

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE
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 17

**CLASSES DE TENSÕES PARA
NOVE ESPÉCIES DE
MADEIRAS BRASILEIRAS.**

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE

José Antonio Lutzenberger

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE

E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS

Eduardo de Souza Martins

DIRETORIA DE INCENTIVO À PESQUISA E DIVULGAÇÃO

Bráulio Ferreira de Souza Dias

LABORATÓRIO DE PRODUTOS FLORESTAIS

Marcus Vinicius da Silva Alves

Comitê Editorial

Cleuber José Delano Lisboa, M.Sc.

Marcos Antonio Eduardo Santana, Ph.D.

Sebastião Kengen, Ph.D.

Tereza Cristina Monteiro Pastore, M.Sc.

Vera Terezinha Rauber Coradin, M.Sc.

Publicação

Ernesto Paz Guimarães - revisor

Tereza Cristina Monteiro Pastore - edição

CLASSES DE TENSÕES PARA NOVE ESPÉCIES DE MADEIRAS BRASILEIRAS.

*Júlio Eustáquio de Melo**

* Responsável pelo setor de Engenharia da Madeira do Laboratório de Produtos Florestais da Diretoria de Pesquisa do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente – LPF/DIRPED/IBAMA.

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

Classes de tensões para nove espécies de madeiras brasileiras/Júlio Eustáquio de Melo. – Brasília, 1991.

17p.: il. – (IBAMA, DIRPED, LPF. Série Técnica, 17).

1. Madeira resistência I Melo, Julio Eustáquio II Título III Série.

SUMÁRIO

RESUMO.....	5
SIMBOLOGIA	7
1. INTRODUÇÃO	9
2. EXPERIMENTAÇÃO	9
2.1 Espécies de Madeiras.....	9
2.2 Ensaio Estruturais.....	9
2.3 Densidade aparente e Conteúdo de umidade.....	10
2.4 Pequenos corpos-de-prova isentos de defeitos.....	10
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	11
3.1 Agrupamento de espécies.....	11
3.2 Determinação da curva de tensões admissíveis.....	13
3.3 Definição das classes de tensões admissíveis.....	14
4. CONCLUSÕES.....	14
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	16

RESUMO

Aproximadamente 35 peças, medindo 5,08 x 10,16cm de seção transversão nominal, com 3m de comprimento para cada uma de seis espécies amazônicas, foram ensaiadas numa máquina classificadora e, de modo similar, numa máquina universal de ensaios. Os resultados obtidos, corrigidos para 12% de teor de umidade, mostraram-se bastante satisfatórios, apresentando um alto grau de correlação entre os módulos de elasticidade determinados nas duas máquinas. Agruparam-se as seis espécies com três espécies da Amazônia, ensaiadas por outra instituição, obtendo-se a otimização do coeficiente de correlação entre o módulo de elasticidade real e a tensão de ruptura à flexão para um grupo de sete espécies. A reta de regressão linear entre estas duas variáveis foi traçada, objetivando o estabelecimento da reta de tensões admissíveis e, conseqüentemente, as classes de tensões, utilizando-se das séries de Renard ou "preferred number series".

SIMBOLOGIA

- a = Distância de cada ponto de carga ao apoio mais próximo.
- b = Largura da viga.
- d = Altura da viga.
- D_{ap} = Densidade aparente, a 12% de conteúdo de umidade.
- E = Módulo de elasticidade à flexão pura ou módulo de elasticidade real. É obtido por ensaio numa máquina universal de ensaios, sendo a peça solicitada perpendicularmente ao eixo principal de maior inércia, biapoiada, com duas cargas aplicadas simetricamente.
- E' = Módulo de elasticidade aparente à flexão.
- E_m = Módulo de elasticidade aparente obtido na máquina de classificação. O teste é realizado com a peça de madeira solicitada perpendicularmente ao eixo principal de menor inércia, biapoiada, com carga concentrada central.
- E_s = Módulo de elasticidade simulado. É obtido por ensaio numa máquina universal de ensaios, de maneira similar ao E_m .
- f_w = Tensão de ruptura à flexão. Obtida numa peça biapoiada, com duas cargas aplicadas simetricamente.
- f_m = Tensão admissível à flexão.
- I = Momento de inércia em relação ao centro de gravidade das peças.
- L = Vão livre.
- L_1 = Distância entre os dois pontos de aplicação de carga em relação ao qual se mede a flecha relativa.
- n = Número de ensaios realizados.
- P = Carga aplicada no ensaio, dentro do regime elástico.
- ΔP = Intervalo de carga aplicada no ensaio, dentro do regime elástico.
- P_r = Carga de ruptura à flexão. Obtida no ensaio de peça biapoiada, com duas cargas aplicadas simetricamente.
- R = Coeficiente de correlação.
- S = Erro padrão de estimativa na distribuição dos dados.
- $t_{.05}$ = "t" de Student, para o limite inferior da distribuição, ao nível de 5% de probabilidade.
- Δy_f = Intervalo da flecha à flexão.
- y_t = Flecha total.
- Δy_t = Intervalo da flecha total.
- z = Taxa de variação da deformação específica das fibras extremas, por unidade de tempo.

1. INTRODUÇÃO

Dentre as milhares de espécies existentes na Amazônia, somente um reduzido número é explorado comercialmente, gerando com isto uma exploração seletiva, predatória, com o conseqüente empobrecimento da floresta.

Nos últimos 10 anos, com o aperfeiçoamento técnico de entidades de pesquisa existentes no Brasil, nota-se a preocupação em caracterizar novas espécies, definir seu uso específico, procurando ampliar as opções do mercado interno e externo, tornando-se mais alternativo na utilização de espécies de madeiras tropicais brasileiras.

O que se propõe neste trabalho é desenvolver um processo de classificação mecânica de peças estruturais, para madeiras brasileiras, a ser aplicado de início para a exportação e, posteriormente, para o estabelecimento de um programa de promoção e divulgação para sua implantação no mercado interno, com as adaptações que se fizerem necessárias.

A aquisição, pelo Laboratório de Produtos Florestais – LPF, de uma máquina de classificação mecânica, de origem australiana, possibilitou a realização deste trabalho, cujo objetivo consiste em estabelecer classes de resistências para grupos de espécies de madeiras brasileiras, por meio de correlação entre o módulo de elasticidade real e a tensão de ruptura à flexão de peças estruturais de madeira.

2. EXPERIMENTAÇÃO

2.1. Espécies de madeira

Seis espécies foram coletadas na Floresta Nacional do Tapajós, estado do Pará, utilizando o sistema de amostragem ao acaso "direct random sampling", com adaptações necessárias impostas pelas peculiaridades próprias da região amazônica. Aproximadamente 35 peças de dimensões nominais de 5,08 x 10,16cm (2 x 4 pol.) por 3 metros de comprimento, retiradas de 20 árvores por espécie, foram ensaiadas no Laboratório de Produtos Florestais, a um teor de umidade de 12%. De cada árvore derrubada, coletou-se o material botânico necessário para confirmar a identificação junto ao Instituto de Pesquisa da Amazônia – INPA, Manaus, e Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, Belém.

Na determinação da linha de tensões admissíveis foram utilizadas três espécies retiradas da tese de doutorado de Ricardo M. Della Lucia, sob a orientação de John F. Senft, na Purdue University – USA. São 209 peças de 3,81 x 8,89cm (1,5 x 3,5pol.) e 3,81 x 13,97cm (1,5 x 5,5pol.) de seção transversal nominal, por 3m de comprimento de virola: *Virola* sp, tachi: *Tachigalia* prob. *paniculatum* e piquiá: *Caryocar villo-*

sum, selecionadas pela densidade, dentre uma lista de espécies tropicais brasileiras que são exportadas para os Estados Unidos. Amostras foram enviadas para o Forest Products Laboratory, Madison, Viscosin e para o Tropical Timber Information Center, State University of New York at Syracuse, para identificação.

Portanto, as classes de tensões resultantes deste trabalho foram obtidas das nove espécies listadas em seguida, tendo sido feitas correções necessárias para utilização conjunta dos dados, conforme verificaremos adiante.

ANDIROBA
Carapa guianensis Aubl.

COPAÍBA
Copaifera reticulata Ducke

MURURÉ
Brosimum acutifolium Huber
Subsp. *interjectum* C. C. Berg.

PAU-JACARÉ
Laetia procera (P. et E.) Eichl.

PEQUIÁ
Caryocar villosum

TACHI
Tachigalia prob. *paniculatum*

TACHI PRETO
Tachigalia myrmecophylla Ducke

TAUARI
Couratari guianensis Aubl.
Sin.: *Couratari pulchra* Sandw.

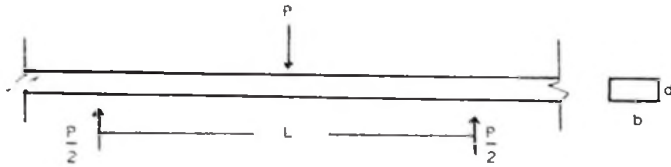
VIROLA
Virola sp.

2.2. Ensaio estruturais

As amostras das nove espécies foram climatizadas a um teor de umidade de equilíbrio de 12%. Antes do ensaio mediu-se a seção transversal de cada peça em três pontos distintos, tomando-se o valor médio para fins de cálculo dos parâmetros a serem determinados.

Os ensaios estruturais realizados pelo Laboratório de Produtos Florestais nas seis espécies foram feitos conforme a norma britânica BS 5820/79, sendo descritos a seguir:

Módulo de elasticidade obtido na máquina de classificação mecânica – E_m

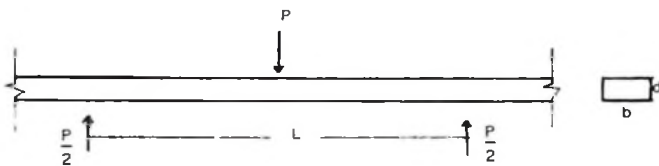


A máquina de classificação utilizada na determinação do módulo de elasticidade das peças estruturais é de origem australiana, fabricada pela Plessey Telecommunications, modelo computermatic MK PIVa, cujos controles normais são os seguintes:

- $L = 91,44\text{cm}$ (3 pés), distância entre os apoios
- $v = 60\text{m/min.}$, velocidade de classificação
- $P = 2617\text{N}$, carga aplicada pela classificadora e que se encontra seguramente dentro do regime elástico
- Tempo de espera para a aplicação de carga (Delay 1)
- Razão de aplicação de carga (Restrictor 3)

A máquina determina a flecha a cada 15,24cm (6pol.), correspondente a uma carga fixa aplicada, sendo a peça solicitada como tábua. A primeira leitura é feita a aproximadamente 71cm (28pol.) do início da peça. O lado de aplicação de carga foi escolhido aleatoriamente, tendo em vista existir na máquina um dispositivo que compensa o possível efeito desfavorável de empenos, fornecendo, portanto, valores estatisticamente iguais para os lados opostos da peça de madeira. Alguns ensaios foram realizados para a verificação deste efeito. Os resultados obtidos serão apresentados posteriormente. A máquina possui uma unidade de memória que, após ler todas as flechas a cada 15,24cm na peça, envia os sinais a um teletipo, onde os valores destas flechas são impressos na mesma seqüência de leitura.

Módulo de elasticidade simulado – E_s

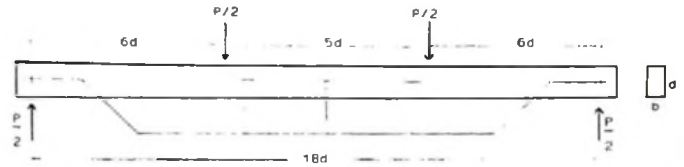


Foi obtido em ensaio numa máquina universal de ensaios INSTRON, de maneira similar ao módulo de elasticidade E_m , diferindo somente em relação ao aspecto dinâmico com que o E_m é determinado. A velocidade de ensaio foi de 8,23mm/min., com uma taxa de variação da deformação específica das fibras extremas, por unidade de tempo, de 0,003cm/cm.min.

Os ensaios foram feitos no ponto mais fraco, ponto central e ponto mais forte da peça, conforme indicação da máquina classificadora. Aplicou-se uma carga inicial de 245N (25kg) para acomodação da peça, aumentando-se com incrementos de

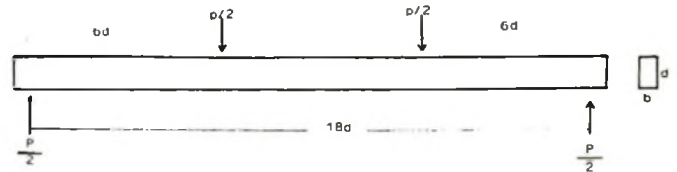
490N (50kg), fazendo-se a leitura da flecha correspondente por um relógio comparador com precisão de 0,01mm, até atingir a carga de 2862N (292kg). Traçou-se o gráfico carga x flecha, para cada um dos três pontos da peça, determinando, assim, o módulo de elasticidade E_s .

Módulo de elasticidade real – E



O módulo de elasticidade real, determinado à flexão pura, foi obtido utilizando-se uma máquina universal de ensaios INSTRON. A leitura da flecha foi feita por meio de relógios comparadores, com precisão de 0,01mm, em relação aos pontos de aplicação de carga. A velocidade de aplicação de carga foi de 18,3mm/min., a uma taxa de 0,003cm/cm.min. Aplicou-se uma carga inicial de 245N (25kg), para ajuste do conjunto e, em seguida, para cada incremento de carga, leu-se a flecha correspondente até atingir a carga de 2862N (292kg).

Tensão de ruptura à flexão – f_w



A continuação do ensaio de determinação do módulo de elasticidade real, até à ruptura, forneceu a tensão de ruptura à flexão. A zona de ruptura das peças ensaiadas foi fotografada para posterior análise e documentação.

2.3. Densidade aparente e conteúdo de umidade

Determinaram-se em todas as peças o conteúdo de umidade (%) e a densidade aparente (peso/volume, a uma determinada umidade, retirando-se corpos-de-prova de seção transversal igual à das peças, com 5cm de comprimento e próximo à zona de ruptura à flexão. Os pesos dos corpos-de-prova foram obtidos numa balança SAUTER, de sensibilidade 0,01g e os volumes por medidas diretas com paquímetro de precisão 0,05mm.

2.4. Pequenos corpos-de-prova isentos de defeitos

Após a ruptura à flexão das peças estruturais, foram retirados corpos-de-prova isentos de defeitos para ensaios de flexão estática, feitos de acordo com as normas COPANT/72, determinando seu módulo de elasticidade e tensão de ruptura à flexão. O corpo-de-prova possui seção transversal de 5,08 x 5,08cm (2 x 2pol.) e vão livre de 71,0cm (14d), cujo esquema estático é de viga biapoiada com carga central. A velocidade

de ensaio foi de 2,54mm/min, sendo registrado automaticamente o gráfico de carga e flecha, onde o deflectômetro elétrico utilizado possui uma ampliação de escala de 5,2 vezes. Após a ruptura, retirou-se também um pequeno bloco, tão próximo quanto possível ao ponto de ruptura, para a determinação do teor de umidade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 mostra os resultados dos ensaios de flexão estática e densidade básica (peso seco/volume verde) obtido em pequenos corpos-de-prova isentos de defeitos, retirados das peças estruturais, após ruptura por flexão.

Comparando a Tabela 1, com a Tabela 2, que mostra o sumário dos resultados de todos os ensaios em peças estruturais, verificamos que o módulo de elasticidade dos pequenos corpos-de-prova sem defeitos é sempre menor do que os módulos de elasticidade das peças estruturais e que em relação à tensão de ruptura verifica-se o contrário. Outra ocorrência interessante foi em relação ao coeficiente de variação, o qual não é sempre maior para as peças estruturais, como era de se esperar. Em vista disso e considerando o aspecto aleatório da coleta, podemos afirmar existir uma grande homogeneidade na madeira destas seis espécies de folhosas.

Para verificar a eficiência da máquina classificadora, todas as peças estruturais foram nela ensaiadas e, nos pontos de flecha mínima, central e máxima, repetiram-se os ensaios de maneira similar numa máquina universal de ensaios. A Tabela 3 mostra a comparação dentre o módulo de elasticidade obtido na máquina classificadora, E_m , e o módulo de elasticidade simulado, E_s , pela análise estatística do "erro da diferença equilibrado", a um nível de 5% de exclusão. Para os módulos de elasticidade obtidos nos pontos de flecha máxima e ponto central, a diferença entre as médias não é significativa para a maioria das espécies. Em relação ao ponto de flecha mínima, há diferença significativa entre as médias para as seis espécies, porém este último resultado é de pouca importância em termos estruturais, em face da segurança de uma estrutura estar relacionada com a menor capacidade de uma peça resistir aos esforços atuantes. Para o ponto de módulo de elasticidade mínimo, o E_m apresenta uma média ligeiramente inferior, portanto a favor da segurança e, no ponto de módulo de elasticidade máximo, ocorre o contrário. Em relação ao ponto central, as médias não apresentam tendências definidas. Este comportamento pode ser atribuído, provavelmente, ao aspecto dinâmico que envolve a determinação do módulo de elasticidade e também à otimização dos comandos da máquina classificadora, uma vez que pode-se verificar a existência de uma grande homogeneidade de resistência ao longo das peças, por meio do módulo de elasticidade simulado mínimo, central e máximo.

As equações de regressão lineares e o coeficiente de correlação entre os módulos de elasticidade, obtidos na máquina classificadora, e o módulo de elasticidade simulado, encontram-se na Tabela 4. São bastante significativos os coeficientes de correlação para os três pontos de comparação dos módulos de elasticidade.

Foram ensaiadas cerca de 30 peças estruturais na máquina classificadora, de ambos os lados da peça. Uma análise estatística mostrou não existir diferença significativa, ao nível de

5% de exclusão, entre as médias dos módulos de elasticidade obtidos nos lados opostos correspondentes.

A Tabela 5 mostra que, apesar do módulo de elasticidade obtido na classificadora e o módulo de elasticidade simulado terem sido determinados na direção ortogonal à determinação do módulo de elasticidade real, os coeficientes de correlação são muito altos para todas as espécies. Agrupando as seis espécies, verificamos que a estimativa do módulo de elasticidade real pela máquina classificadora melhora sensivelmente.

O coeficiente de correlação entre a tensão de ruptura à flexão e o módulo de elasticidade real foi bastante baixo, tanto para as espécies individuais, quanto para o grupo de seis espécies. Parece razoável afirmar que a proximidade da densidade das espécies e a grande homogeneidade do material sejam responsáveis pela fraca correlação de cada espécie e do grupo de espécies.

O maior coeficientes de correlação entre a densidade aparente (D_{ap} , g/cm³) e a tensão de ruptura à flexão (f_w , N/cm²) ocorre para a espécie tauari, por meio da equação de regressão linear simples:

$$f_w = 14880 D_{ap} - 957$$

$$R = 0,54$$

Agrupando as seis espécies teremos:

$$f_w = 9050 D_{ap} + 2167$$

$$R = 0,40$$

Na regressão linear múltipla, acrescentando o módulo de elasticidade real como variável independente, o coeficiente de correlação foi também bastante baixo, mostrando não haver muita relação entre a densidade e a tensão de ruptura à flexão obtida em peças estruturais.

3.1. Agrupamento de espécies

O agrupamento de madeiras por resistência é fundamental para o aproveitamento racional dos recursos florestais e para a utilização da madeira de modo competitivo com outros materiais estruturais, considerando a existência de uma grande variedade de espécies de madeira com potencial de utilização. Em vista da fraca correlação encontrada entre o módulo de elasticidade real e a tensão de ruptura à flexão para estas seis espécies, o autor utilizou os resultados obtidos em peças estruturais de três espécies brasileiras (virola: *Virola* sp, tachi: *Tachigalia* prob. *paniculatum* e pequiá: *Caryocar villosum*), cujos ensaios foram realizados pelo Dr. Ricardo M. Della Lucia, em tese de doutorado junto à Purdue University, USA, conforme as normas americanas. As diferenças nos ensaios ocorreram em relação à velocidade de carregamento (5,08mm/min. para 2 x 4pol. e 6,35mm/min. para 2 x 6pol.), relação L/d = 64 e lado de aplicação de carga (como tábuas). Objetivando verificar a influência destas diferenças de metodologia de ensaios na determinação do módulo de elasticidade real, foram ensaiadas 41 vigas de tachi preto, conforme os dois métodos. Não houve diferença significativa a nível de 5% de exclusão entre as médias, pelo teste estatístico "erro da diferença equilibrado", fornecendo um valor de "t" de student de 0,15.

Devido a esta grande similaridade entre os dois módulos de elasticidade obtidos pelos dois métodos, os resultados dos ensaios das três espécies foram agrupados com as outras

seis espécies. Em relação aos ensaios de ruptura à flexão, houve diferença somente na velocidade de carregamento (5,08cm/min. para 2 x 4pol. e 6,35mm/min. para 2 x 6pol.), tendo sido desprezada para efeito de agrupamento das espécies. Não houve diferença significativa ao nível de 5% de exclusão entre as médias do módulo de elasticidade e a tensão de ruptura das peças 2 x 4 pol. e 2 x 6pol.

Procurou-se agrupar as espécies em função da curva da equação de regressão linear de cada espécie de modo a maximizar o coeficiente de correlação em grupos.

Para as nove espécies, temos a equação de regressão linear entre o módulo de elasticidade real (E , $\times 10^3$ Ncm²) e a tensão de ruptura à flexão (f_w , N/cm²),

$$f_w = 4,59E - 24,10$$

$$R = 0,75$$

O coeficiente de correlação é maximizado, retirando do grupo das espécies tauari e pau-jacaré resultando na equação para as sete espécies.

$$f_w = 6,00E - 2234,23$$

$$R = 0,81$$

O ajuste desta equação para a forma de potencia mostrou ser ligeiramente mais eficiente na análise de resíduos. Porém, devido à facilidades oriundas da equação na forma linear, definiram-se as classes de resistência a partir desta equação.

A Figura 1 mostra a reta de equação de regressão linear para as sete espécies. As espécies tauari e pau-jacaré poderão ser posteriormente utilizadas na formação de novos grupos de resistência.

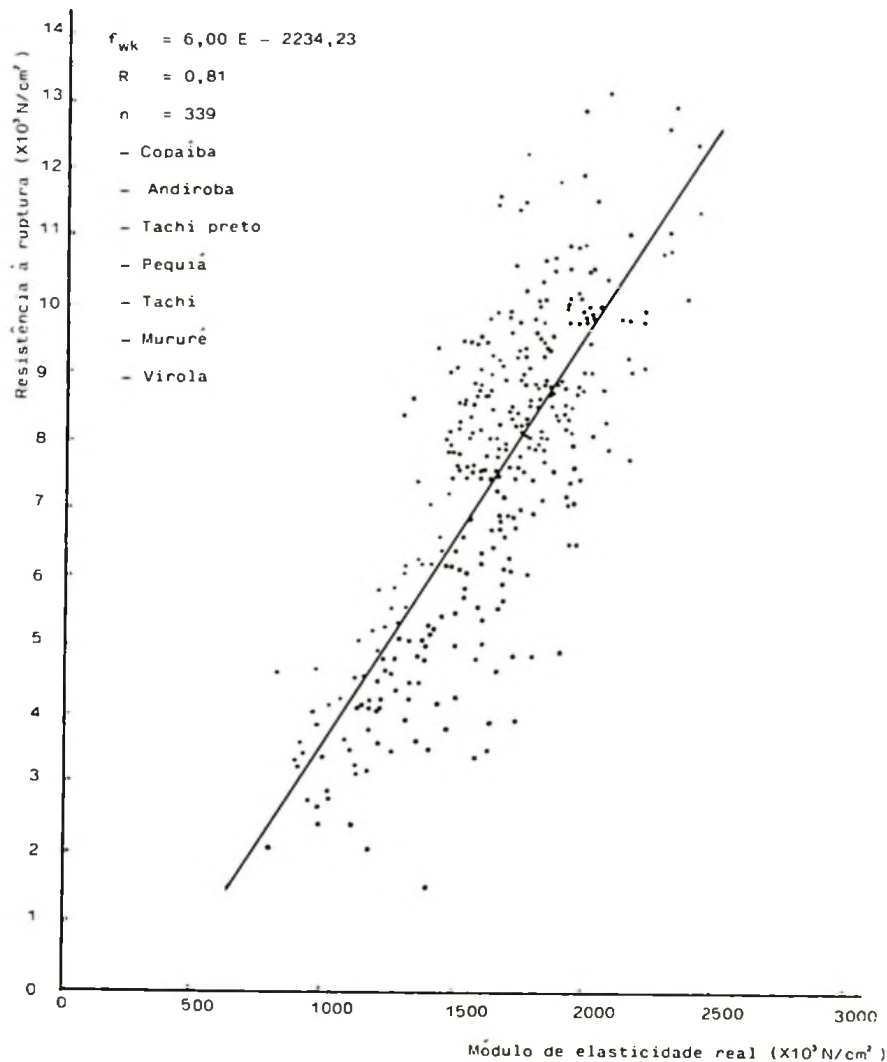


Figura 1 – Gráfico da resistência à ruptura e módulo de elasticidade real à flexão, na forma linear simples, para sete espécies agrupadas.

3.2. Determinação da curva de tensões admissíveis

A seguir será desenvolvido um sistema de estabelecimento de classes de tensão, com base na relação entre o módulo de elasticidade real e a tensão de ruptura à flexão, para as sete espécies agrupadas. É importante salientar que este sistema visa fornecer um modelo em termos de definição de classes de tensão, devido à pequena representatividade do número de espécies utilizadas e também à falta de dados práticos para auxiliar na escolha do número de classes que satisfaçam às necessidades do mercado consumidor brasileiro de madeiras tropicais. Mais ensaios em peças estruturais estão sendo realizados, visando aperfeiçoar a classificação proposta neste trabalho.

A variabilidade natural das propriedades da madeira foi considerada, traçando-se a reta correspondente ao limite inferior de exclusão de 5% da distribuição dos dados. Esta reta é de forma parabólica. À medida porém, que se aumenta o número de amostras, ela se aproxima de uma reta. Uma das maneiras de calcular esta aproximação linear para um limite inferior de exclusão é subtrair da equação de regressão o produto estatístico.

$$t \cdot \bar{s} \sqrt{1 + \frac{1}{n}}$$

onde

n = número de peças ensaiadas

\bar{s} = erro padrão de estimativa da tensão de ruptura

t = valor apropriado de "t" de student

Para as sete espécies agrupadas, adotando um limite inferior de exclusão de 5%, tem-se:

$$n = 339$$

$$\bar{s} = 1424,09 \text{ N/cm}^2$$

$$t_{0,05} = 1.645$$

resultando na equação,

$$f_w = 6.00E - 4580,08,$$

onde

f_w = tensão de ruptura à flexão, em N/cm^2

E = Módulo de elasticidade real, em 10^3 N/cm^2

O próximo passo consiste em aplicar um coeficiente de redução nesta última equação, traçando-se assim a reta de tensões admissíveis. Este coeficiente é composto do efeito de longa duração de carga, cujo valor é 9/16, podendo ser acrescido de 10% para carga prevista por mais de 10 anos e do fator de segurança de aproximadamente 10/13, resultando num coeficiente de 1/2,1. Como este coeficiente de redução foi determinado a partir de ensaios em coníferas, um valor mais restrito é recomendado para ser empregado nas folhosas, sendo de 1/2,3.

Logo, a equação de regressão linear correspondente à linha de tensões admissíveis (f_w) se torna,

$$f_w = 2,61E - 1991,34$$

A Figura 2 mostra a reta de tensões admissíveis para as sete espécies de folhosas.

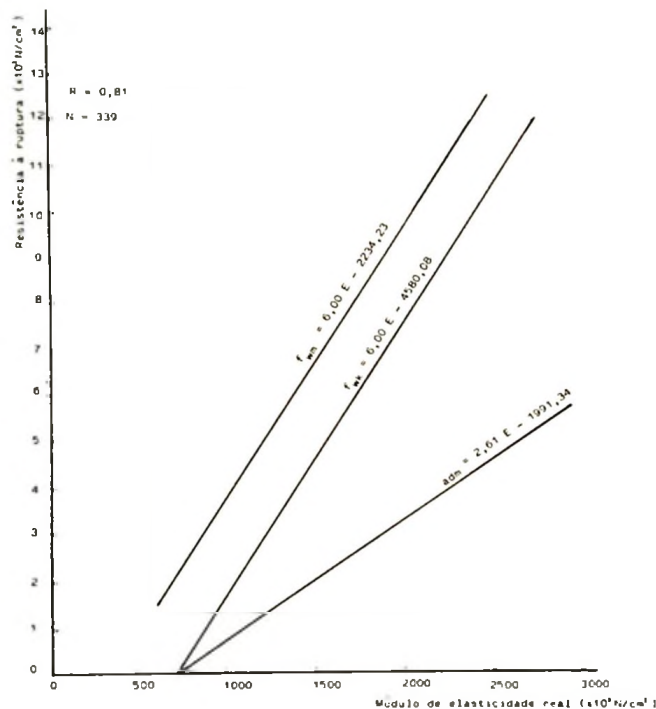


Figura 2 – A determinação da linha de tensões admissíveis foi feita pela equação de regressão linear simples entre a resistência à ruptura (f_w) e o módulo de elasticidade real (E), para as sete espécies agrupadas.

3.3. Definição das classes de tensões admissíveis

O número de classes de tensões e o intervalo entre duas classes consecutivas serão agora propostos com base em revisão bibliográfica, devido à falta de dados práticos e à pouca utilização da madeira como material estrutural no mercado brasileiro.

A aplicação das séries de Renard ou "preferred numbers" na especificação das classes de tensão para a madeira foi recomendada, em 1951, pela Food and Agriculture Organization (FAO), das Nações Unidas. Cooper, em 1952, propôs a adoção de tais séries universalmente, diante das facilidades decorrentes no comércio exterior de peças estruturais e, particularmente, para os arquitetos e engenheiros de cálculo estrutural.

A série R10 foi escolhida por apresentar um número de classes de tensão razoável, isto é, não muito pequeno, o que seria antieconômico, nem muito grande, o que traria problemas de ordem prática devido ao pequeno intervalo das classes, em consequência da variabilidade natural nas propriedades da madeira.

As classes de tensões seguintes são provenientes da série R10, multiplicadas por 1.000 no sistema internacional de medidas: 630, 800, 1.000, 1.250, 1.600, 2.000, 2.500 e 3.150.

Para simplificar, as classes são especificadas pelas letras H, G, F, E, D, C, B e A, respectivamente. Pelo gráfico de Figura 2, determinamos os intervalos de módulos de elasticidade correspondentes às classes de tensões adotadas. Assim:

Classes	Tensão admissível (N/cm ²)	Módulo de elasticidade (x10 ³ N/cm ²)
A	3.150	1840
B	2.500	1.615 – 1.840
C	2.000	1.445 – 1.615
D	1.600	1.300 – 1.445
E	1.250	1.180 – 1.300
F	1.000	1.090 – 1.180
G	800	1.025 – 1.090
H	630	950 – 1.025

4. CONCLUSÕES

A análise dos dados obtidos nos ensaios realizados com as nove espécies de madeiras da Amazônia resultou nas seguintes conclusões:

- os valores dos módulos de elasticidade à flexão foram sempre menores nos pequenos corpos-de-prova sem defeitos, e as tensões de ruptura sempre menores nas peças estruturais;

- o coeficiente de variação do módulo de elasticidade e da tensão de ruptura à flexão para os pequenos corpos-de-prova sem defeitos e peças estruturais não apresentaram muita diferença quando comparados, o que mostra a homogeneidade das espécies estudadas;
- o teste estatístico "erro da diferença equilibrado", feito entre as médias dos módulos de elasticidade obtidos na classificação mecânica de tensões e o simulado, em relação ao ponto de flecha máxima, apresentou diferença significativa ao nível de 5% de exclusão para duas espécies somente. Em relação ao ponto central das peças estruturais, a diferença foi significativa somente para uma espécie. Estas diferenças entre as médias podem ser eliminadas, possivelmente, mediante a realização de um maior número de ensaios e da otimização dos controles da máquina classificadora para as espécies de folhosas. O coeficiente de correlação entre os módulos de elasticidade obtidos na máquina classificadora e no simulado foi bastante alto para cada uma das seis espécies ensaiadas;
- a alta correlação encontrada entre o módulo de elasticidade, obtido na máquina classificadora (peça solicitada como tábuas), o módulo de elasticidade real (peça solicitada como a viga) permite utilizar a máquina de classificação na determinação das classes de tensões definidas pela relação entre a resistência à ruptura e o módulo de elasticidade real à flexão;
- o coeficiente de correlação entre a densidade aparente e a resistência à ruptura à flexão das peças estruturais foi bastante baixo para as seis espécies ensaiadas;
- o coeficiente de correlação entre a resistência à ruptura à flexão e o módulo de elasticidade real variou, por espécie, de 0,39 a 0,76, mostrando a ineficiência da classificação mecânica por espécie individual;
- a classificação mecânica por grupos de espécies de madeiras latifoliadas mostrou ser mais eficiente com o coeficiente de correlação de 0,81 para as sete espécies agrupadas;
- o agrupamento através das retas de regressão lineares entre a resistência à ruptura e o módulo de elasticidade real à flexão de cada espécie possibilitou otimizar o coeficiente de correlação em 0,81, para um grupo de sete espécies;
- os intervalos de módulos de elasticidade correspondente às classes de tensão definidas pelos "preferred numbers" serão alterados à medida que novas espécies forem incluídas no grupo;
- as classes de tensão tornar-se-ão mais bem definidas, com o aumento do número e espécies estudadas;
- não houve diferença significativa entre módulos de elasticidade dos lados opostos de 30 peças estruturais, obtidos na máquina classificadora.

Tabela 1 – Sumário dos ensaios em pequenas amostras isentas de defeitos.¹

Espécie	Número de Corpos-de Prova	Densidade Básica (g/cm ³)	Parâmetro Estatístico	Flexão Estatística ²	
				Módulo de elasticidade x10 ³ N/cm ²	Resistência à ruptura N/cm ²
Andiroba	39	0,58	Média	1254	11740
			Desvio padrão	137	2048
			Coef. de variação	10,9	17,4
Copaiba	13	0,60	Média	1176	11868
			Desvio padrão	118	2323
			Coef. de variação	10,0	19,6
Mururé	25	0,50	Média	1098	8775
			Desvio padrão	147	2176
			Coef. de variação	13,4	24,8
Pau-Jacaré	36	0,66	Média	1548	12103
			Desvio padrão	186	2381
			Coef. de variação	12,0	19,7
Tachi Preto	22	0,60	Média	1264	10868
			Desvio padrão	157	2430
			Coef. de variação	12,4	22,4
Tauari	41	0,52	Média	1127	9869
			Desvio padrão	118	1343
			Coef. de variação	10,4	13,6

¹ Testes feitos conforme normas COPANT-30.
² Valores corrigidos para 12% de conteúdo de umidade.

Tabela 2 – Sumário dos ensaios à flexão em peças estruturais.

Tabela 2 – Sumário dos ensaios à flexão em peças estruturais.

Espécie	Número de Peças	Densidade Aparente Média (g/cm ³)	Parâmetro Estatístico	Módulo de Elasticidade (x10 ³ N/cm ²)						E Real	Resistência à Ruptura (N/cm ²)
				Máquina (E _{Maq})			Simulado (E _{Sim})				
				Mín.	Central	Máx.	Mín.	Central	Máx.		
Andiroba	38	0,71	Média	1418	1540	1799	1549	1577	1599	1749	8883
			D. Padrão	213	184	246	175	141	144	203	2151
			Coef. variação	15,0	11,9	13,7	11,3	8,9	9,0	11,8	24,2
			Média	1509	1625	1862	1501	1609	1623	1775	9508
Copaiba	34	0,74	D. Padrão	221	254	304	209	190	198	241	1956
			Coef. variação	14,8	15,7	16,3	13,1	11,8	12,2	13,8	20,6
			Média	1278	1337	1533	1371	1388	1403	1556	6645
			D. Padrão	169	182	261	182	162	157	211	1800
Mururé	25	0,63	Coef. variação	13,2	13,6	16,4	13,3	11,7	11,2	13,5	27,1
			Média	1430	1573	1778	1487	1480	1504	1681	8098
			D. Padrão	199	213	281	207	201	191	177	1752
			Coef. variação	13,6	20,0	15,9	14,3	13,5	12,7	10,5	21,7
Pau-Jacaré	36	0,83	Média	1850	2142	2363	1912	1934	1948	2365	9408
			D. Padrão	311	292	390	348	290	257	377	2065
			Coef. variação	16,8	13,8	16,3	18,2	15,0	13,2	16,0	22,0
			Média	1430	1573	1778	1487	1480	1504	1681	8098
Tachi Preto	33	0,71	D. Padrão	199	213	281	207	201	191	177	1752
			Coef. variação	13,6	20,0	15,9	14,3	13,5	12,7	10,5	21,7
			Média	1241	1356	1517	1348	1363	1371	1567	8192
			D. Padrão	175	180	222	164	161	158	216	1103
Tauari	41	0,61	Coef. variação	14,1	13,2	14,7	12,2	11,8	11,5	13,9	13,5

Observação: Valores corrigidos para 12% de conteúdo de umidade.

Tabela 3 – Comparação entre os módulos de elasticidade da máquina (E_{Maq}) e simulado (E_{Sim}).

Variável	Andiroba	Copaiba	Mururé	Pau-jacaré	Tachi	Tauari
	Média (x10 ³ N/cm ²)	Média (x10 ³ N/cm ²)	Média (x10 ³ N/cm ²)	Média (x10 ³ N/cm ²)	Média (x10 ³ N/cm ²)	Média (x10 ³ N/cm ²)
E _{Maq} (mín.)	1418	1509	1276	1850	1430	1241
E _{Sim} (mín.)	1549	1591	1371	1912	1467	1348
E _{Maq} (central)	1540	1625	1337	2142	1573	1356
E _{Sim} (central)	1577	1609	1386	1934	1486	1363
E _{Maq} (máx.)	1799	1862	1593	2389	1776	1517
E _{Sim} (máx.)	1599	1623	1403	1948	1504	1371

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

Tabela 4 – Equações de regressão linear e coeficiente de correlação dos módulos de elasticidade da máquina (E_{Maq}) e o simulado (E_{Sim}).

Espécie	Número de Peças	Módulo de Elasticidade (x10 ³ N/cm ²)	Equação Regressão Linear	Coefficiente de Correlação
Andiroba	38	Mínimo	E _{Sim} = 0,64 E _{Maq} + 645	0,78
		Central	E _{Sim} = 0,55 E _{Maq} + 723	0,72
		Máximo	E _{Sim} = 0,48 E _{Maq} + 738	0,82
Copaiba	33	Mínimo	E _{Sim} = 0,79 E _{Maq} + 406	0,83
		Central	E _{Sim} = 0,58 E _{Maq} + 664	0,78
		Máximo	E _{Sim} = 0,51 E _{Maq} + 673	0,79
Mururé	25	Mínimo	E _{Sim} = 0,85 E _{Maq} + 289	0,79
		Central	E _{Sim} = 0,68 E _{Maq} + 478	0,76
		Máximo	E _{Sim} = 0,35 E _{Maq} + 848	0,58
Pau-jacaré	36	Mínimo	E _{Sim} = 0,91 E _{Maq} + 219	0,82
		Central	E _{Sim} = 0,85 E _{Maq} + 115	0,85
		Máximo	E _{Sim} = 0,45 E _{Maq} + 867	0,69
Tachi preto	34	Mínimo	E _{Sim} = 0,78 E _{Maq} + 346	0,75
		Central	E _{Sim} = 0,54 E _{Maq} + 642	0,84
		Máximo	E _{Sim} = 0,51 E _{Maq} + 600	0,75
Tauari	41	Mínimo	E _{Sim} = 0,87 E _{Maq} + 263	0,93
		Central	E _{Sim} = 0,81 E _{Maq} + 258	0,91
		Máximo	E _{Sim} = 0,63 E _{Maq} + 413	0,89

Observação: Os dados foram corrigidos para 12% de conteúdo de umidade.

Tabela 5 – Equações de regressão linear entre o módulo de elasticidade real (E) com os módulos de elasticidade mínimo e central da máquina classificadora (E_{Maq}) e simulado central (E_{Sim}).

Espécie	Número de Peças	Módulo de Elasticidade ($\times 10^3 \text{N/cm}^2$)	Equação de Regressão Linear	Coefficiente de Correlação
Andiroba	38	Mínimo	$E = 0,79 E_{Maq} + 628$	0,83
		Central	$E = 0,81 E_{Maq} + 502$	0,73
			$E = 1,15 E_{Sim} - 62$	0,80
Copaíba	34	Mínimo	$E = 0,96 E_{Maq} + 323$	0,87
		Central	$E = 0,81 E_{Maq} + 466$	0,85
			$E = 1,14 E_{Sim} - 56$	0,88
Mururé	25	Mínimo	$E = 0,87 E_{Maq} + 443$	0,70
		Central	$E = 0,83 E_{Maq} + 450$	0,71
			$E = 1,14 E_{Sim} - 24$	0,88
Pau-jacaré	36	Mínimo	$E = 0,97 E_{Maq} + 562$	0,80
		Central	$E = 1,08 E_{Maq} + 55$	0,83
			$E = 1,10 E_{Sim} + 236$	0,85
Tachi preto	33	Mínimo	$E = 0,72 E_{Maq} + 647$	0,75
		Central	$E = 0,58 E_{Maq} + 782$	0,76
			$E = 0,85 E_{Sim} + 416$	0,77
Tauari	41	Mínimo	$E = 1,15 E_{Maq} + 131$	0,93
		Central	$E = 1,05 E_{Maq} + 132$	0,87
			$E = 1,29 E_{Sim} - 202$	0,96
Grupo das 6 espécies	207	Mínimo	$E = 1,14 E_{Maq} + 150$	0,90
		Central	$E = 1,27 E_{Sim} - 186$	0,92

Observação: Os dados foram corrigidos para 12% de conteúdo de umidade.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 – ANTON, A. *Mechanical stress grading of timber and derivation of basic working stresses*. Sydney, Australia, Forestry Commission of New South Wales, 1977. 16p.
- 2 – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Cálculo e execução de estruturas de madeira – NBR 7190/82*. Rio de Janeiro, Brasil, ABNT, 1951.
- 3 – BOHANNAN, B. *Effect of size on bending strength of wood members*. Madison, Wis, Forest Products Laboratory, 1966. 30p. (Research paper FPL, 56).

- 4 – BOOTH, L.G. *The application of preferred numbers to the determination of basic stresses, grades and sizes of structural timber*. London, UK, Imperial College, 1967. 16p.
- 5 – BOOTH, L.G. & REECE, P.O. *The structural use of timber*. London, UK, E. & F.N. Spon, 1967. 285p.
- 6 – BRITISH STANDARDS INSTITUTION. *Methods of test for determination of certain physical and mechanical properties of timber in structural size*. BS 5820. London, UK, BSI, 1979.
- 7 – COMISSIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. *Maderas: Método de determinación de flexión estática*. COPANT 30:1-006. COPANT, 1972. 4 p.
- 8 – COOPER, K.L. *Preferred stress grades for structural timber*. Melbourne, Australia, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, 1952. 7p.
- 9 – COURSES on stress grading of timber. London, UK, Princes Risborough Laboratory, s. d. 17p.
- 10 – CURRY, W.T. *Mechanical stress grading of timber*. Princes Risborough, UK Forest Products Research Laboratory, 1969. 11p. (Timberlab paper, 18).
- 11 – CURRY, W.T. & TORY, J.R. *The relation between the modulus of rupture (ultimate bending stress) and modulus of elasticity of timber*. London, UK, Princes Risborough Laboratory, 1976. 19p.
- 12 – DELLA LUCIA, R.M. *Strength grading of construction lumber for Brazil*. Lafayette, Indiana, Purdue University, 1975. 152p. (Dissertation Ph.D.)
- 13 – FEWELL, A.R. *Relations between the moduli of elasticity of structural timber in bending*. London, UK, Princes Risborough Laboratory, 1980. 13p.
- 14 – FREITAS, A.R. *Probabilistic approach in the design of wood structures in Brazil based on the variability of 24 species*. Blacksburg, Virginia, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1978. 79p. (Dissertation Ph.D.)
- 15 – HILBRAND, H.C. & MILLER, D.G. *Machine grading theory and practice*. *Forest Products Journal*, 16 (11): 28-40, Nov. 1966.
- 16 – HUDDLESTON, E.B. & ANTON, A. *The grading of timber into stress grades by mechanical means*. *Journal of the Institute of Engineers*, 39 (6): 1967.
- 17 – KLOOT, H. *The strenght group and stress grade systems*. Melbourne, Australia, Forest Products Newsletter, 1973. 6p. (Newlwtter, 394).
- 18 – LISBOA, C.D.J. *Stress grading machine project*. London, UK, Princes Risborough Laboratory, 1979. 26p. (Mimeografado)
- 19 – MÜLLER, P.H. *Machine stress-grading of scaffold boards*. Pretoria, South Africa, Council for Scientific and Industrial Research, 1969. 58 p. (Report, 287).
- 20 – PEARSON, R.G. *The establishment of working stress for groups of species*. Melbourne. Australia, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, 1965. 40p. (Paper, 35).
- 21 – PLESSEY TELECOMMUNICATIONS. *"Computermatic MK P IVa" timber stress grading machine*. New South Wales, Australia, 1973. (Handbook, 28M).

- 22 – SENFT, J.F.; SUDDARTH, S.K; ANGLETON, H.D. *A new approach to stress grading of lumber*. L layette, Indiana, Purdue University, 1962. 4p. (Journal paper, 1822).
- 23 – SUNLEY, J.G. *Review of non-destructive testing of timber*. Princes Risborough, UK, Forest Products Research Laboratory, 1969. 8p. (Timberlab papers, 19).
- 24 – TORY, J.R. The regression of modulus of rupture on modulus of elasticity. In: ANGLO-SCANDINAVIAN CONFERENCE ON STRESS GRADING. Princes Risborough, 1972. 5p. (Paper, 10).



Composto e impresso por
Bíblios Gráfica e Editora Ltda.
Fone: 226-4449 - Brasília-DF

LABORATÓRIO DE PRODUTOS FLORESTAIS – IBAMA

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

Fones: (061)224-4789/224-5337/223-5664

Telex: (061)2120/1711 – Fax: 224-5206

Caixa Postal 152824 – CEP 70919

Brasília-DF