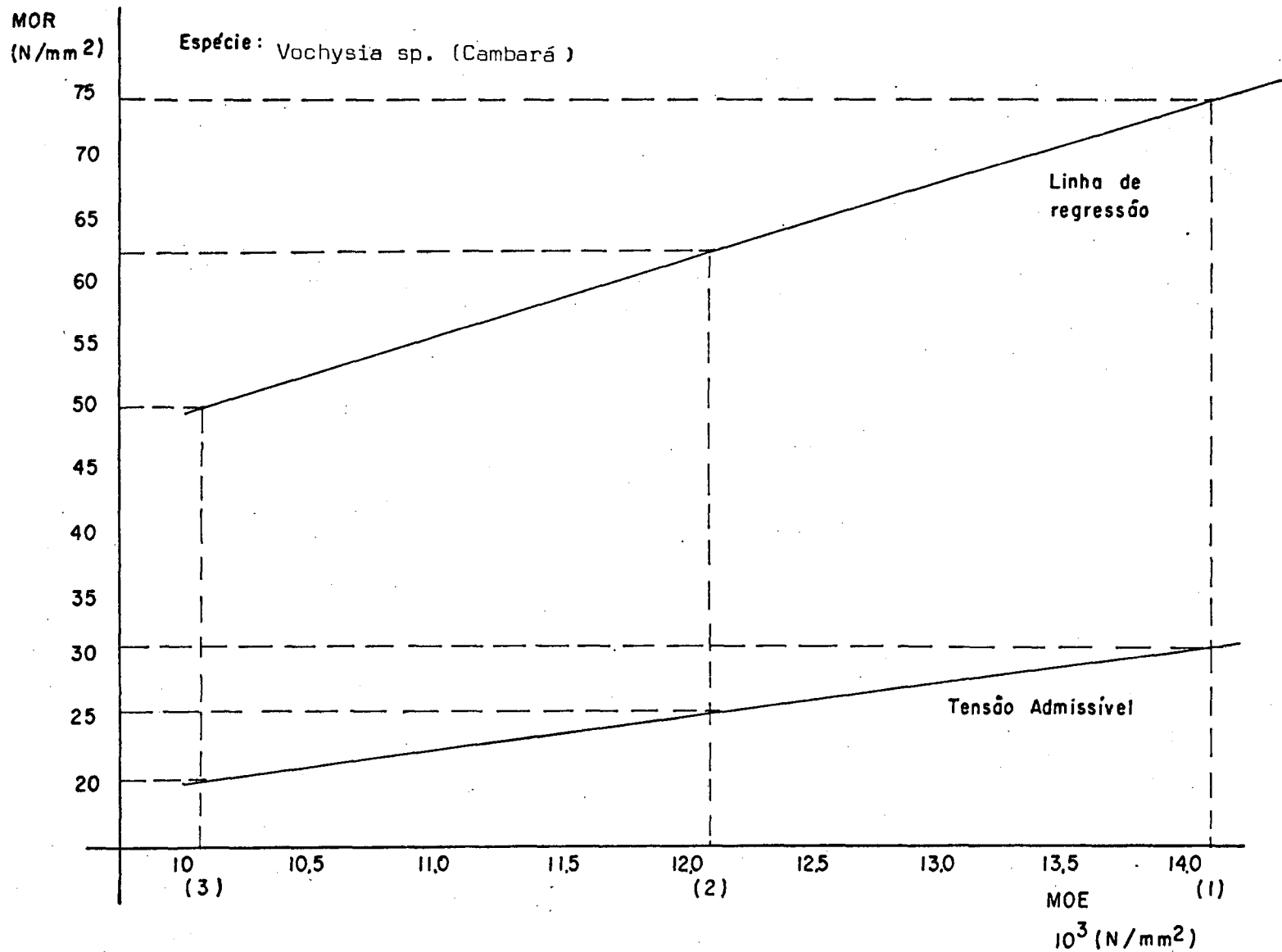


Figura 17. Classes de esforços para peças de tamanho estrutural de Cambará

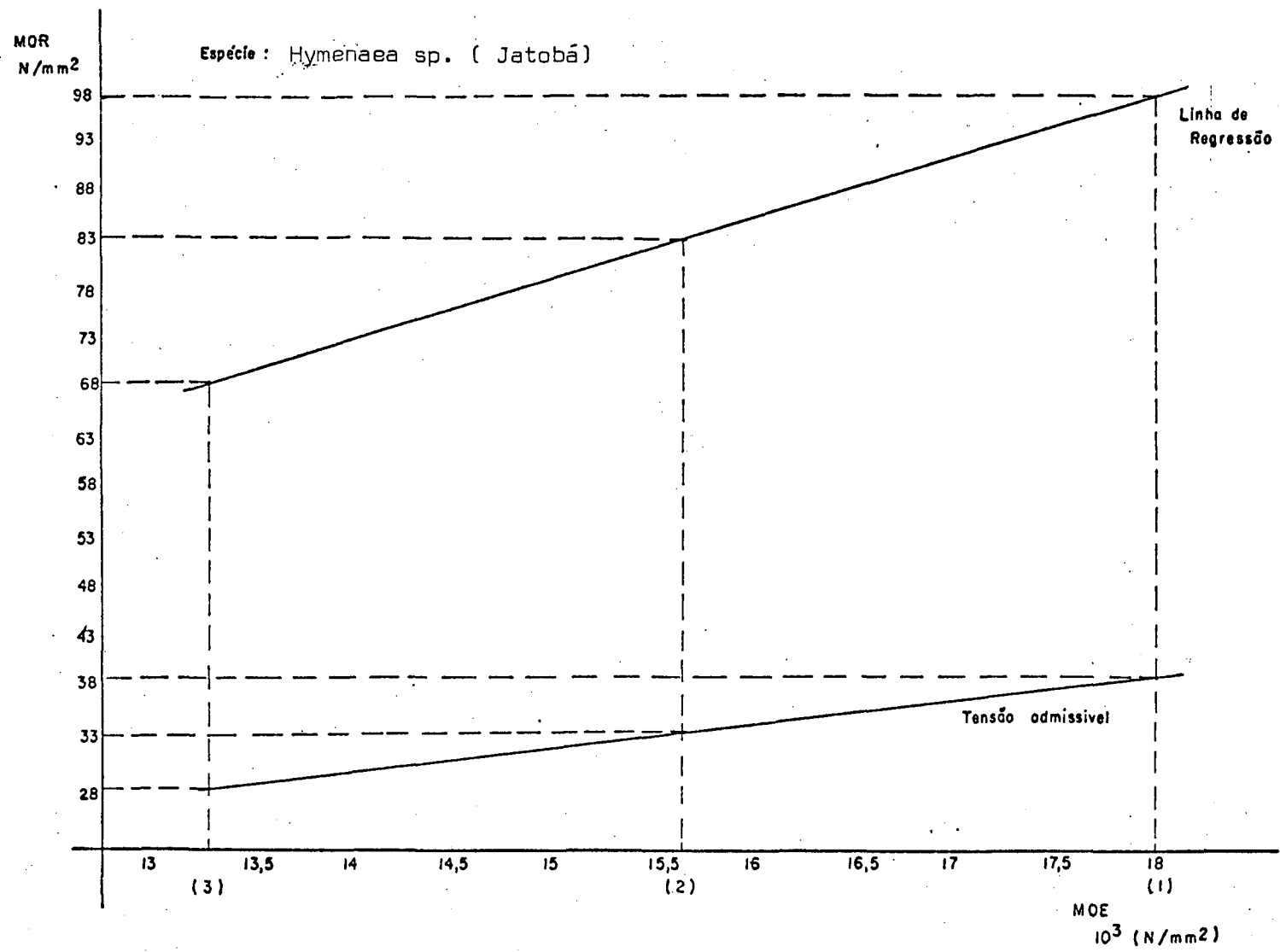


Figura 18. Classes de esforços para peças de tamanho estrutural de Jatobá.

Classe 02: vigas com deformação entre 4,63 a 5,33 mm

Classe 03: vigas com deformação entre 5,33 a 6,27 mm

Classe 04: vigas com deformação maior que 6,27 mm.

As tensões admissíveis (T_a) para cada limite de classe determinadas para cada espécie (Quadro 10), indicam as tensões admissíveis para as vigas ao nível de probabilidade de 95%.

Estes valores são maiores que os obtidos por SUNLEY³⁴ para duas espécies de folhosas (*Ocotea radiaei* e *Nauclea diderrichii*), com Peso Específico semelhante ao deste estudo o autor observou que para *Ocotea radiaei*, a tensão admissível da maior classe por ele definido foi 31,0 N/mm², enquanto que a maior classe para Jatobá foi de 40,19 N/mm². Este fato, pode ser justificado pelo maior rigor no critério para a definição das classes de esforços adotados neste trabalho, comparando-se com os adotados por SUNLEY³⁴.

A percentagem das vigas, dentro das classes estabelecidas anteriormente para cada espécie, são mostradas no Quadro 11. Como pode ser verificado, houve a presença das vigas em todas as classes definidas, com exceção da classe 4 de Pinho cuiabano. A alta porcentagem das vigas de Cambará e de Jatobá nas classes inferiores, indica que para essas espécies, o critério adotado para a definição dos limites de classes, foi um tanto rigoroso, como foi discutido anteriormente.

QUADRO 11. Percentagem das vigas nas classes de esforços.

ESPÉCIE	Parkia sp. Pinho cuiabano (%)	Vochysia sp. Cambará (%)	Hymenaea sp. Jatobá (%)
Classe 01	11,4	11,1	4,3
Classe 02	54,3	13,3	32,6
Classe 03	34,3	46,7	45,6
Classe 04	-	28,9	17,4
	100	100	100

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados obtidos as seguintes conclusões podem ser tiradas :

Os parâmetros utilizados para classificação estrutural através do método visual, segundo os procedimentos da norma ASTM D-245, não são adequados para o material estudado, principalmente devido à ausência de nós e, quando presentes, as suas dimensões não ultrapassaram os limites mínimos considerados pela norma. Por outro lado, o parâmetro inclinação da grã, demonstrou ser eficiente somente para as vigas de Jatobá. Os fatos acima, indicam que a classificação estrutural com a utilização desses parâmetros, para as três espécies estudadas, não permitem uma avaliação eficiente de sua resistência.

Os resultados das propriedades mecânicas obtidos para corpos de prova livres de defeitos, bem como a metodologia empregada para determinação da carga específica, foram satisfatórios, como pode se comprovar através dos resultados do teste destrutivo, onde todos os valores da carga no limite proporcional das vigas com defeitos, foram maiores que o valor estabelecido para teste não destrutivo.

Os resultados dos Módulos de Elasticidade obtidos segundo os procedimentos indicados, demonstraram que exist

te para cada espécie, uma carga mínima e ótima para ser utilizada na classificação estrutural, visando utilizar-se do menor esforço possível sobre a viga, sem que haja prejuízo na precisão. Recomenda-se maiores estudos sobre a determinação da carga específica inclusive a elaboração de uma tabela com base no peso específico da madeira, considerando diferentes dimensões da secção transversal.

- As diferenças significantes obtidas entre as médias dos Módulos de Elasticidade no teste não destrutivo, indicam que a pré-carga aplicada pela máquina de classificação utilizada neste estudo, foi insuficiente para as vigas de secção transversal de 60 x 120 mm.
- De uma maneira geral, as correlações entre as variáveis (MOR-MOE, PE) para corpos de prova livres de defeitos, foram melhores que as correlações encontradas para vigas. Isto deve ser provavelmente causado pela influência dos defeitos presentes nas vigas, o que aumentou a variabilidade dos dados.
- A equação para prognose da resistência com três espécies agrupadas, foi melhor que a equação com espécies individuais. Esse fato pode ser atribuído ao maior número de observações quando as espécies são agrupadas. Recomenda-se que, em futuros trabalhos, o número de repetições por espécie seja aumentado.
- A inclusão do peso específico como uma segunda variável independente, na equação de regressão múltipla, resultou numa melhor correlação, tanto para corpos de prova li

vre de defeitos como para vigas. Este efeito foi mais pronunciado para os corpos de prova livres de defeitos .

- . O Módulo de Elasticidade foi afetado pelos diferentes pontos de aplicação de cargas e pelas diferentes cargas aplicadas. No entanto, suas correlações com o Módulo de Ruptura não foram afetados significativamente, desta maneira, a equação com a variável independente mais fácil de se obter na prática, é a mais indicada para utilização no modelo estimador da resistência.

- . As correlações Módulo de Ruptura - Módulo de Elasticidade e/ou Peso Específico, para as três espécies estudadas não foram afetadas pelo teor de umidade. No entanto recomenda-se maiores estudos com relação a este aspecto principalmente quanto à eficiência ou validade dos fatores de correções empregados para corrigir os valores de resistência da madeira.

- . O modelo estimador da resistência selecionado foi :
"MOR = 0,00610. MbP' - 11,43816". Este modelo é adequado para as três espécies estudadas.

- . Os valores das tensões admissíveis obtidos para cada classes inferiores, indicam que o critério adotado para a definição dos limites de classes, foi um tanto rigoroso . Recomenda-se que em futuros estudos, os valores das tensões admissíveis dos limites de classes sejam reduzidos .

6. RESUMO

O presente trabalho foi conduzido com o objetivo de contribuir sobre a classificação de madeiras tropicais para fins estruturais. Para tanto utilizou-se de 126 vigas com as dimensões nominais de 60 x 120 x 3600 mm, sendo 46 vigas de *Hymenaea* sp. (Jatobá), *Vochysia* sp. (Camabará) e 35 de *Parkia* sp. (Pinho cuiabano).

Como primeira fase deste estudo, testou-se corpos de prova livres de defeitos. Os resultados obtidos forneceram os subsídios necessários à determinação dos limites das classes de esforços.

As vigas foram testadas através do teste mecânico destrutivo e não destrutivo. Os valores obtidos foram correlacionados, utilizando-se diversas equações, com a finalidade de prognosticar a resistência das vigas baseando-se nos dados obtidos através do teste não destrutivo.

Entre as equações testadas, a que apresentou melhor correlação foi a equação combinando as variáveis independentes Peso Específico e Módulo de Elasticidade. A combinação dos valores correspondentes às três espécies numa mesma equação de regressão, resultou na melhor correlação entre as variáveis do que nas equações para espécies individuais.

O modelo estimador escolhido com base no coeficiente de correlação e teste de significância (F), bem como pela sua praticidade, foi: $MOR = 0,0061 \times MBP - 11,43816$. O coefici

ente de correlação obtido para esta equação foi 0,79.

Considerou-se quatro classes de esforços. Observou-se que a metodologia adotada foi adequada, embora uma percentagem relativamente alta das vigas fiquem nas classes de qualidade inferiores. Este fato pode ser atribuído ao maior rigor no critério adotado na definição dos limites de classes neste estudo, quando comparado com estudos anteriores.

SUMMARY

The main objective of this work was to present a contribution to the mechanical grading of tropical timbers . Three species were studied : Hymenaea sp. (Jatobá); Vochysia sp. (Cambará) and Parkia sp. (Pinho Cuiabano). A total of 126 pieces measuring 60 X 120 X 3600 mm were tested.

A preliminary test was conducted to evaluate the properties of small size defect free samples. This was made to establish the grade stresses.

The full-sizes structural members were tested under destructive and non destructive conditions. Several equations were tested in order to obtain a good correlation between the several variables tested.

The best result was observed when using a equation with the independent variables - density and modulus of elasticity . The equation combined for the tree species was found to be better than when considering each species individually.

The following equation was selected :

$$\text{MOR} = 0,0061 \times \text{MbP}' - 11,43816.$$

This equation was chosen due to the fact that the coefficient of correlation was high (0,79) and also for practical reasons.

It was found that the strenght groups established for each species was adequate, although the criteria used to define the groups was too severe and consequently most of the samples were found to be concentrated in the lower strenght groups.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALEXANDER, J.A. & ANTON, A. Mechanical grading of South Eastern Australian hardwoods. (Topic 1/20). In: FOREST PRODUCTS RESEARCH CONFERENCE, 18., Highett, 1977. Contributed Papers. 8 p.
2. ANNUAL Book of ASTM Standards. Philadelphia, American Society of Testing and Materials, 1971. Part 16. 894 p.
3. ANTON, A. Mechanical stress grading of timber and derivation of basic working stresses (Topic 1/19). In: FOREST PRODUCT RESEARCH CONFERENCE, 18., Highett, 1977. Contributed Papers. 16 p.
4. ATHERTON, G.H. Preliminary study of proportional limit as a predictor of ultimate strength in bending. For. Prod. J., 30(11): 47-53, 1980.
5. BENDSTEN, B.A. & YONGS, R.L. Machine stress rating of wood: an overview. In: IUFRO WORLD CONGRESS, 17., Japan, 1981. Proceedings. Japan, Japanese IUFRO Congress Committee, 1981. Division 5: Forest Products. p. 21-34.
6. BROWN, H.P.; PANSHIN, A.J. & FORSAITH, C.C. Textbook of wood technology - II. New York, McGraw Hill, 1952. 783 p.
7. COMISION PANAMERICANA DE NORMAS TECNICAS. Madeiras; métodos de determinación de flexión estática. Santiago, 1972. (Proyecto 1º de norma COPANT 30: 1-0061).
8. CURRY, W.T. & COVINGTON, S.A. Grade stresses for European redwood and whitewood. In: THE PRINCES RISBOROUGH LABORATORY OF THE BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT. The strenght properties of timber. Lancaster, MTP Construction, 1974.
9. DeBONIS, A.L.; WOESTE, F.E. & McLAIN, T.E. Rate of loading influence on Southern Pine 2 by 4's in bending. For. Prod. J., 30(11): 34-37, 1980.
10. DESCH, H.E. Timber it's structure and properties. London, MacMillan, 1962. 350 p.
11. DEUSTSCHE INTERNATIONALER NORMEN (DIN). Berlin u. Koln., 1968. (DIN 52186)

12. EL-OSTA, M.L.M.; BADRAN, D.A. & EL-WAKEEL, A. O. Prediction of modulus of rupture from modulus of elasticity for some egyptian hardwoods. Wood and Fiber, 11 (3): 147 - 154, 1979.
13. GURFINKEL, G. Wood engineering. New Orleans, Southern Forest Products Association, 1973. 573 p.
14. HILDEBRAND, H. C. & MILLER, D.G. Machine grading - theory and practice. For. Prod. J., 16 (11) : 28-34, 1966.
15. HOYLE, R.J. A nondestructive test for stiffness. For. Prod. J., 11(6) : 251-254, 1961.
16. _____. Background to machine stress grading. For. Prod. J. 18 (4) : 87-97, 1968.
17. INCE, P.J. Cost of grading lumber by the machine-stress-rating process. For. Prod. J., 29 (10) : 80-83, 1979 .
18. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DE SÃO PAULO. Métodos de ensaios adotados no I.P.T. para o estudo das madeiras nacionais. Boletim IPT, São Paulo, 31 : 1-62, 1956.
19. JOHNSON, J. W. Selection of low strenght pieces by non destructive testing: Douglas-fir and Hem-fir 2 by 4's in flexure. For. Prod. J., 27 (8) : 53-56, 1977.
20. KLOOT, H. & LEICESTER, R. H. Proof testing as a grading technique for structural timber (Topic 1/18). In : FOREST PRODUCTS RESEARCH CONFERENCE, 18., Highett, 1977. Contribuibuted Papers. 11 p.
21. KOLLMANN, J.W.P. & COTÉ JR., W.A. Principles of wood science and technology. Berlin, Springer, 1968. v. 1, 529 p.
22. KRAMER, P.R. Correlation of bending strenght and stiffness of southern pine. For. Prod. J.; 14 (10): 495 - 496, 1964.
23. LAVERS, G.M. The strenght properties of timbers. In : THE PRINCES RISBOROUGH LABORATORY OF THE BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT. The strenght properties of timber. Lancas ter. MTP Construction. 1974. p. 1-66.

24. LEICESTER, R.H. The future of grading structural timber.
in : IUFRO WORLD CONGRESS, 17., Japan 1981. Proceedings.
Japan, Japanese IUFRO Congress Committee, 1981. Division
5. Forest Products. p. 35-46.
25. MADSEN, B. In-grade testing - problem analysis. For. Prod.
j., 28 (4): 42-50, 1978.
26. _____. North American grading practice and in-grade testing.
In : IUFRO WORLD CONGRESS, 17., Japan, 1981. Proceedings.
Japan, Japanese IUFRO Congress Committee, 1981. Division
5: Forest Products. p. 3-9.
27. MECHANICAL properties of wood. In : FOREST PRODUCTS LABORA
TORY SERVICE, Wood Handbook. Wood as an engineering ma
nual. Washington, U.S. Government, 1955. cap. 4. (Agr
culture handbook, 72).
28. PARKER, H. Simplified design of structural wood. 3. ed. New
York, John Wiley, 1979. 269 p.
29. PEREIRA, J.C.D. A influência do ritmo de crescimento na
densidade da madeira de Pinus elliottii Var. Elliottii .
Piracicaba, 1982. 98 p. Dissertação. Mestrado. Universi
dade de São Paulo.
30. RADIATA PINE ASSOCIATION OF AUSTRALIA. 1974 RPAА grading
rules for Radiata Pine timber. Mackney, RPAА, 1974-128 p.
31. SENFT, J.F. & DELLA LUCIA, R.M. Increased utilization of
tropical hardwood through species - independent structural
grading. For. Prod. j., 29 (6): 22-28, 1979.
32. SIMIONI, A. Sobre a viabilidade técnica da confecção de vi
gas laminadas com madeira juvenil de Pinus elliottii . En
gel. Curitiba, 1978. 98 f. Dissertação. Mestrado. Univer
sidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias .
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.

33. STEEL, R.G.D. & TORRIE, J.H. Principles and procedures of statistics. New York, McGraw Hill, 1960. 481 p.
34. SUNLEY, J.G. Grade stresses for structural timber. In : THE PRINCES RISBOROUGH LABORATORY OF THE BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT. The strengt properties of timber. Lancas ter, MTP Construction, 1974. p. 121-140.
35. SUNLEY, J. G. & HUDSON, W.M. Machine grading of lumber in Britain. For. Prod. J., 14 : 155-158, 1964.
36. WALTERS, C.S.; GUIHER, J. K. & NORTON, H.W. The stafistical reliability of predicting bending strenght from strenght-ratio tables. For. Prod. J., 21 (6): 47-57, 1971.
37. WALTERS, C.S. & REISS, W.L. Predicting modulus of rupture from modulus of elasticity for small, clear specimens of Oak and Cottonwood. For. Prod. J., 27 (6): 51-53, 1977 .
38. WANGAARD, F.F. The mechanical properties of wood. London , Chapman & Hall, 1950. 377 p.

A P Ê N D I C E

QUADRO 12. Análise da variância e teste de significância (SNK).
 Espécie - *Parkia* sp. (Pinho cuabano)
 Valores relativos ao teor de umidade na ocasião dos testes:

ANOVA

FONTE DE VARIACÃO	GL	SQ	QM	F
Tratamento	6	$8,9489 \times 10^7$	$1,4915 \times 10^7$	15,64*
Resíduo	238	$2,27 \times 10^8$	$9,5378 \times 10^5$	
Total	244	$3,1649 \times 10^8$		

(SNK)

	MOE	MbD	MmD	Mb3	Mm3	Mb1	Mm1
Mm1	*	*	*	ns	ns	ns	-
Mb1	*	*	*	ns	ns	-	-
Mm3	*	ns	ns	ns	-	-	-
Mb3	*	ns	ns	-	-	-	-
MmD	*	ns	-	-	-	-	-
MbD	*	-	-	-	-	-	-
MOE	-	-	-	-	-	-	-

(*): Significante ao nível de 95% de probabilidade

ns: Não significante ao nível de 95% de probabilidade.

QUADRO 13. Análise da variância e teste de significância (SNK)

Espécie: *Vochysia* sp. (Cambará).

Valores relativos ao teor de umidade na ocasião dos testes.

ANOVA

FONTE DE VARIACÃO	GL	SQ	QM	F
Tratamento	6	$1,331 \times 10^9$	$2,2183 \times 10^8$	122,51*
Resíduo	308	$5,577 \times 10^8$	$1,8107 \times 10^6$	
Total	314	$1,8887 \times 10^9$		

(SNK)

	MOE	MbD	MmD	Mb4	Mm4	Mb1	Mm1
Mm1	*	*	*	*	*	ns	-
Mb1	*	*	*	*	*	-	-
Mm4	*	ns	ns	ns	-	-	-
Mb4	*	ns	ns	-	-	-	-
MmD	*	ns	-	-	-	-	-
MbD	*	-	-	-	-	-	-
MOE	-	-	-	-	-	-	-

(*) : significativa ao nível de 95% de probabilidade.

ns : não significativa ao nível de 95% de probabilidade.

QUADRO 14. Análise da variância e teste de significância

Espécie - *Hymenaea* sp. (Jatobá)

Valores relativos ao teor de umidade na ocasião dos testes.

ANOVA

FONTE DE VARIACÃO	GL	SQ	QM	F
Tratamento	6	$1,7012 \times 10^4$	$2,8353 \times 10^8$	106,45*
Resíduos	315	$8,39 \times 10^8$	$2,6635 \times 10^6$	
Total	321	$2,5402 \times 10^9$		

(SNK)

	MOE	MbD	MmD	Mb5	Mm5	Mb1	Mm1
Mm1	*	*	*	*	*	ns	-
Mb1	*	*	*	*	*	-	-
Mm5	*	*	*	ns	-	-	-
Mb5	*	*	*	-	-	-	-
MmD	*	ns	-	-	-	-	-
MbD	*	-	-	-	-	-	-
MOE	-	-	-	-	-	-	-

(*) : significante ao nível de 95% de probabilidade.

ns : não significante ao nível de 95% de probabilidade.