

MINISTÉRIO DO INTERIOR
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS
NATURAIS RENOVÁVEIS
DIRETORIA DE INCENTIVO À PESQUISA E DIVULGAÇÃO
LABORATÓRIO DE PRODUTOS FLORESTAIS

LPF - SÉRIE TÉCNICA Nº 4

**CLASSIFICAÇÃO MECÂNICA
DE PEÇAS ESTRUTURAIS
DE MADEIRA**

Brasília, 1989

Ministro do Interior

João Alves Filho

Presidente do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos

Naturais Renováveis

Fernando César de Moreira Mesquita

Diretor da Diretoria de Incentivo à Pesquisa e Divulgação

Luiz Fernando Soares de Assis

Chefe do Laboratório de Produtos Florestais

Mário Rabelo de Souza

COMITÊ EDITORIAL

Eleazar Volpato, Ph. D.

Marcos Antonio Eduardo Santana, Ph. D.

Sebastião Kengen, Ph. D.

Tereza Cristina Monteiro Pastore, M. Sc.

Vera Teresinha Rauber Coradin, M. Sc.

PUBLICAÇÃO

Ernesto Paz Guimarães

Noemia Regina Santos do Nascimento

Tereza Cristina Monteiro Pastore

Yeda Soares de Lucena Bataus

CLASSIFICAÇÃO MECÂNICA DE PEÇAS ESTRUTURAIS DE MADEIRA

Autores: Júlio Eustáquio de Melo *
Cleuber Delano José Lisboa **

* Eng.º Civil, M. Sc. — pesquisador do LPF/DIRPED/IBAMA, bolsista do CNPq.
** Eng.º Civil, M. Sc. — pesquisador do LPF/DIRPED/IBAMA, bolsista do CNPq.

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis.
Diretoria de Incentivo à Pesquisa e Divulgação. Laboratório de Produtos
Florestais. Brasília, D. F.

Classificação mecânica de peças estruturais de madeira, por Júlio Eustáquio
de Melo e Cleuber Delano José Lisboa. Brasília, D. F., 1989.

19p. ilust. (IBAMA. DIRPED. LPF. Série Técnica, 4).

1. Madeira-Peças Estruturais – Classificação mecânica. I. Melo, Júlio Eustá-
quio de. II. Lisboa, Cleuber Delano José. III. título. IV. série.

ÍNDICE

RESUMO	5
SIMBOLOGIA	7
1. INTRODUÇÃO	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1 Determinação das tensões admissíveis pela classificação visual	9
2.2 Determinação das tensões admissíveis pela classificação mecânica	10
2.3 Máquinas de classificação mecânica de tensões de madeira	11
2.3.1 Dispositivos de uma máquina de classificação mecânica de madeira	11
2.3.2 Máquinas de classificação comercializadas	12
2.4 Classificação estrutural no Brasil	12
3. MATERIAIS E MÉTODOS	13
3.1 Seleção de espécies	13
3.2 Amostragem	13
3.3 Ensaio em peças estruturais	13
3.3.1 Módulo de elasticidade obtido na máquina de classificação de tensões (E_{Maq})	13
3.3.2 Módulo de elasticidade simulado (E_{Sim})	14
3.3.3 Módulo de elasticidade Real (E_{Real})	14
3.4 Propriedades físicas	15
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
5. CONCLUSÃO	15
TABELA I	16
TABELA II	16
TABELA III	17
TABELA IV	18
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	19

RESUMO

Dentre os métodos de classificação não-destrutiva de peças estruturais utilizadas em diferentes países, destaca-se, pela sua maior aceitação, a classificação mecânica, em função de sua simplicidade e eficiência. A máquina classificadora de tensões, utilizada neste método, é aqui descrita e analisada quanto à precisão com que determina o módulo de elasticidade de uma peça estrutural, solicitada perpendicularmente ao eixo principal de menor inércia. Aproximadamente 35 vigas, de 5,08 x 10,16cm de seção transversal nominal por 3m de comprimento, para cada uma de seis espécies, foram testadas numa máquina classificadora e, de modo similar, numa máquina universal de teste. Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios, exibindo um alto grau de correlação entre os módulos de elasticidade determinados nas duas máquinas.

O módulo de elasticidade real (flexão pura), obtido por solicitação perpendicular ao eixo de maior inércia, também apresentou um alto coeficiente de correlação quando comparado com o módulo de elasticidade obtido na classificadora, possibilitando assim adotar o módulo de elasticidade real como parâmetro básico para estabelecer a classificação mecânica de tensões de peças estruturais de madeira.



SIMBOLOGIA

- a = Distância de cada cutelo de carga ao apoio mais próximo.
- b = Largura da viga, em cm.
- d = Altura da viga, em cm.
- E_{Maq} = Módulo de elasticidade obtido na máquina de classificação de tensões. O teste é realizado com a peça de madeira solicitada como tábua (carga perpendicular ao eixo principal de menor inércia) bi-apoiada, com carga concentrada central.
- E_{Real} = Módulo de elasticidade real. É obtido na máquina universal de testes INSTRON, sendo a peça solicitada como viga (carga perpendicular ao eixo principal de maior inércia) bi-apoiada, com duas cargas aplicadas simetricamente.
- E_{Sim} = Módulo de elasticidade simulado. É obtido na máquina universal de testes INSTRON, de maneira similar ao E_{Maq} .
- f = Tensão à flexão no limite proporcional.
- \bar{f} = Tensão admissível à flexão.
- f_v = Valor médio de resistência à flexão, obtido em pequenos corpos-de-prova sem defeitos.
- K_1 = Fator de redução para se considerar os defeitos naturais da madeira.
- K_2 = Fator de redução para se considerar o efeito de longa duração de carga, o efeito dimensional e o fator de segurança.
- L = Vão livre, em cm.
- L_1 = $5d$.
- N = Número de peças testadas.
- P = Carga atuante.
- s = Desvio padrão em torno da média de resistência da propriedade.
- V = Velocidade de aplicação de carga.
- x = Limite inferior de exclusão na distribuição dos dados.
- y = Deflexão devido à ação da carga P.
- Y_r = Deflexão relativa aos pontos de aplicação de carga.
- Z = Taxa de variação da deformação específica das fibras extremas, por unidade de tempo.

1. INTRODUÇÃO

A madeira é um dos materiais estruturais mais antigos, servindo ao homem desde tempos imemoriais. Por longo tempo, sua utilização foi feita empiricamente, mas, devido à crescente demanda, como um importante e competitivo material estrutural, fizeram-se necessários projetos construtivos mais eficientes que, por sua vez, exigiram o conhecimento da resistência de cada peça a ser utilizada e, conseqüentemente, uma classificação da madeira em classe de qualidade.

A classificação para este propósito é necessariamente realizada através de testes não-destrutivos, como forma de estimar os valores das propriedades de resistência de cada peça de madeira, sem causar-lhe dano que possa afetar seu emprego para o fim a que se destina.

Vários são os métodos não-destrutivos utilizados para a classificação, como a classificação visual, os testes com raios beta, gama e X, a medição da velocidade de propagação de ondas, a classificação mecânica, etc.

O objetivo deste trabalho consiste em apresentar uma revisão bibliográfica sobre os dois métodos mais difundidos em todo o mundo, quais sejam, a classificação visual e a classificação mecânica, bem como apontar as vantagens e desvantagens de ambos e, finalmente, verificar a eficácia da máquina de classificação mecânica na determinação do proposto parâmetro de classificação de madeiras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Determinação das tensões admissíveis pela classificação visual

As tensões admissíveis para peças de madeira, utilizadas nas construções em geral, são obtidas pela aplicação de sucessivos fatores de redução aos valores médios determinados em pequenos corpos-de-prova sem defeitos e em condição verde (1, 2, 3, 4 e 5).

Os fatores de correção são obtidos através de comparação dos valores de resistência conseguidos nos testes de peças de tamanho estrutural realizados em menor quantidade com aqueles obtidos exaustivamente em testes de pequenos corpos-de-prova sem defeitos. Os fatores de correção estimam a amplitude da influência de cada defeito (nós, inclinação de grã, furos de insetos, etc.) e os fatores impostos pela condi-

ção de utilização da madeira (conteúdo de umidade, dimensão, etc.). A influência de alguns fatores difíceis de serem avaliados, como ocorre com o efeito de longa duração de carga, onde os testes demandam um longo tempo, é considerada através da experimentação adquirida ao longo dos anos e em diferentes partes do mundo (2).

As tensões admissíveis, para os diferentes tipos de solicitações a que uma peça de madeira pode ser submetida, são normalmente calculadas pela seguinte expressão geral (1, 4 e 6):

$$\bar{f} = K_1 K_2 (f_v - x.s),$$

onde:

- \bar{f} = tensão admissível referente a uma determinada propriedade (tipo de solicitação) da madeira, para um particular uso e condição de carregamento;
- K_1 = fator de redução para se considerar os defeitos;
- K_2 = fator de redução para se considerar o efeito de longa duração de carga, o efeito dimensional e o fator de segurança;
- f_v = valor médio obtido para a propriedade de cada espécie de madeira através de testes em pequenos corpos-de-prova sem defeitos, conforme normas adotadas;
- x = limite inferior de exclusão na distribuição dos dados;
- s = desvio padrão obtido para a propriedade.

A determinação do valor de K_1 constitui-se na utilização da classificação visual propriamente dita, a qual consiste em inspecionar visualmente as peças de madeira, em tamanhos estruturais, e separá-las em classes de tensões, previamente estabelecidas, conforme a quantidade, o tamanho e a importância dos defeitos que elas contenham. A cada uma das classes de tensões é associada uma porcentagem do valor obtido para a propriedade, em pequenos corpos-de-prova sem defeitos. Na Inglaterra, por exemplo, são fixadas quatro classes de tensões: 75, 65, 50 e 40% (2,4). Se uma determinada peça de madeira é classificada como da classe 65% em função dos defeitos que contenha, isto significa que apenas 65% ($K_1 = 0,65$) do valor obtido para a propriedade será considerado na determinação da tensão admissível.

A determinação do fator de redução K_2 (1, 2, 3 e 5) é feita em função dos seguintes efeitos, considerados conjuntamente:

a) Efeito dimensional

O efeito dimensional aparece em função da adequação dos diferentes tamanhos de peças estruturais aos valores determinados para um tamanho fixo. É considerado principalmente na flexão, pois a um aumento da altura de uma viga não corresponde um acréscimo equivalente em sua resistência.

b) Longa duração de carga

O efeito da deformação lenta em peças de madeira, sob a ação de cargas permanentes, é bastante significativo. Até hoje, poucos trabalhos têm sido realizados para investigar o efeito de longa duração de carga. Os resultados encontrados evidenciam a dependência de muitos outros fatores, como, por exemplo, dimensão, temperatura, conteúdo de umidade, etc. (7, 8 e 9).

c) Fator de segurança

O fator K_2 inclui o fator de segurança, que é normalmente utilizado em todos os materiais estruturais.

Na Inglaterra, os valores utilizados para K_2 são os seguintes (2 e 4):

- $K_2 = 1/2,25$ para flexão e tração paralela às fibras;
- $K_2 = 1/1,40$ para compressão paralela às fibras;
- $K_2 = 1/2,25$ para cisalhamento paralelo às fibras;
- $K_2 = 1/1,20$ para compressão perpendicular às fibras;
- $K_2 = 1,00$ para módulo de elasticidade.

Finalmente, na determinação da tensão admissível é considerada a influência do "efeito de variabilidade da madeira", através da subtração de $x.s$ do valor médio da tensão, obtida para pequenos corpos-de-prova sem defeitos. A madeira é um ser vivo e, portanto, as suas propriedades estão sujeitas às variações naturais condicionadas ao crescimento, à idade, à região de origem, etc., mesmo quando considerada uma espécie em particular.

Na Inglaterra, o limite inferior de exclusão adotado é de 1% na distribuição dos dados (2 e 4), enquanto nos Estados Unidos o limite é de 5% (1, 3 e 6).

Ressalte-se que existem alguns fatores que podem ser considerados para acréscimo da tensão admissível, como no caso, por exemplo, do conteúdo de umidade. Quando as tensões admissíveis forem derivadas de valores obtidos em testes, em condição verde, tais valores podem ser aumentados se a madeira for utilizada na condição seca (1, 2 e 10).

A determinação das tensões admissíveis através da utilização da classificação visual é bastante difundida nos países mais desenvolvidos em tecnologia da madeira, como Estados Unidos, Inglaterra, Alemanha, Austrália, etc., em

função, principalmente, da tradição já adquirida pela sua utilização e baixo custo de aplicação. A aceitação da classificação visual cria uma certa resistência para a difusão de outros métodos, como a classificação mecânica, que, embora sejam mais onerosos a princípio, devido à necessidade de aquisição de equipamentos, são bem mais precisos. Assim, vale ressaltar as principais deficiências da utilização da classificação visual (4, 11 e 12):

- requer um considerável manejo das peças, porquanto todas as quatro faces devem ser examinadas;
- admite que peças de mesmo tamanho e espécie, contendo os mesmos tipos de defeitos, possuam a mesma resistência;
- leva em consideração somente os defeitos aparentes;
- a aplicação das regras da classificação visual exige muita prática e experiência dos classificadores para o reconhecimento dos defeitos e das espécies de madeiras;
- avaliação da resistência em peça estrutural a partir de resistências médias de pequenas amostras sem defeitos;
- dependência do julgamento humano na classificação das peças.

2.2 Determinação das tensões admissíveis pela classificação mecânica

A descoberta da significativa correlação existente entre o módulo de elasticidade e a tensão de ruptura na flexão, em 1950 (6 e 12), incentivou o desenvolvimento de várias máquinas classificadoras de tensões, as quais determinam o módulo de elasticidade de peças de madeira em tamanho estrutural. Análises estatísticas de dados obtidos em outros países do mundo apresentam um coeficiente de correlação, obtido para a regressão entre o módulo de elasticidade e a tensão de ruptura na flexão, variando de 0,60 a 0,85 (2, 3 e 8). Também o módulo de elasticidade real (flexão pura) é altamente correlacionado com o módulo de elasticidade da peça solicitada como tábua (módulo de elasticidade simulado), apresentando um coeficiente de 0,88 (16).

A importância desta última correlação está relacionada com o esquema de testes adotado pelos fabricantes das máquinas classificadoras. Em todas estas máquinas, a carga é aplicada na direção perpendicular ao eixo principal de menor inércia da peça de madeira (peça solicitada como tábua), devido à maior facilidade de obtenção de grandes deflexões sob a ação de pequenas cargas e também pelo fato de a seção transversal das peças estruturais apresentar, normalmente, variedades de tamanho na maior dimensão, mantendo a menor dimensão mais constante.

As tensões admissíveis, utilizando a classificação mecânica, são obtidas, basicamente, em quatro etapas (3):

- 1) Determinação dos módulos de elasticidade e das tensões de ruptura na flexão de peças de madeira em tamanho estrutural, utilizando uma determinada norma.
- 2) Determinação da linha das tensões admissíveis em três estágios: primeiramente determina-se a equação de regressão entre o módulo de elasticidade e a tensão de ruptura na flexão. A regressão linear é considerada de boa representatividade para a maioria dos estudos realizados (13, 14 e 15). A seguir, é estabelecido o limite de exclusão dos valores encontrados, para se considerar a variabilidade da madeira. O limite inferior utilizado é de 5% nos Estados Unidos (6 e 17) e de 1% na Inglaterra (2 e 18), adotando-se, na prática, uma linha paralela à da equação de regressão. Finalmente, a equação das tensões admissíveis é determinada a partir da equação de exclusão, utilizando um fator de correção para se considerar a longa duração de carga e o fator de segurança propriamente dito. Para as madeiras de folhosas, pode-se utilizar o valor 2,3 para este fator de redução (6).

Graficamente, o procedimento acima pode ser ilustrado da seguinte forma:

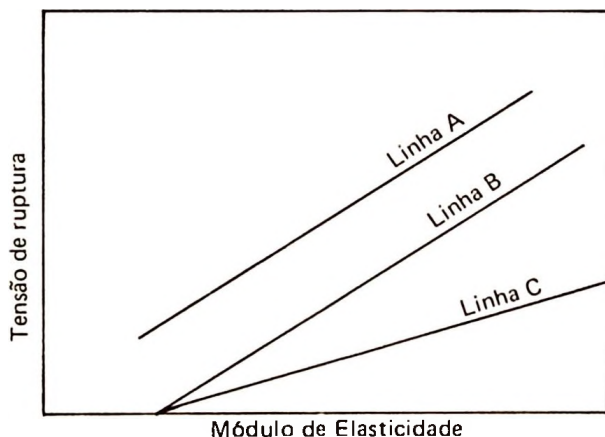


Figura 1 – Diagrama de tensões admissíveis

onde: linha A – corresponde à equação da regressão linear entre o módulo de elasticidade e a tensão de ruptura; linha B – linha correspondente ao limite inferior de exclusão; linha C – linha das tensões admissíveis.

- 3) Determinação dos limites das classes de tensões em função da necessidade de utilização. É aconselhável que as classes de tensões obedeam a uma progressão aritmética ou geométrica (28) ou que sigam algum processo já adotado na prática, a fim de facilitar o aprimoramento das classes obtidas e de adequá-las, facilmente, às necessidades de diferentes mercados. O intervalo das tensões em cada classe deve ser de magnitude tal que associe a simplicidade e a eficiência em função do menor e do maior número de classes possíveis, respectivamente.
- 4) Determinação da correlação entre o módulo de elas-

ticidade na flexão e as demais propriedades de resistência da madeira.

Embora a determinação das tensões admissíveis pela classificação mecânica seja um processo relativamente recente e, portanto, mais sujeito a contínuos aperfeiçoamentos, sua utilização se encontra em crescente ascensão, devido às inúmeras vantagens oferecidas:

- a) o módulo de elasticidade é melhor indicador de resistência de peças de madeiras do que as medidas de defeitos;
- b) as peças são classificadas individualmente, pelas suas próprias características, independente das espécies e considerando-se os defeitos visíveis na superfície como no interior da madeira, o que permite reduzir os fatores de correção. Desta forma, a classificação mecânica permite aumentar significativamente a produção de peças de mais altos graus de qualidade e, conseqüentemente, o relativo alto custo do sistema será compensado pela maior eficiência na utilização das madeiras como material de construção;
- c) projetos de pesquisas têm demonstrado que a classificação mecânica alcança maior sucesso quando utilizada em madeiras latifoliadas tomadas em grupos, o que traz novas vantagens para a exploração da heterogênea floresta amazônica (6);
- d) a resistência é obtida na própria peça a ser utilizada estruturalmente, fazendo com que se diminua o efeito "variabilidade do material", o que aproxima a madeira de outros materiais alternativos, quanto a este aspecto.

2.3 Máquinas de classificação mecânica de tensões de madeira

Diferentes tipos de máquinas de classificação mecânica de resistência de madeira são comercializadas, atualmente. Os esquemas básicos de funcionamento dessas máquinas são praticamente iguais, isto é, todas elas aplicam uma carga concentrada central, perpendicularmente ao eixo principal de menor inércia, em um peça de madeira bi-apoiada.

2.3.1 Dispositivos de uma máquina de classificação mecânica de madeira

Os principais dispositivos de uma máquina de classificação de madeira são relacionados a seguir:

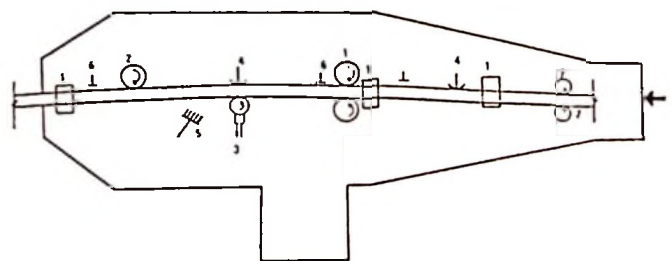


Figura 2 – Esquema geral de uma máquina de classificação mecânica

- a — cilindros horizontais e verticais que transmitem velocidade à peça de madeira (n.º 1 da Figura 2);
- b — controle de velocidade de classificação;
- c — cilindros verticais de apoio da peça de madeira (n.º 2);
- d — cilindros de aplicação de carga (n.º 3);
- e — cilindros de controle de entrada das peças de madeira (n.º 7);
- f — controle de velocidade e razão de aplicação da carga;
- g — mecanismo para leitura e registro da carga e da deflexão.
Algumas máquinas operam com carga fixa, registrando a deflexão correspondente; outras registram a carga necessária para causar uma determinada deflexão (n.º 4);
- h — mecanismo para impressão da carga ou da deflexão, conforme o caso (ver item anterior), que controlarão os limites dos grupos de tensões previamente estabelecidos, através da comparação com os dados obtidos para a peça de madeira que estiver sendo classificada;
- i — revólveres de tintas para imprimir na madeira uma coloração correspondente ao grupo de tensão (n.º 5);
- j — fotocélulas elétricas que comandam a aplicação de carga e leitura de deflexão ou carga (n.º 6).

2.3.2 Máquinas de classificação comercializadas

As principais máquinas de classificação de tensões de madeira comercializadas apresentam as seguintes características:

a) Continuous Lumber Tester - CLT. 1 (3, 11 e 23):

- . origem: EUA;
- . dimensão das peças: até 5 x 30cm de seção transversal e 2,40 a 8,00m de comprimento;
- . velocidade de classificação: 30m/min a 300m/min.;
- . dados obtidos: módulo de elasticidade, sendo a peça solicitada como tábua, primeiro de um lado e em seguida do lado oposto;
- . vão livre: 1,22m;
- . tipo de leitura: mede a força necessária para produzir uma deflexão prefixada, em intervalos de 15 em 15cm ao longo da peça.

b) Stress-o-matic Machine (3, 11 e 23):

- . origem: EUA;
- . dimensão das peças: até 5 x 30cm de seção transversal e 2,40m ou mais de comprimento;
- . velocidade de classificação: modelo som 400 — 122m/min.;
modelo som 600 — 183m/min.;
- . dados obtidos: mínimo módulo de elasticidade, sendo a peça solicitada como tábua, somente de um lado;
- . vão livre: 1,22m;
- . tipo de leitura: mede a força necessária para produzir deflexão prefixada.

c) Micro-Stress Grading Machine (11 e 12):

- . origem: Austrália;
- . dimensões das peças: até 7,5 x 30,0cm;
- . velocidade de classificação: até 30m/min.;
- . dados obtidos: mede os módulos de elasticidade correspondente a quatro limites de deflexões preestabelecidas, com a peça solicitada como tábua. É necessário passar ambos os lados da peça na máquina, para compensar o efeito de possíveis empenamentos;
- . vão livre: 0,91m;
- . tipo de leitura: mede a deflexão causada por uma carga prefixada;
- . n.º de classes de tensões: 7.

d) Computermatic Grading Machine (11, 23 e 24):

- . origem: Austrália;
- . dimensões das peças: até 7,5 x 30cm;
- . velocidade de classificação: até 137m/min.;
- . dados obtidos: mede o módulo de elasticidade a cada 15cm ao longo da peça, que é solicitada como tábua, somente de um lado;
- . vão livre: 0,91m;
- . tipo de leitura: mede a deflexão causada por uma carga prefixada;
- . número de classes de tensões: 5.

2.4 Classificação estrutural no Brasil

As normas de cálculo e execução de estruturas de madeira adotadas no Brasil, NB-11, datam de 1951, não tendo sido revisadas até o presente. As tensões admissíveis são obtidas por um processo bastante simplificado, que consiste em adotar uma porcentagem fixa dos valores médios de resistências obtidos para pequenas amostras de madeira sem defeitos, em condição verde.

A partir do final da década passada, iniciaram-se os primeiros estudos objetivando introduzir um sistema de classificação para as madeiras nacionais (6, 19, e 20).

Alguns autores deram início à introdução da determinação das tensões admissíveis pela classificação mecânica e, embora os três trabalhos, então publicados, não tivessem a repercussão prática necessária, mostraram a validade do processo para as madeiras brasileiras.

Um dos trabalhos realizados no Brasil (19) trata da classificação utilizando o "ensaio-de-obra". Tal método consiste na determinação do módulo de elasticidade das peças estruturais na própria obra, através da colocação de um peso fixo (um saco de cimento, por exemplo) sobre a parte central de uma viga bi-apoiada, medindo-se a seguir a deflexão correspondente. O método permite, de maneira simples e rápida, a seleção das peças mais resistentes para utilização nos pontos de maiores solicitações das estruturas de madeiras.

Atualmente encontram-se em execução, nos laboratórios de tecnologia da madeira do IBAMA, em Brasília, e do INPA, em Manaus, extensivos estudos de classificação e conseqüente obtenção das tensões admissíveis, utilizando, ambos, a versão australiana da máquina de classificação mecânica, P-IVa Grading Machine.

Assim, em função da importância do assunto e juntando-se aos primeiros esforços para a introdução de sistemas mais eficientes de utilização da madeira como material estrutural, este trabalho apresentou uma breve revisão bibliográfica sobre a classificação de madeiras no Brasil e passa, a seguir, a examinar a eficiência da máquina de classificação mecânica "Computermatic P-IVa Grading Machine", instalada no Laboratório de Produtos Florestais do IBAMA, em Brasília.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Seleção de espécies

Com base em inventário florestal, considerando a ocorrência, o volume, as características gerais da árvore e o peso específico, sempre que possível (21), foram selecionadas para estudo em laboratório 53 espécies de madeira da Floresta Nacional do Tapajós, no município de Santarém, estado do Pará, a fim de se determinar suas possibilidades de uso.

Das 53 espécies, 13 foram selecionadas para estudos mais detalhados de tensões estruturais, incluindo a determinação das tensões admissíveis pela classificação mecânica, a verificação dos coeficientes de correlação entre diferentes módulos de elasticidade e de tensão de ruptura e a precisão da máquina de classificação "Computermatic P-IVa Grading Machine".

Para a verificação da precisão da máquina, apenas seis espécies estão sendo utilizadas, as quais fazem parte do presente trabalho:

- a) Andiroba
Carapa guianensis Aubl.
- b) Copaíba
Copaifera reticulata Ducke
- c) Mururé
Brosimum acutifolium Huber
Subsp. *interjectum* C. C. Berg.
- d) Pau-jacaré
Laetia procera (P. et E.) Eichl.
- e) Tachi-preto-da-folha-grande
Tachigalia myrmecophila Ducke
- f) Tauari
Couratari guianensis Aubl.
Sin.: *Courataria pulchra* Sandw.

3.2 Amostragem

As amostras de madeiras das espécies selecionadas foram coletadas ao longo da rodovia Santarém — Cuiabá, entre os quilômetros 50 e 250, utilizando o sistema direto de amostragem ao acaso (22), com as adaptações necessárias às peculiaridades da Região Amazônica. Assim, 25 árvores, em média, por espécie, duas toras por árvore e duas amostras (para cada uma de duas dimensões) por tora foram selecionadas aleatoriamente.

As amostras foram retiradas com dimensões de 10cm x 15cm x 3,10m e 10cm x 20cm x 3,10m, a fim de possibilitar a obtenção de peças aparelhadas com dimensões nominais de 5,08cm x 10,16cm (2" x 4") x 3,00m e 5,08cm x 15,24cm (2" x 6") x 3,00m, respectivamente, a um conteúdo de umidade de aproximadamente 12%.

Também foi coletado, para cada árvore derrubada, o material botânico necessário à posterior confirmação de identificação.

Para fins deste trabalho foram utilizadas, em média, 35 amostras por espécie, com dimensões nominais de 5,08 x 10,16cm de seção transversal por 3,00m de comprimento.

3.3 Ensaio em peças estruturais

3.3.1 Módulo de elasticidade obtido na máquina de classificação de tensões (E_{Maq}).

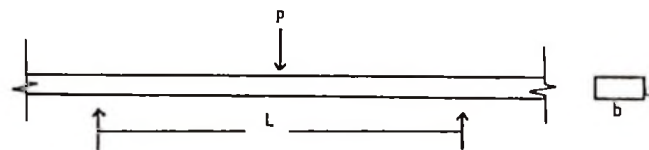


Figura 3 — Esquema de teste.

A máquina de classificação mecânica de tensões de madeiras "Computermatic MK P-IVa" foi utilizada para a determinação do módulo de elasticidade (E_{Maq}), cujos controles normais são os seguintes:

- a) distância entre apoios: $L = 91,44$ cm. Esta distância (vão livre) é sempre constante;
- b) velocidade de classificação: 60m/min.;
- c) carga: 267kg;
- d) tempo de espera para aplicação da carga (delay): 1;
- e) razão da aplicação da carga (restrictor): 3.

A carga aplicada se encontra, seguramente, dentro do regime elástico, conforme verificações feitas em testes com pequenos corpos-de-prova sem defeitos realizados pelo Laboratório de Produtos Florestais do IBAMA, em Brasília, e foi derivada a partir do valor de tensão de 140kg/cm², comumente utilizado para coníferas.

$$P = \frac{2bd^2f}{3L}$$

onde:

P = carga aplicada pela classificadora;
 b = largura nominal da peça (10,16cm);
 d = altura nominal da peça (5,08cm);
 f = 140kg/cm² e
 L = vão livre (91,44cm).

O módulo de elasticidade da máquina (E_{Maq}) foi determinado a cada 15,24cm (6") ao longo do comprimento de cada peça de madeira, carregada como tábua, a 12% de conteúdo de umidade, sendo a primeira medida efetuada a 71cm do início e a última, aproximadamente, a 71cm do final da peça. O lado de aplicação da carga foi escolhido aleatoriamente.

O módulo de elasticidade foi determinado pela fórmula:

$$E_{Maq} = \frac{PL^3}{4ybd^3}$$

onde:

Y = deflexão causada pela aplicação da carga P, cujo valor é registrado a cada 15,24cm (6") ao longo da peça.

3.3.2 Módulo de elasticidade simulado (E_{Sim})

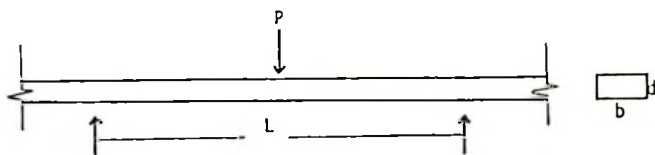


Figura 4 – Esquema de teste.

O módulo de elasticidade simulado foi obtido em uma máquina universal de testes INSTRON, modelo 1127, de maneira similar à determinação do E_{Maq} . A velocidade de teste (do cutelo) foi de 0,823cm/min, determinada conforme a fórmula recomendada pela "British Standards Institution – BSI/79" (25):

$$V = \frac{ZL^2}{6d}$$

onde:

V = velocidade de aplicação de carga e
 Z = taxa de variação da deformação específica das fibras extremas por unidade de tempo (0,003/min.).

O ensaio foi feito nos pontos de maior e menor resis-

tência, conforme indicação da máquina classificadora, e no ponto central. Aplicou-se uma carga inicial de 25kg, para ajuste da peça, aumentando-a em incrementos de 50kg e fazendo-se a leitura da deflexão correspondente, até uma carga máxima de 292kg. Através do gráfico carga x deflexão, determinou-se o módulo de elasticidade para cada ponto da peça, segundo a fórmula:

$$E_{Sim} = \frac{PL^3}{4ybd^3}$$

onde:

P = carga aplicada (292kg) e
 y = deflexão da peça de madeira submetida à carga P.

3.3.3 Módulo de Elasticidade Real (E_{Real})

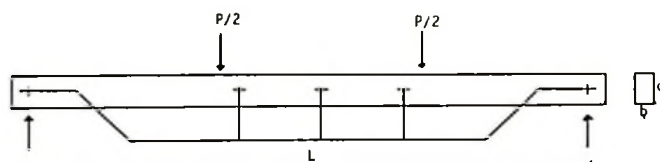


Figura 5 – Esquema de teste.

O módulo de elasticidade real, flexão pura, também foi obtido utilizando-se a máquina universal de testes INSTRON, modelo 1127, e segundo as recomendações da "British Standards Institution—BSI/79" (25).

Neste caso, a aplicação de carga é feita em dois pontos distintos entre si, de 6d, e a deflexão é considerada relativamente a estes dois pontos. A peça, a 12% de conteúdo de umidade, foi solicitada perpendicularmente ao eixo principal de maior inércia e a velocidade de aplicação de carga dada pela fórmula:

$$V = \frac{(3L - 4a) Za}{3d}$$

onde:

L = vão livre = 18d;
 a = distância de cada cutelo ao apoio (6d) e
 Z = taxa de variação da deformação específica das fibras extremas por unidade de tempo (0,003/min.).

O módulo de elasticidade é determinado pela equação:

$$E_{Real} = \frac{3P a L_1^2}{4y_r b d^3}$$

onde:

Y_r = deflexão relativa da viga, correspondente à carga P e
 $L_1 = 5d$.

3.4 Propriedades físicas

O conteúdo de umidade (%) e a densidade aparente a 12% de conteúdo de umidade (g/cm^3) foram obtidos para todas as peças testadas em corpos-de-prova de seção transversal igual ao das peças e comprimento de 5cm. Estes corpos-de-prova foram cortados o mais próximo possível do ponto de ruptura, a fim de evitarem-se as quebras, devido ao teste de resistência máxima à flexão. Os resultados da resistência máxima à flexão serão apresentados em trabalho posterior, porquanto não são necessários aos propósitos da atual análise.

O volume e o peso dos corpos-de-prova foram obtidos, respectivamente, por medidas diretas com paquímetro com precisão de 0,05mm, e através de uma balança Sauter com precisão de 0,01g.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela I apresenta os resultados dos testes realizados. Os resultados de densidade e módulos de elasticidade não foram corrigidos para 12% de conteúdo de umidade em vista da insignificante variação encontrada em torno deste valor. Os coeficientes de variação relativos aos módulos de elasticidade das espécies são inferiores àqueles normalmente obtidos para pequenas amostras sem defeitos e peças estruturais, em diferentes países (16 e 27), o que indica que o material analisado, embora coletado ao acaso, é bastante homogêneo.

A Tabela II mostra a comparação das médias dos módulos de elasticidade da máquina com as médias dos módulos de elasticidade simulado, para o ponto central, de mínima e máxima resistências, através de análise estatística do "erro da diferença equilibrado", a um nível de 5% de exclusão. Diferenças significativas foram bem mais acentuadas para os módulos de elasticidade extremos (mínimos e máximos) do que para os módulos de elasticidade obtidos em relação ao ponto central das peças.

É interessante observar que, para o ponto de módulo de elasticidade mínimo, o E_{Sim} apresentou uma média ligeiramente superior e no ponto de módulo de elasticidade máximo ocorreu o contrário. Somente em relação ao ponto central as médias dos módulos de elasticidade não apresentaram tendências definidas.

A maior homogeneidade de resultados obtidos para o ponto central da peça de madeira é explicada pela maior estabilidade da mesma quando da obtenção do módulo de elasticidade na máquina de classificação. Para os pontos extremos da peça existe a influência da entrada e da saída da peça de madeira na máquina, o que pode produzir ligeira vibração, influenciando na leitura da deflexão. A diferença entre os resultados pode ser reduzida e até mesmo eliminada através

da realização de um maior número de testes e da otimização dos controles da máquina de classificação.

As regressões lineares, bem como os correspondentes coeficientes de correlação entre os módulos de elasticidade da máquina e o simulado, são apresentadas na Tabela III.

O menor valor encontrado para os coeficientes de correlação (0,75) é considerado bom para as aplicações práticas.

O valor mínimo do módulo de elasticidade é o mais importante em termos de classificação, porquanto é o responsável pela escolha do grupo de tensão a que pertence a peça de madeira. Os valores central e máximo, embora de menor importância, têm significação neste estudo, pois o que se deseja verificar é a eficiência da máquina de classificação mecânica. Também foram obtidos coeficientes de correlação suficientemente altos para estes dois últimos níveis de resistência, embora os resultados apresentados na Tabela II indiquem haver uma superestimação para o ponto de maior resistência quando determinado pela máquina classificadora.

A Tabela IV apresenta as equações de regressões lineares entre o módulo de elasticidade real e os módulos de elasticidade simulado e da máquina, para o ponto central das peças de madeira e para cada espécie. Os valores obtidos para os diversos coeficientes de correlação são considerados satisfatórios.

O módulo de elasticidade real é utilizado como parâmetro básico para estabelecer a curva de classificação (linha das tensões admissíveis) em função da não-dependência de um tipo particular de máquina classificadora, da possibilidade de acumular-se os dados obtidos por testes realizados em diferentes laboratórios, da melhor correlação existente entre o E_{Real} e as outras propriedades de resistência da madeira (26) e também devido ao fato de as peças estruturais solicitadas à flexão serem normalmente carregadas como viga.

5. CONCLUSÃO

A revisão bibliográfica realizada indica que a classificação mecânica de madeiras é mais eficiente e conduz à obtenção de um maior número de peças de mais alta qualidade, em relação à classificação visual.

A classificação mecânica em grupos de espécies de madeiras latifoliadas é considerada mais eficiente do que quando se classificam espécies individualmente, o que traz novas vantagens para a utilização das madeiras da heterogênea floresta amazônica brasileira.

Diferenças significativas a um nível de 5% de exclusão foram encontradas através da análise estatística do "erro de

diferença equilibrado”, aplicada na comparação dos módulos de elasticidade determinados pela máquina de classificação mecânica e o simulado. Estas diferenças poderão ser até eliminadas através da realização de um maior número de testes e da otimização dos controles da máquina de classificação.

A alta correlação existente determinada para os menores módulos de elasticidade, quando estabelecidas as equações de regressões lineares, justifica, mais uma vez, a utilização da máquina de classificação mecânica na avaliação da resistência de peças estruturais de madeira.

TABELA I – Sumário dos testes

Espécie	Número de peças	Densidade aparente (g/cm ³)	Teor de umidade médio (%)	Parâmetro	Módulo de elasticidade (x 10 ³ kg/cm ²)						E _{Real}
					Máquina (E _{Maq})			Simulado (E _{Sim})			
					Mínimo	Central	Máximo	Mínimo	Central	Máximo	
ANDIROBA	38	0,72	12,4	Média	144	156	182	157	160	162	177
				D. Padrão	22,4	19,1	25,8	18,2	14,2	14,9	21,2
				Coef. Variação	15,5	12,2	14,2	11,6	9,3	9,2	12,0
COPAÍBA	33	0,74	12,3	Média	153	165	189	161	163	165	180
				D. Padrão	22,8	26,0	31,4	21,6	19,7	20,6	24,8
				Coef. Variação	14,9	15,8	16,6	13,4	12,0	12,5	13,8
MURURÉ	25	0,63	11,9	Média	131	137	164	138	140	141	159
				D. Padrão	17,5	18,8	27,7	18,2	16,2	15,7	21,5
				Coef. variação	13,4	13,7	16,9	13,1	11,6	11,1	13,5
PAU-JACARÉ	36	0,83	11,0	Média	193	223	252	199	202	203	246
				D. Padrão	32,4	30,7	41,8	36,4	30,6	27,0	39,3
				Coef. variação	16,8	13,8	16,6	18,3	15,2	13,3	15,9
TACHI	34	0,71	11,8	Média	147	161	182	150	152	154	176
				D. Padrão	20,5	32,2	29,1	21,0	20,5	19,5	29,0
				Coef. variação	14,0	20,0	16,0	13,9	13,4	12,7	16,4
TAUARI	41	0,61	11,4	Média	128	140	157	139	141	142	160
				D. Padrão	18,3	19,1	23,4	17,3	17,1	16,7	22,8
				Coef. variação	14,3	13,6	14,9	12,4	12,1	11,8	14,2

TABELA II – Comparação entre os módulos de elasticidade da máquina e simulado

VARIÁVEL	ANDIROBA		COPAÍBA		MURURÉ		PAU-JACARÉ		TACHI		TAUARI	
	Média (x 10 ³ kg/cm ²)	*	Média (x 10 ³ kg/cm ²)	*	Média (x 10 ³ kg/cm ²)	*	Média (x 10 ³ kg/cm ²)	*	Média (x 10 ³ kg/cm ²)	*	Média (x 10 ³ kg/cm ²)	*
E _{Maq} (mín.)	144	SS	153	NS	131	NS	193	NS	147	NS	128	SS
E _{Sim} (mín.)	157		161		138		199		150		139	
E _{Maq} (central)	156	NS	165	NS	137	NS	223	SS	161	NS	140	NS
E _{Sim} (central)	160		163		140		202		152		141	
E _{Maq} (máx.)	182	SS	189	SS	164	SS	252	SS	182	SS	157	SS
E _{Sim} (máx.)	162		165		141		203		154		142	

* – Nível de significância com 5% de exclusão.
 NS – Diferença não significativa entre as médias.
 SS – Diferença significativa.

TABELA III – Equações de regressões lineares entre os módulos de elasticidade da máquina e o simulado

Espécie	Número de peças	Módulo de elasticidade (x 10 ³ kg/cm ²)	Regressão linear	Coefficiente de correlação
ANDIROBA	38	Mínimo	$E_{Sim} = 0,65 E_{Maq} + 63,75$	0,79
		Central	$E_{Sim} = 0,57 E_{Maq} + 70,72$	0,74
		Máximo	$E_{Sim} = 0,48 E_{Maq} + 73,77$	0,84
COPAÍBA	33	Mínimo	$E_{Sim} = 0,80 E_{Maq} + 39,36$	0,84
		Central	$E_{Sim} = 0,59 E_{Maq} + 65,33$	0,79
		Máximo	$E_{Sim} = 0,53 E_{Maq} + 65,01$	0,80
MURURÉ	25	Mínimo	$E_{Sim} = 0,78 E_{Maq} + 36,33$	0,75
		Central	$E_{Sim} = 0,66 E_{Maq} + 49,04$	0,77
		Máximo	$E_{Sim} = 0,36 E_{Maq} + 82,56$	0,64
PAU-JACARÉ	36	Mínimo	$E_{Sim} = 0,92 E_{Maq} + 21,56$	0,82
		Central	$E_{Sim} = 0,85 E_{Maq} + 10,92$	0,86
		Máximo	$E_{Sim} = 0,49 E_{Maq} + 79,62$	0,76
TACHI	34	Mínimo	$E_{Sim} = 0,77 E_{Maq} + 37,33$	0,75
		Central	$E_{Sim} = 0,53 E_{Maq} + 66,23$	0,84
		Máximo	$E_{Sim} = 0,50 E_{Maq} + 62,37$	0,75
TAUARI	41	Mínimo	$E_{Sim} = 0,88 E_{Maq} + 25,81$	0,94
		Central	$E_{Sim} = 0,88 E_{Maq} + 26,50$	0,91
		Máximo	$E_{Sim} = 0,64 E_{Maq} + 41,75$	0,89

TABELA IV – Equações de regressões lineares entre o módulo de elasticidade real com os módulos de elasticidade da máquina e simulado central

Espécie	Número de Peças	Regressão linear	Coefficiente de correlação
ANDIROBA	38	$E_{Real} = 0,83 E_{Maq} + 47,9$	0,75
		$E_{Real} = 1,16 E_{Sim} - 7,7$	0,81
COPAIBA	33	$E_{Real} = 0,82 E_{Maq} + 44,1$	0,85
		$E_{Real} = 1,14 E_{Sim} - 6,3$	0,89
MURURÉ	25	$E_{Real} = 0,82 E_{Maq} + 46,2$	0,72
		$E_{Real} = 1,07 E_{Sim} + 9,31$	0,81
PAU-JACARÉ	36	$E_{Real} = 1,07 E_{Maq} + 8,0$	0,83
		$E_{Real} = 1,09 E_{Sim} + 27,2$	0,85
TACHI	34	$E_{Real} = 0,79 E_{Maq} + 48,1$	0,88
		$E_{Real} = 1,23 E_{Sim} - 11,3$	0,87
TAUARI	41	$E_{Real} = 1,05 E_{Maq} + 13,6$	0,88
		$E_{Real} = 1,29 E_{Sim} - 20,7$	0,96

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BODIG, J. & JAYNE, B. A. — Mechanics of wood and wood composites. USA, 1982, 712 p.
2. BOOTH, L.G. & REECE, P. O. — The structural use of timber. London, 1967, 285 p.
3. HILBRAND, H. C. & MILLER, D. G. — Machine grading theory and practice. Forest Products Journal, Vol 16, n.º 11, 28-40, Nov. 1966.
4. SUNLEY, J. G. — Grade stresses for structural timbers. Forest Products Research — Bulletin n.º 47, London, 1968, 19 p.
5. HOYLE, R. J. — Wood technology in the design of structures. Washington, 1971, 312 p.
6. DELLA LUCIA, R. M. — Strength grading of construction lumber for Brazil. Orientação: Dr. J.F. Senft. Faculty of Purdue University, 1975. 152 p. Tese (Doctor of Philosophy).
7. SENFT, J. F.; SUDDARTH, S. K. & ANGLETON, H. D. — A new approach to stress grading of lumber. Forest Products Journal, 183 — 186, April, 1962.
8. HUDDLESTON, E. B. & ANTON, A. — The grading of timber into stress grades by mechanical means. Journal of the Institute of Engineers, Austrália, Vol. 39, N.º 6, 1967, 11 p.
9. MULLER, P. H. — Machine stress-grading of scaffold boards. Council for Scientific and Industrial Research, Report 287, Pretoria, 1969, 48 p.
10. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. — Tentative method for evaluating allowable properties for grades of structural lumber. Designation D 2915-70T. USA. ASTM. 1981.
11. SUNLEY, J. G. — Review of non-destructive testing of timber. Forest Products Research Laboratory. Princes Risborough, Timberlab Papers, n.º 19. 8 p.
12. CURRY, W. T. — Mechanical stress grading of timber. Forest Products Laboratory, Princes Risborough. Timberlab Papers n.º 18, 1969, 11 p.
13. MILLER, D. G. — Factors affecting the "out-turn" of a non-destructive test. Canadian Forest Industries, April, 1966, 5 p.
14. FEWELL, A. R. — Relations between the moduli of elasticity of structural timber in bending. Building Research Establishment. Princes Risborough Laboratory, London, 1980, 14 p.
15. ANTON, A. — Mechanical stress grading of timber and derivations of basic working stresses. Wood Technology and Forest Research Division, Forestry Commission of N. S. W. Sydney, Austrália, 1977, 16 p.
16. TORY, J. R. — Modulus of elasticity. Anglo scandinavian conference on stress grading. Princes Risborough, Paper n.º 9, June, 1972. 12 p.
17. BODIG, J. — A review of the wood engineering program at INPA/CPPF. Manaus, 1982, 29 p.
18. PRINCES RISBOROUGH LABORATORY. Courses on stress grading of timber. Princes Building Research Establishment, 17 p.
19. FURIATI, M. — Classificação estrutural de peças de madeira. Orientação: Prof. Dr. João C. Hellmeister. São Carlos, EESC-USP, 1982. 133 p. Dissertação (Mestre em estruturas).
20. FREITAS, A. R. — Probabilistic approach in the design of wood structures in Brazil based on the variability of 24 species. Doctor of Philosophy, Virginia Polytecnic Institute and State University. October, 1978, 79 p.
21. VAN DER SLOOTEN, H. J. et alli. — Madeiras da Amazônia, características e utilização. Laboratório de Produtos Florestais/MA/IBDF/SEPLAN/CNPq. Vol. 1, 1981, Brasília, DF, 133 p.
22. BENDTSCH, B. A.; FEESE, F & ETHINGTON, R. L. — A forest sampling method for wood strength. Forest Products Journal. Vol. 20, n.º 11, 1970, 5 p.
23. HOYLE, R. J. — Third short course machine stress-rated lumber. Proceedings. Washington, April-May, 1970, 197 p.
24. PLESSEY TELECOMMUNICATIONS. "Computermatic MK P IVa" timber stress grading machine. New South Wales, Austrália, 1973. (Handbook, 28M).
25. BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Methods of test for determination of certain physical and mechanical properties of timber in structural size. BS 5820, 1979.
26. CURRY, W. T. & TORY, J. R. — The relations between the modulus of rupture (ultimate bending stress) and modulus of elasticity of timber. Building Research Establishment. Princes Risborough Laboratory, CP 30/76, 1976, 19 p.
27. WOOD HANDBOOK. — Wood as an engineering material. Forest Products Laboratory, Forest Service, U. S. Department of Agriculture. Agriculture Handbook n.º 72, revised august 1974, cap. 4.
28. PEARSON, R. G. — The establishment of working stresses for groups of species. Division of Forest Products Technological. Paper n.º 35. Melbourne, Austrália, 1965.



ENDEREÇO DO EDITOR

**Diretoria de Incentivo à Pesquisa e Divulgação
Departamento de Divulgação Científica
Divisão de Divulgação Técnico-Científica
W/3 Norte – Q. 510
Edifício Cidade de Cabo Frio – 3º andar
70750 – Brasília-DF**

LABORATÓRIO DE PRODUTOS FLORESTAIS – IBAMA

Endereço: SAIN – Av. L4 Norte – Lote 04 – CEP 70770

Fones: (061) 224-4789/224-5337/223-5864

Telex: (061) 2120/1711 – Fax: 224-5206

Caixa Postal 152874 – CEP 70919

BRASÍLIA-DF