

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA FLEXÃO
ESTÁTICA EM PEÇAS DE MADEIRA**

NILSON TADEU MASCIA

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Estruturas.

COMISSÃO EXAMINADORA

PROF. DR. JOÃO CESAR HELLMEISTER - ORIENTADOR (EESC - USP)
PROF. DR. PÉRICLES BRASILIENSE FUSCO (EPUSP)
PROF. DR. FRANCISCO ANTONIO ROCCO LAHR (EESC - USP)

DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

SÃO CARLOS, JULHO DE 1985

"Ele reserva a verdadeira sabedoria
para os retos; como escudo para os
que caminham na sinceridade".

(Provērbios 2-7)

Aos meus pais Antonio e Maria Alice
A minha esposa M̄rcia
e a minha irm̄ Clotilde

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. João Cesar Hellmeister, pelo incentivo ao estudo das propriedades da madeira.

Ao Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr, pela amizade e colaboração no decorrer deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Carlito Calil Junior, pelas sugestões na parte experimental do trabalho.

Ao Prof. Francisco Antonio Romero Gesualdo, pelas sugestões na análise estatística dos resultados.

Ao Eng^o Milton Luiz Siqueira e a bibliotecária Neide Goi, pelo auxílio na pesquisa bibliográfica.

Aos funcionários: Aparecido Galindo, Arnaldo Souza, Jaime Galindo, José Nascimento Filho, Nanci Luchesi, Roberto Galindo, Sílvio Ferro, Tânia Maria Ferreira e em especial à Regina Ferreira, pela cooperação neste trabalho.

Ao bolsista Ramón Maltez, pela ajuda nos ensaios de laboratório.

À FAPESP e ao CNPq, pelo apoio financeiro.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise da metodologia de ensaio de peças de madeira submetidas à flexão estática, com o intuito de alcançar propostas para revisão das normas brasileiras.

Foram ensaiados pequenos corpos de prova $2 \times 2 \times 30 \text{ cm}^3$ e $5 \times 5 \times 120 \text{ cm}^3$ e peças de dimensões estruturais $6 \times 16 \times 360 \text{ cm}^3$, com o objetivo de comparar os resultados experimentais.

As espécies utilizadas foram: Peroba Rosa (*Aspidosperma polyneuron*), Eucalipto Tereticornis (*Eucalyptus tereticornis*), Jatobá (*Hymenaea stilbocarpa*), Peroba do Norte (*Aspidosperma melanocalyx*) e Gonçalo Alves (*Astronium* spp).

O número de corpos de prova foi continuamente incrementado para assegurar uma análise estatística de resultados concordante com pequenas e grandes amostras.

Obtiveram-se os parâmetros: módulo de elasticidade longitudinal, módulo de elasticidade transversal e o módulo de ruptura. Estabeleceram-se relações entre estes parâmetros com vistas a um melhor entendimento da validade dos ensaios não destrutivos.

Foram realizadas experimental e estatisticamente: comparação entre ensaio com carga central e nos terços médios; estudo da influência da razão vão-altura das peças no módulo de elasticidade e no módulo de ruptura à flexão; estudo da influência das dimensões das peças nestes parâmetros e um estudo preliminar para adoção dos conceitos de: resistência característica, resistência de cálculo e módulo de elasticidade característico na flexão estática.

ABSTRACT

This work presents an analysis of the methodology for testing of wood in static bending in order to reach proposals for the Brazilian standards revision.

Small specimens $2 \times 2 \times 30 \text{ cm}^3$ and $5 \times 5 \times 120 \text{ cm}^3$ and specimens in structural size $6 \times 16 \times 360 \text{ cm}^3$ were tested for comparison between results in small and in structural sizes.

Peroba Rosa (*Aspidosperma polyneuron*), Eucalipto Tereticornis (*Eucalyptus tereticornis*), Jatobá (*Hymenaea stilbocarpa*), Peroba do Norte (*Aspidosperma melanocalyx*) and Gonçalo Alves (*Astronium* spp) were tested.

The number of tests was randomly increased to assure statistical analysis of results considering comparison between small and large samples.

The modulus of elasticity, modulus of rigidity and modulus of rupture in bending were obtained. Relations among these parameters were statistically established in order to afford a better understanding of the validity of non-destructive bending tests.

Comparison between central and two third-point loads; study of the influence of the relation span-ratio-depth of the specimens on the modulus of elasticity and the modulus of rupture; study of the influence of the specimens dimensions in these parameters and the previous study for adaption of the concepts of characteristic strength, design strength and characteristic modulus of elasticity for static bending were experimentally and statistically performed.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
2. Revisão da Literatura.....	3
3. Flexão Estática - Experimentação Realizada.....	67
4. Relações entre Parâmetros de Ruptura e de Elasticidade	98
5. Relações entre os Parâmetros de Elasticidade E e G...	154
6. Estudo Comparativo entre os Parâmetros de Elasticidade $E_{21,2f}$ e $E_{21,1f}$	192
7. Estudo da Influência de l/d e da Carga Concentrada no Módulo de Elasticidade Longitudinal da Madeira.....	200
8. Estudo da Influência da Razão l/d no Módulo de Ruptura à Flexão Estática.....	208
9. Ensaio de Flexão Estática em Peças de Dimensões Estru- turais.....	226
10. Distribuição de Frequência da Resistência à Flexão Es- tática da Madeira.....	248
11. Distribuição de Frequência do Módulo de Elasticidade Longitudinal à Flexão Estática da Madeira.....	259
12. Valores Característicos de Propriedades da Madeira à Flexão Estática.....	269
13. Valores de Cálculo para Resistência da Madeira à Fle- xão Estática.....	275
14. Introdução a Idéia de Aceitação ou Rejeição de um Lote de Madeira.....	280
15. Conclusões e Propostas.....	286
16. Referências Bibliográficas.....	289
17. Bibliografias.....	301

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento dos conceitos do projeto e das técnicas construtivas de estruturas de madeira tem sido gradativamente acelerado nos últimos anos no Brasil, particularmente com os trabalhos realizados no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM) da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Todavia sente-se a incompatibilidade entre as condições impostas para o cálculo dos elementos estruturais pela NBR 7190/82 - Norma Brasileira para o Cálculo e Execução de Estruturas de Madeira, e os conceitos atuais de engenharia de estruturas.

A preocupação com a revisão da NBR 7190/82 e da NBR 6230/80 - Método Brasileiro para Ensaio Físicos e Mecânicos de Madeiras, tendo em vista ajustá-las às condições atuais de cálculo e execução de estruturas, levou a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) a organizar a Comissão de Estudos nº 2:03.10 - Estruturas de Madeira, em 1981.

São Carlos-SP, destacou-se como sendo o lugar mais adequado para as reuniões desta Comissão. Diante deste fato, as atividades do LaMEM passaram a focalizar prioritariamente a revisão da NBR 7190/82, da NBR 6230/80 e a proposta de outros temas de normalização. Providência oportuna para que seja racionalizada a aplicação da madeira para finalidades estruturais, através de um conhecimento mais preciso de suas propriedades relacionadas com a elasticidade e a resistência.

É oportuno salientar o fato de o Método das Tensões Admissíveis, uma das bases da NBR 7190, já não se constituir em critérios satisfatórios para o cálculo de estruturas. Por este motivo outras normas para o cálculo estrutural já se baseiam no Método Semi-Probabilístico para a avaliação da segurança estrutural. De modo análogo, este fato deve ocorrer em relação as estruturas de madeira.

Considerando-se a mencionada revisão, o trabalho proposto "Contribuição ao Estudo da Flexão Estática em Peças de Madeiras" se enquadra numa das linhas de pesquisa em desenvolvimento no LaMEM e seus objetivos fundamentais são os seguintes:

- Aprofundar os conhecimentos teóricos e experimentais a respeito da flexão estática em peças de madeira, principalmente aqueles relacionados com a resistência e com a elasticidade do material;

- Determinar as correlações existentes entre os parâmetros de ruptura e de elasticidade com base em ampla experimentação, possibilitando fazer-se uma previsão segura e racional do módulo de ruptura à flexão do material a partir de resultados de ensaio destrutivos de número mínimo estatisticamente adequado de corpos de prova;

- Avaliar a influência do tamanho dos corpos de prova madeira nos parâmetros de ruptura e de elasticidade, obtidos no ensaio de flexão estática;

- Determinar a distribuição de frequência para os parâmetros de elasticidade e de resistência, com vistas à obtenção preliminar dos respectivos valores característicos e de cálculo;

- Estimar a influência da razão: vão livre/altura da peça (l/d), no valor do módulo de elasticidade longitudinal;

- Contribuir, a partir dos resultados da experimentação, para uma reavaliação dos métodos de ensaio e dos itens da norma atual para o cálculo e a execução de estruturas de madeira.

Este estudo se desenvolveu simultaneamente com outros do LAMEM relativos à flexão estática, sendo estes com ênfase na umidade e densidade da madeira, na velocidade de carregamento, na deformação lenta, para se chegar a uma definição ampla e profunda a respeito da flexão estática em peças de madeira.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Comportamento ortotrópico da madeira

Materiais fibrosos, de origem natural ou não, podem ser classificados fisicamente como anisotrópicos ortogonais, ou simplesmente, como ortotrópicos. O termo ortotrópico, quando usado para descrever sólidos, denota uma estrutura inteira caracterizada por três planos de simetria, perpendiculares entre si. A simetria de um material pode existir a nível macroscópico ou microscópico ou ambos. Em materiais fibrosos, a simetria ortogonal já está presente a nível macroscópico, como relatam JAYNE e SUDDARTH (1962).

Segundo HEARMON (1948), a teoria elástica da madeira se baseia na hipótese desta possuir comportamento ortotrópico. De acordo com este pesquisador, ao se analisar a estrutura do tronco de uma árvore, nota-se sua formação, através do crescimento de cascas cilíndricas concêntricas e sucessivas, compondo-se uma simetria cilíndrica na madeira. Esta simetria é refletida em muitas das propriedades físicas, elásticas e de resistência do material, como salienta ETHINGTON (1966).

Se uma pequena amostra é retirada do tronco, com um par de faces a uma mesma distância da medula e outro tangencial aos anéis de crescimento, como é apresentada na figura 1, tem-se em evidência os três eixos de simetria:

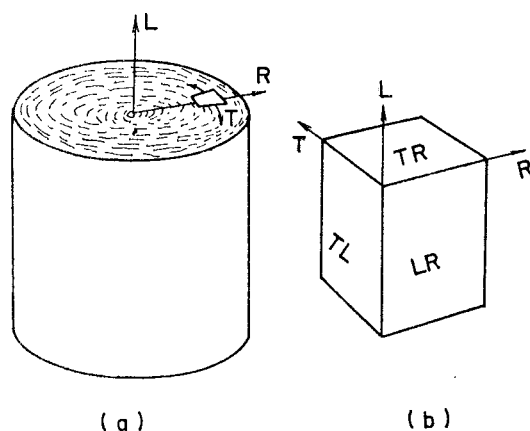


Fig. 1 - Eixos de Planos de Simetria na Madeira

Esses eixos são paralelos às direções longitudinal (L), radial (R) e tangencial (T) e são aproximadamente perpendiculares uns aos outros. Na realidade, a superfície TL (definida por uma linha paralela ao eixo da árvore e girando segundo os anéis de crescimento) não é plana, mas aproximadamente cilíndrica. As outras duas superfícies principais, a LR (definida pelos eixos longitudinal e radial), são praticamente planas, como nota-se na figura 1 (b).

Entretanto, a madeira é analisada num sistema de coordenadas retangulares. A superfície TL, correspondente à curvatura dos anéis de crescimento, pode ser assimilada a uma superfície plana. O resultado é a adaptação de um material ortotrópico com eixos geométricos (x_1, x_2, x_3) e ortotrópicos (L, R, T) coincidentes, como fizeram pesquisadores como Savart, 1829, V. Helmholtz, 1902 e Carrington, 1921, 1922, 1923 (apud KOLLMANN e CÔTÉ, 1968). A figura 2 ilustra a discussão.

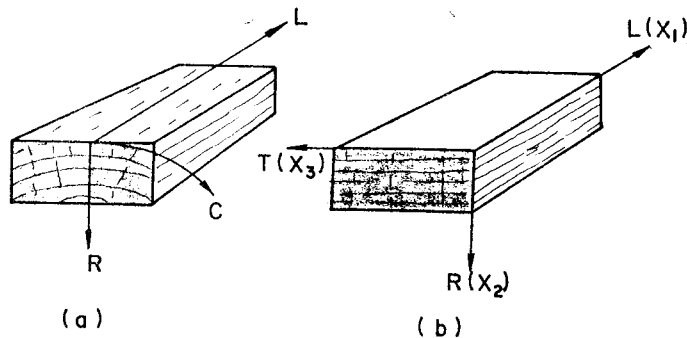


Fig. 2 - Sistemas de Coordenadas Cilíndricas e Retangulares

As medidas qualitativas de erros introduzidos pela hipótese da ortotropia da madeira no plano TR estão evidenciadas pela localização original das peças de madeira retiradas do tronco, como se evidencia na figura 3.

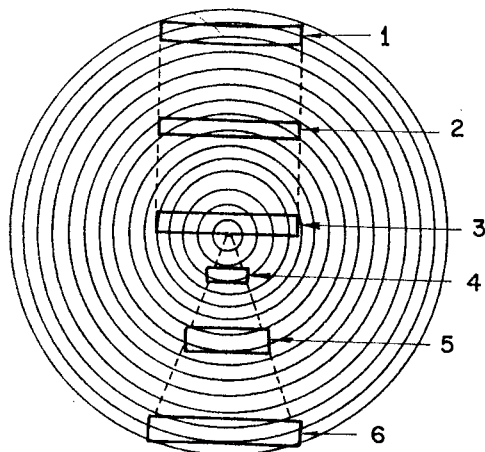


Fig. 3 - Modelo Ortotrópico na Madeira, Posição das Peças

Segundo BODIG e JAYNE (1982), a linearização da curvatura dos anéis de crescimento introduz erros maiores para peças situadas próximas a medula (ver figura 3). Por exemplo, a peça nº 1 estará sujeita a um número menor de erros que as de nº 2 e 3. Variando-se o tamanho das peças, segundo as de nº 4, 5 e 6, o erro permanecerá praticamente constante.

2.1.1. Tensões e deformações

2.1.1.1: Componentes de tensão:

As tensões σ_{ij} em um meio contínuo são mostradas no elemento volumétrico da figura 4. Estas tensões são definidas como forças por unidade de área.

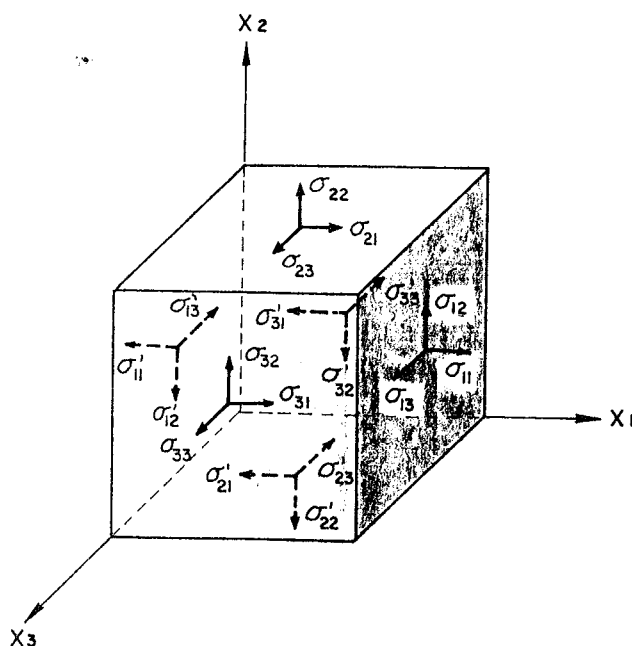


Fig. 4 - Componentes de Tensão em um Elemento Volumétrico num Sistema de Coordenadas Retangulares

De condições de equilíbrio têm-se:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji} \quad (2.1)$$

Logo, o tensor das tensões σ_{ij} , pode ser escrito na forma matricial:

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Quando $i = j$, as tensões σ_{ij} são normais a um plano considerado, e quando $i \neq j$, as tensões σ_{ij} são tangenciais a um plano considerado.

2.1.1.2. Componentes de deformação:

A determinação da deformação pode ser derivada do deslocamento de um ponto interno num meio contínuo. Devido a forças ou deslocamentos na superfície de um corpo, um ponto numa posição (x_1, x_2, x_3) é deslocado para posição $(x_1 + u_1, x_2 + u_2, x_3 + u_3)$.

Os elementos do tensor das deformações são funções dos deslocamentos u_i , pela equação:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (2.3)$$

Para o caso da figura 4, o tensor das deformações pode ser escrito como:

$$\epsilon_{ij} = \begin{pmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

Pela equação ((2.3) têm-se:

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ji} \quad (2.5)$$

e conseqüentemente a matriz ϵ_{ij} é simétrica.

Algumas vezes é conveniente utilizar as eq. (2.6) e (2.7):

$$\gamma_{ii} = \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (2.6)$$

$$\gamma_{ij} = \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad i \neq j \quad (2.7)$$

Colocando-se os elementos γ_{ij} na forma matricial, obtém-se:

$$\gamma_{ij} = \begin{pmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \gamma_{13} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \gamma_{23} \\ \gamma_{31} & \gamma_{32} & \gamma_{33} \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

2.1.2. A lei de Hooke

A lei de Hooke é expressa matematicamente com o envolvimento de todas as componentes de tensão com todas as de deformação. Esta lei está baseada num comportamento elástico-linear do material.

Para aplicação da lei de Hooke na madeira são necessárias algumas condições:

- Somente são consideradas pequenas deformações;
- O material é homogêneo e a densidade constante;
- Não há interferência entre as componentes de tensão.

Alguns fatores como o umedecimento da madeira, pequenas deformações elásticas impostas por um longo período de tempo, podem ocasionar variação de umidade, deformações plásticas, entre outros, limitando muitas vezes a aplicabilidade da lei de Hooke na madeira. Entretanto, estas restrições não podem ser rigorosamente impostas, particularmente se um dos interesses da aplicação desta lei está direcionada para a solução de problemas práticos.

Genericamente a lei de Hooke pode ser escrita na forma tensorial:

$$\text{ou: } \sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (2.9)$$

$$\epsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl}$$

onde: σ_{ij} = componentes de tensão

ϵ_{kl} = componentes de deformação

A matriz C_{ijkl} é chamada de tensor de rigidez e S_{ijkl} sua inversa.

A forma tensorial da lei de Hooke tem nove (9) componentes de tensão σ_{ij} , e nove (9) de deformação ϵ_{kl} . Desta forma existem 81 (oitenta e uma) constantes elásticas. Devido, entretanto, à simetria evidenciada do tensor das deformações e das tensões identificados por:

$$\begin{cases} \sigma_{12} = \sigma_{21} , \epsilon_{12} = \epsilon_{21} \\ \sigma_{13} = \sigma_{31} , \epsilon_{13} = \epsilon_{31} \\ \sigma_{23} = \sigma_{32} , \epsilon_{23} = \epsilon_{32} \end{cases} \quad (2.10)$$

é possível condensar as nove equações de cada expressão dos tensores das equações (2.9), para seis equações com seis componentes de tensão e de deformação ou vice-versa.

Expandindo-se as equações (2.9), é possível escrevê-las na forma matricial, substituindo-se também os ϵ_{ij} pelos γ_{ij} :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1123} & C_{1113} & C_{1112} \\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & C_{2223} & C_{2213} & C_{2212} \\ C_{3311} & C_{3322} & C_{3333} & C_{3323} & C_{3313} & C_{3312} \\ C_{2311} & C_{2322} & C_{2333} & C_{2323} & C_{2313} & C_{2312} \\ C_{1311} & C_{1322} & C_{1333} & C_{1323} & C_{1313} & C_{1312} \\ C_{1211} & C_{1222} & C_{1233} & C_{1223} & C_{1213} & C_{1212} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_{11} \\ \gamma_{22} \\ \gamma_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \dots (2.11)$$

e:

$$\begin{pmatrix} \gamma_{11} \\ \gamma_{22} \\ \gamma_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{1111} & S_{1122} & S_{1133} & S_{1123} & S_{1113} & S_{1112} \\ S_{2211} & S_{2222} & S_{2233} & S_{2223} & S_{2213} & S_{2212} \\ S_{3311} & S_{3322} & S_{3333} & S_{3323} & S_{3313} & S_{3312} \\ S_{2311} & S_{2322} & S_{2333} & S_{2323} & S_{2313} & S_{2312} \\ S_{1311} & S_{1322} & S_{1333} & S_{1323} & S_{1313} & S_{1312} \\ S_{1211} & S_{1222} & S_{1233} & S_{1223} & S_{1213} & S_{1212} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix}$$

...(2.12)

Introduzindo-se uma notação indicial reduzida para os elementos das equações (2.11) e (2.12), de forma que os elementos S_{ijkl} e C_{ijkl} passem para S_{kl} e C_{kl} , obtem-se:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \gamma_{11} \\ \gamma_{22} \\ \gamma_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix}$$

...(2.13)

e:

$$\begin{pmatrix} \gamma_{11} \\ \gamma_{22} \\ \gamma_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} \dots(2.14)$$

As equações (2.9) podem ser escritas em forma concisa:

$$\begin{cases} \sigma = C\varepsilon \\ \varepsilon = S\sigma \end{cases} \quad (2.15)$$

A partir destas equações conclue-se:

$$C = S^{-1} \quad \text{e} \quad S = C^{-1}$$

pois as matrizes S e C são inversíveis, Sokolnikoff, 1956 (apud JAYNE e SUDARTH, 1966)

2.1.2.1. Lei de Hooke para materiais ortotrônicos

Embora sendo reconhecido que 21 dos 36 parâmetros da matriz C ou S são independentes, uma redução ainda maior é desejada para simplificar o uso da lei. Como a madeira é um material ortotrônico, conseqüentemente a lei de Hooke torna-se mais simples.

Para que esta simplificação seja feita, os eixos de simetria devem coincidir com os eixos geométricos, em um dado elemento volumétrico, como indicado na figura 5:

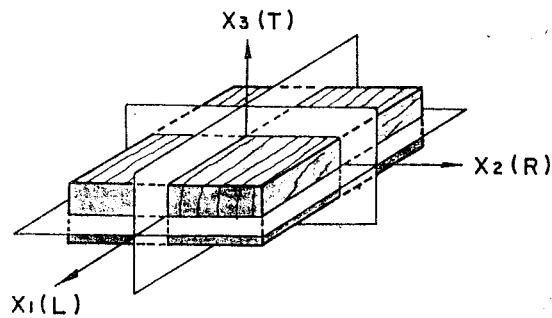


Fig. 5 - Modelo Ortotrôpico em um Elemento de Madeira, isento de Defeitos

A lei de Hooke para materiais ortotrôpicos pode ser estabelecida aplicando-se uma tensão σ_{11} num elemento volumétrico como na figura 5. Esta tensão produz deformações normais γ_{11} , γ_{22} , γ_{33} , relacionadas através das equações:

$$\begin{cases} \gamma_{11} = S_{11} \sigma_{11} \\ \gamma_{22} = S_{21} \sigma_{11} \\ \gamma_{33} = S_{31} \sigma_{11} \end{cases} \quad (2.16)$$

A ocorrência de γ_{22} e γ_{33} resulta do efeito de Poisson.

Removendo-se γ_{11} e aplicando somente γ_{22} no elemento volumétrico, as três deformações normais γ_{11} , γ_{22} , γ_{33} são produzidas novamente, mas não com a mesma magnitude de antes. Assim, tem-se:

$$\begin{cases} \gamma_{11} = S_{12} \sigma_{22} \\ \gamma_{22} = S_{22} \sigma_{22} \\ \gamma_{33} = S_{32} \sigma_{22} \end{cases} \quad (2.17)$$

Para σ_{33} somente, as deformações normais são:

$$\begin{cases} \gamma_{11} = S_{13} \sigma_{33} \\ \gamma_{22} = S_{23} \sigma_{33} \\ \gamma_{33} = S_{33} \sigma_{33} \end{cases} \quad (2.18)$$

As deformações normais totais produzidas por todas as tensões aplicadas são obtidas pela soma da contribuição devida a cada tensão:

$$\begin{cases} \gamma_{11} = S_{11} \sigma_{11} + S_{12} \sigma_{22} + S_{13} \sigma_{33} \\ \gamma_{22} = S_{21} \sigma_{11} + S_{22} \sigma_{22} + S_{23} \sigma_{33} \\ \gamma_{33} = S_{31} \sigma_{11} + S_{32} \sigma_{22} + S_{33} \sigma_{33} \end{cases} \quad (2.19)$$

Se a tensão tangencial σ_{23} é aplicada no elemento, somente a deformação tangencial γ_{23} é produzida:

$$\gamma_{23} = S_{44} \sigma_{23} \quad (2.20)$$

Analogamente para σ_{13} e σ_{12} , obtem-se:

$$\gamma_{13} = S_{55} \sigma_{13} \quad (2.21)$$

e

$$\gamma_{12} = S_{66} \sigma_{12} \quad (2.22)$$

As equações (2.19) a (2.22), podem ser agrupadas para formar o sistema matemático da lei de Hooke, convenientemente escrita na forma matricial:

$$\begin{pmatrix} \gamma_{11} \\ \gamma_{22} \\ \gamma_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} \quad \dots (2.23)$$

Comparando-se a eq. (2.23) com a eq. (2.14) muitos parâmetros são nulos para os materiais ortotrópicos. Em síntese, há 6 parâmetros relativos a 6 módulos de elasticidade, sendo 3 razões entre as tensões e deformações normais e 3 razões entre as tensões e deformações tangenciais nos planos ortotrópicos.

Substituindo:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{11} = 1/E_1 \\ S_{22} = 1/E_2 \\ S_{33} = 1/E_3 \\ S_{44} = 1/G_{23} \\ S_{55} = 1/G_{13} \\ S_{66} = 1/G_{12} \end{array} \right. \quad (2.24)$$

E com a aplicação do coeficiente de Poisson,

$$v_{ij} = -\epsilon_j/\epsilon_i \quad (2.25)$$

têm-se:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{12} = -S_{21}/S_{11} \\ v_{13} = -S_{31}/S_{11} \\ v_{21} = -S_{12}/S_{22} \\ v_{23} = -S_{32}/S_{22} \\ v_{31} = -S_{13}/S_{33} \\ v_{32} = -S_{23}/S_{33} \end{array} \right. \quad (2.26)$$

Estas equações definem os outros termos da matriz S:

$$\left\{ \begin{array}{ll} S_{12} = -\frac{\nu_{21}}{E_2} & S_{31} = -\frac{\nu_{13}}{E_1} \\ S_{21} = -\frac{\nu_{12}}{E_1} & S_{23} = -\frac{\nu_{32}}{E_3} \\ S_{13} = -\frac{\nu_{31}}{E_3} & S_{32} = -\frac{\nu_{23}}{E_2} \end{array} \right. \quad (2.27)$$

Passando-se do sistema indicial (1, 2, 3) para o sistema (L,R,T), mais usual e aceito para a madeira, a forma final da lei de Hooke $\bar{\epsilon}$:

$$\begin{pmatrix} \gamma_L \\ \gamma_R \\ \gamma_T \\ \gamma_{RT} \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{LR} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/E_L & -\nu_{RL}/E_R & -\nu_{TL}/E_T & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{LR}/E_L & 1/E_R & -\nu_{TR}/E_T & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{LT}/E_L & -\nu_{RT}/E_R & 1/E_T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{RT} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{LT} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{LR} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \sigma_{RT} \\ \sigma_{LT} \\ \sigma_{LR} \end{pmatrix} \quad \dots(2.28)$$

Utilizando-se a hipótese da ortotropia combinada com a simetria da matriz S, obtem-se ainda as seguintes identidades:

$$\frac{\nu_{LR}}{E_L} = \frac{\nu_{RL}}{E_R}, \quad \frac{\nu_{LT}}{E_L} = \frac{\nu_{TR}}{E_T}, \quad \frac{\nu_{RT}}{E_R} = \frac{\nu_{TR}}{E_T} \quad (2.29)$$

Alguns dados experimentais citados por BODIG e JAYNE (1982), de fato sugerem a validade destas identidades, conforme o QUADRO I.

QUADRO I. Dados experimentais das identidades (2.29)

Espécies	Plano LR		Plano LT		Plano RT	
	ν_{LR}/E_L	ν_{RL}/E_R	ν_{LT}/E_L	ν_{TL}/E_T	ν_{RT}/E_T	ν_{TR}/E_T
Douglas Fir	0,179	0,152	0,159	0,186	3,034	3,378
Oak red	0,427	0,421	0,648	0,614	2,137	2,068

A despeito de um número amplo de variações, tais como espécie, umidade, temperatura, etc., em geral segundo BODIG e JAYNE (1982), os módulos de elasticidade estão assim relacionados:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_L : E_R : E_T \approx 20 : 1,6 : 1 \\ G_{LR} : G_{LT} : G_{RT} \approx 10 : 9,4 : 1 \\ E_L : G_{LR} \approx 14 : 1 \end{array} \right.$$

ROCCO LAHR (1983), ensaiando peças de Eucalipto *Tereticornis* (*Eucalyptus tereticornis*) Peroba Rosa (*Aspidosperma polyneuron*) e Jatobá (*Hymenaea stilbocarpa*), através de ensaios de flexão estática, constatou a equivalência entre G_{LR} e G_{LT} , denotada agora simplesmente por G e também a relação:

$$E_L : G \approx (40 \text{ a } 30) : 1$$

É oportuno ressaltar que a notação, nesta revisão da literatura, para o módulo de elasticidade longitudinal será: E_i , quando vinculado ao eixo geométrico i , E_L , quando vinculado a um eixo de ortotropia e E , para uso geral.

2.1.3. Determinação das constantes elásticas E_L e G através de ensaios estáticos.

Tendo sido apresentados os elementos fundamentais da Teoria da Elasticidade para materiais ortotrôpicos, examina-se agora algumas de suas aplicações.

2.1.3.1. Deformação de uma viga simplesmente solicitada por momento fletor em suas extremidades.

Na maioria dos trabalhos relativos à determinação dos parâmetros elásticos E_L e G , utilizam-se respectivamente: ensaios de flexão simples e ensaio de torção, em pequenos corpos de provas, prismáticos, isentos de defeitos. Para a determinação de G também se utiliza de combinações de resultados obtidos através de ensaio de flexão simples e pura.

2.1.3.1.1. Efeito do momento fletor na deformação da viga.

Seja a viga da figura 6, sujeita ao seguinte carregamento:

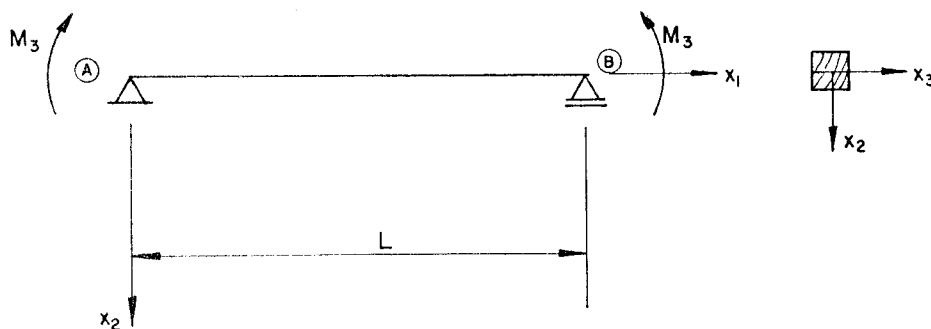


Fig. 6 - Viga Sujeita a Momento Fletor em suas Extremidades

A flexão se processa no plano de simetria devido às cargas transversais, representando-se pela curva A m B da figura 7 (a), o eixo deformado da viga A - B. Esta curva é chamada linha elástica, TIMOSHENKO (1971). A figura 7 (b) mostra o elemento antes do carregamento e na sua posição deslocada e deformada (1'2'3'4'). Para perceber melhor a deformação, o desenho é repetido na posição não deslocada (12"34"), SCHIEL (1976).

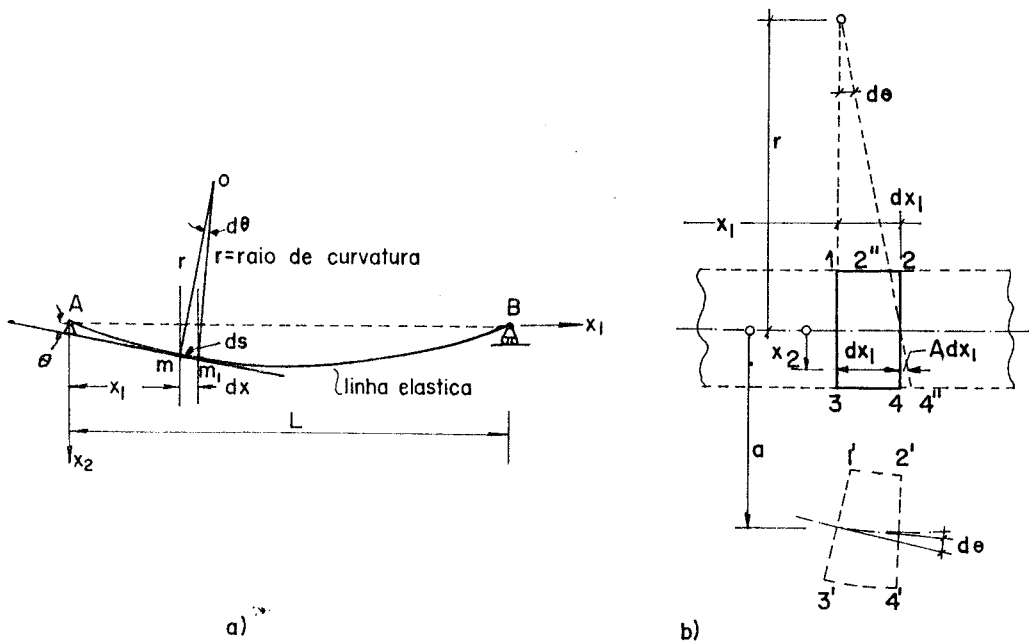


Fig. 7 - Linha Elástica da Viga e Deformação de um Elemento Infinitesimal

Para dedução da equação diferencial da linha elástica, admite-se que a curvatura (r) desta linha depende apenas do momento fletor (M_3). Então

$$\frac{1}{r} = \frac{M_3}{E_1} \quad (2.30)$$

Considerando dois pontos adjacentes m e m_1 da linha elástica distantes de ds ; o ângulo θ entre a tangente em m com x_1 ; o ângulo $d\theta$ entre as normais à curva em m e m_1 ; o ponto de intersecção O como centro de curvatura e tendo como raio r , tem-se finalmente:

$$ds = r d\theta \quad \text{e} \quad \frac{1}{r} = - \frac{d\theta}{ds} \quad (2.31)$$

Pela teoria das pequenas deformações, tem-se:

$$ds \approx dx_1 \quad e \quad \theta \approx \operatorname{tg} \theta = \frac{dx_2}{dx_1} \quad (2.32)$$

substituindo a equação (2.31) em (2.32), obtem-se:

$$\frac{1}{r} = \frac{-d^2 x_2}{dx_1^2} \quad (2.33)$$

A equação (2.30) torna-se

$$E_1 I_3 \frac{d^2 x_2}{dx_1^2} = -M_3 \quad (2.34)$$

a equação diferencial da linha elástica.

Para uma viga submetida a carga concentrada P

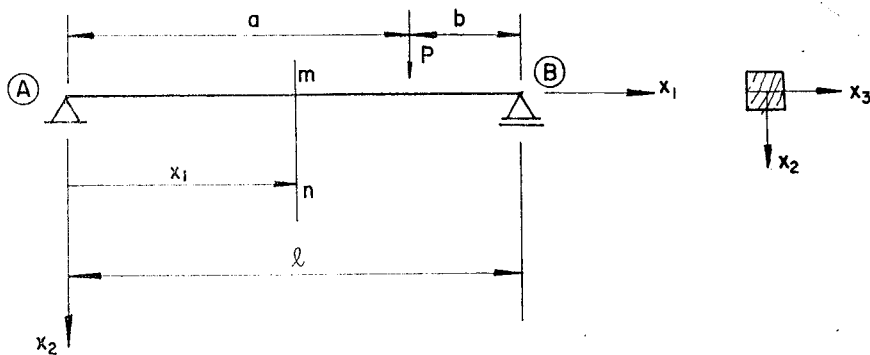


Fig.8 - Viga Sujeita a Carga Concentrada P

a equação da elástica é escrita em duas partes:

$$E_1 I_3 \frac{d^2 x_2}{dx_1^2} = -\frac{Pb}{l} x_1; \quad p/a \quad x \leq a$$

e

$$E_1 I_3 \frac{d^2 x_2}{dx_1^2} = -\frac{Pb}{l} x_1 + P(x_1 - a); \quad p/a \quad x \geq a \quad (2.35)$$

e para $x = \ell/2$ com $a = b$ tem-se:

$$x_{2 \max} = \frac{P\ell^3}{48E_1 I_3} \quad (2.36)$$

ou:

$$E_1 = \frac{P\ell^3}{48I_3 x_{2 \max}} \quad (2.37)$$

2.1.3.1.2. Efeito da força cortante na deformação da viga

Levando-se em conta o efeito das deformações devidas à força cortante (V), alteram-se as ordenadas x_2 da linha elástica. Devido a estas forças, cada elemento retangular da viga sofrerá uma variação angular ou seja, $\gamma = \tau/G$, onde τ é a tensão tangencial. A variação dos ângulos na seção segue a variação dos τ . A figura 9 mostra esta distribuição. SCHIEL (1976).

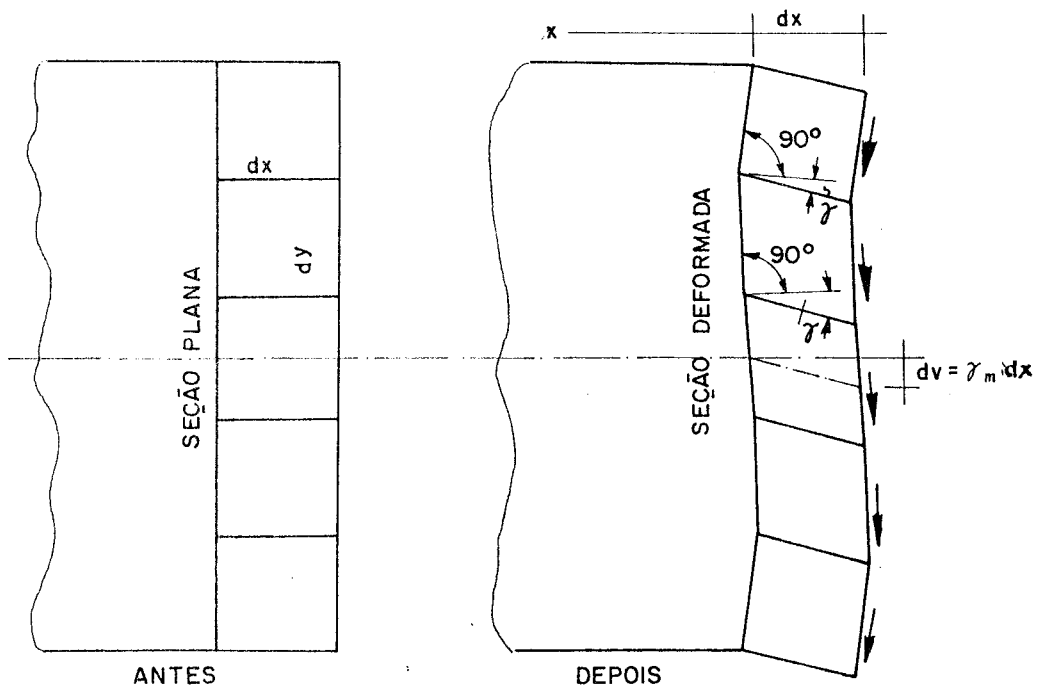


Fig. 9 - Distribuição de Tensões Tangenciais em uma Seção Transversal de uma Viga

No caso da tensão não se distribuir uniformemente na seção, esta se torna curvilínea, como se vê na figura 10:

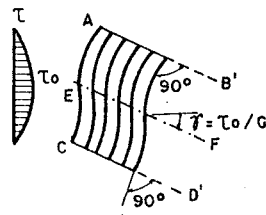


Fig. 10 - Variação da Forma da Seção Transversal para Tensão não Uniforme

- Cálculo da parcela \bar{x}_2 devida ao efeito da força cortante:

Seja a variação angular de um elemento retangular da viga, dada pela equação:

$$\frac{d\bar{x}_2}{dx_1} = c \frac{V_3}{G_{12} A_1} \quad (2.38)$$

sendo: c = fator de forma

Para:

$$\left[\begin{array}{l} x \leq a : V_3 = \frac{Pb}{l} \\ x > a : V_3 = \frac{Pb}{l} - P - P\left(\frac{b}{l} - 1\right) \end{array} \right. \quad (2.39)$$

Obtendo-se assim:

$$\left[\begin{array}{l} \frac{d\bar{x}_2}{dx_1} = c \frac{Pb}{l G_{12} A_1} ; x \leq a \\ \frac{d\bar{x}_2}{dx_1} = c \frac{P}{G_{12} A_1} \left(\frac{b}{l} - 1\right) ; x > a \end{array} \right. \quad (2.40)$$

e para $x_1 = l/2$, $a = b$ tem-se:

$$\bar{x}_2 = \frac{c P l}{4 G A_1} \quad (2.41)$$

2.1.3.1.3. Efeito total

Somando as equações (2.36) e (2.41) obtém-se o efeito das tensões normais e tangenciais na deformação da viga.

$$a = x_2 + \bar{x}_2 \quad (2.42)$$

ou:

$$a = \frac{P\ell^3}{48E_1I_3} + c \frac{P\ell}{4G A_1} \quad (2.43)$$

O fator c representa a não uniformidade na distribuição da tensão tangencial e vale 1,2 para a viga de seção retangular. SCHIEL (1976)

Finalmente:

$$a = \frac{P\ell^3}{48 E_1 I_3} + 0,3 \frac{P\ell}{G A_1} \quad (2.44)$$

Com a utilização de $i_3^2 = I_3/A_1$ a equação (2.43), torna-se:

$$a = \frac{P\ell^3}{48 E_1 I_3} \left[1 + 1,2 \frac{E_1}{G} \left(\frac{d}{\ell} \right)^2 \right] \quad (2.45)$$

Para materiais isotrópicos, a razão E/G é pequena. Por exemplo: para o aço $E/G \approx 2,6$ e para uma relação $d/\ell = 1/10$, o efeito adicional da força cortante no deslocamento a é 4%.

No estudo da deformação de uma viga, admite-se que as seções transversais podem curvar-se livremente, sem nenhum impedimento. Para uma viga carregada uniformemente, a força cortante no meio do vão é zero e não haverá encurvamento, sendo aproximadamente satisfeita esta condição. Considerando-se, agora, uma viga com carga concentrada no meio de seu vão, pela condição de simetria, a seção transversal neste ponto, deve permanecer plana. Por outro lado, as seções transversais vizinhas à carga suportam uma força cortante de $P/2$, que provocará um encurvamento nestas seções. Admite-se a continuidade de deformação, deve haver um aumento contínuo de encurvamento, a partir do meio do vão. Assim sendo, pode-se concluir que na vizinhança da seção transversal central, a distribuição de tensões não será aquela da teoria elementar da flexão, como na figura 11.

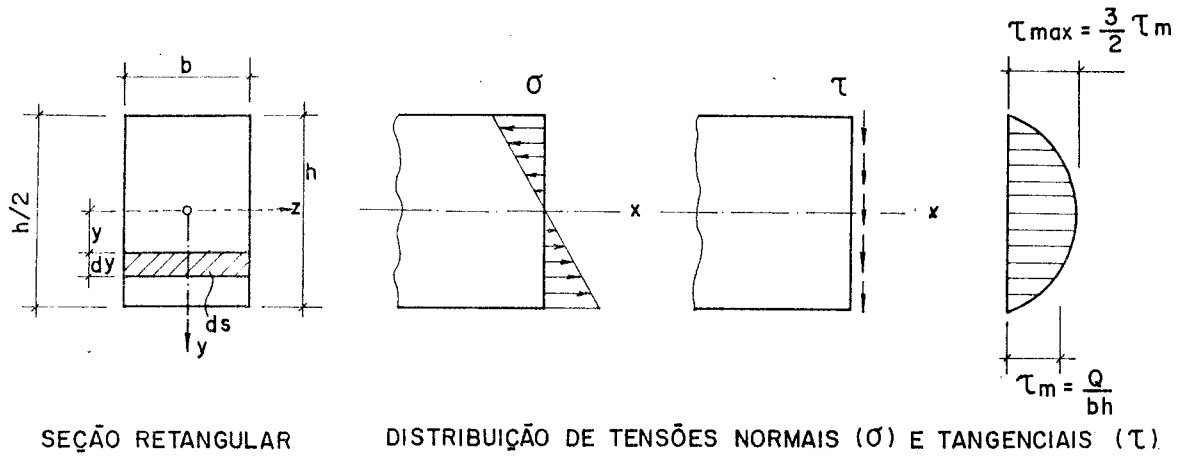


Fig. 11 - Distribuição de Tensões Normais e Tangenciais em uma Seção Transversal - Teoria Clássica

O encurvamento deverá ser parcialmente impedido e o deslocamento devido às forças será menor que o indicado pela equação (2.45). Nos estudos feitos por Karman, 1927, e Seewald, 1927 (*apud* KOLMANN e CÔTE, 1967), a equação da flecha é dada por:

$$a = \frac{P\ell^3}{48 E_1 I_3} \left[1 + 2,85 \left(\frac{d}{\ell}\right)^2 - 0,84 \left(\frac{d}{\ell}\right)^3 \right] \quad (2.46)$$

Esta redução no cálculo da flecha, devida ao efeito localizado na curvatura é mostrada na figura 12. TIMOSHENKO e GOODIER (1980).

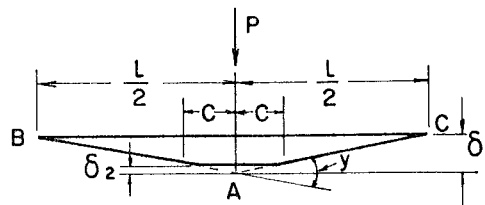


Fig. 12 - Efeito Localizado na Curvatura Devida à Força Cortante

Uma outra idéia associada a este fenômeno, está no fato da carga P ser equivalente a outra carga P_1 , distribuída num pequeno trecho "e", visto na figura 13.

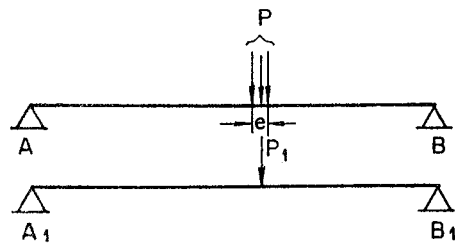
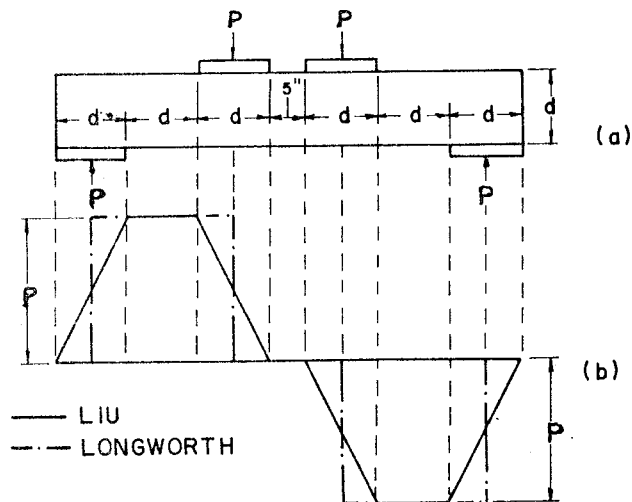


Fig. 13 - Equivalência de P e P_1 num Pequeno Trecho "e"

Para a madeira, além do estudo exposto, uma tentativa a fazer é admitir um diagrama de forças cortantes descontínuo na região de aplicação de carga e na região dos apoios, como analisou LIU (1980) e é apresentado na figura 14.



(a) VIGA ENSAIADA (b) DIAGRAMA DE FORÇA CORTANTE

Fig. 14 - Diagrama de Forças Cortantes Proposto por LIU

É relevante ressaltar: quando as deformações tangenciais são ignoradas, o valor de E_1 não é real, mas somente um valor aparente. Comumente se designa por MOE. A diferença numérica entre o valor real E_1 e o valor aparente MOE, depende da seção transversal da viga, das condições de carregamento, da razão E_1/G e da razão l/d . BODIG e JAYNE (1982)

2.1.3.1.4. Influência da razão l/d no valor de E_1

Baumann, 1922 (apud KOLLMANN e CÔTÉ, 1967) evidenciou diminuir a influência das deformações tangenciais quando a razão l/d cresce e, ser desprezível para $l/d > 20$. Verificou

também, que a relação E_1/G é fator decisivo, tendo chegado a um valor médio de 17. No QUADRO II estão alguns valores de E_1 e de G e sua razão.

QUADRO II. Valores de E_1 , G e E_1/G para algumas espécies de madeiras indicadas por Kollmann e Côté

ESPÉCIES	E_1 (kgf/cm ²)	G (kgf/cm ²)	E_1/G
Douglas fir	166.990	9.300	17.9
Spruce	162.300	7.800	20.8
Pine	166.100	6.800	24.4
White Wood	98.900	6.800	14.5
Ash	161.000	9.100	17.7
Sitka spruce	118.300	7.300	16.2
Mahogany	126.400	4.800	26.3

Com o propósito de utilizar a equação (2.45) é usual adotar-se a razão E_1/G constante. Alguns pesquisadores, como NEULIN e TRAYER (1956), KRAHMER (1968) e BOGIG e JAYNE (1982), adotaram o valor 16. ROCCO LAHR (1983) chegou ao valor médio 30. É importante salientar que este trabalhou com madeiras dicotiledôneas e aqueles com coníferas.

Portanto a equação (2.45), fica:

$$a = \frac{P (\ell/d)}{4 E_1 b} \left[\left(\frac{\ell}{d} \right)^2 + c \right] \quad (2.47)$$

ou, isolando-se E_1

$$E_1 = \frac{P (\ell/d)}{4 a b} \left[\left(\frac{\ell}{d} \right)^2 + c \right] \quad (2.48)$$

onde : C é uma constante que depende das condições de carregamento BODIG e JAYNE (1982).

Para $C = 0$, implica em:

$$E_1 = \left[\frac{P (\ell/d)}{4 a b} \cdot \left(\frac{\ell}{d}\right)^2 \right] = \text{MOE} \quad (2.49)$$

Dividindo-se (2.48) por (2.49) obtem-se:

$$\frac{\text{MOE}}{E_1} = \frac{(\ell/d)^2}{(\ell/d)^2 + C} \quad (2.50)$$

A ASTM D143 utiliza para determinar o valor de MOE, para peças de madeiras isentas de defeitos, de seção (2×2) in², vão $\ell = 28$ in, carga concentrada no meio do vão da viga e $C = 19,2$. Substituindo-se estes valores em (2.50) resulta:

$$\frac{\text{MOE}}{E_1} = 0,911$$

O efeito da relação (ℓ/d) para vigas de madeira é ilustrado pela figura 15, segundo constatações de BODIG e JAYNE (1982):

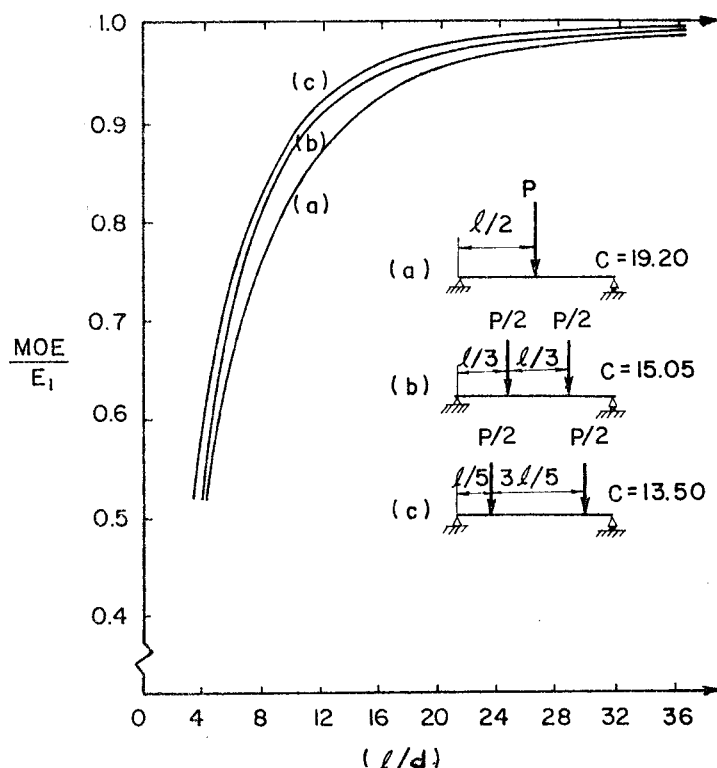


Fig. 15 - MOE/E_1 em Função da Relação ℓ/d

- Para (a) carga concentrada no centro ($C = 19,20$)
- (b) 2 cargas a $\ell/3$ dos apoios ($C = 15,05$)
- (c) 2 cargas a $\ell/5$ dos apoios ($C = 13,50$)

Pela figura 15, observa-se que, na zona central da viga, quanto maior a zona sem tensões tangenciais, menor o efeito das deformações tangenciais na deformação total.

NEWLIN (1956) e KRAHMER (1968), apresentam gráficos semelhantes. A figura 16 ilustra as relações obtidas pelos dois pesquisadores, no estudo da influência de (ℓ/d) em E , em vigas de seção retangular da espécie Douglas fir.

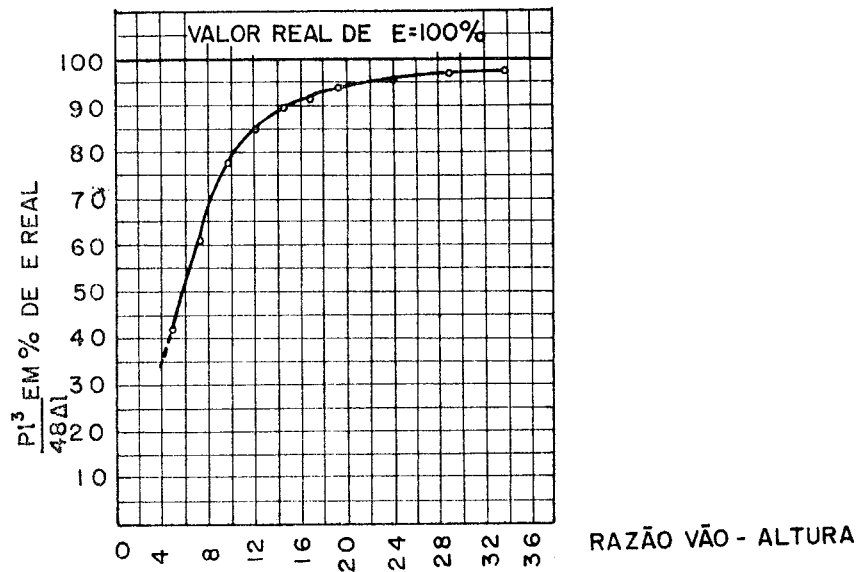


Fig. 16 - Efeito de ℓ/d no Módulo de Elasticidade Longitudinal

ROCCO LAHR (1983), estudando este assunto para dicotiledôneas, apresentou conclusões, as quais se evidenciam na figura 17:

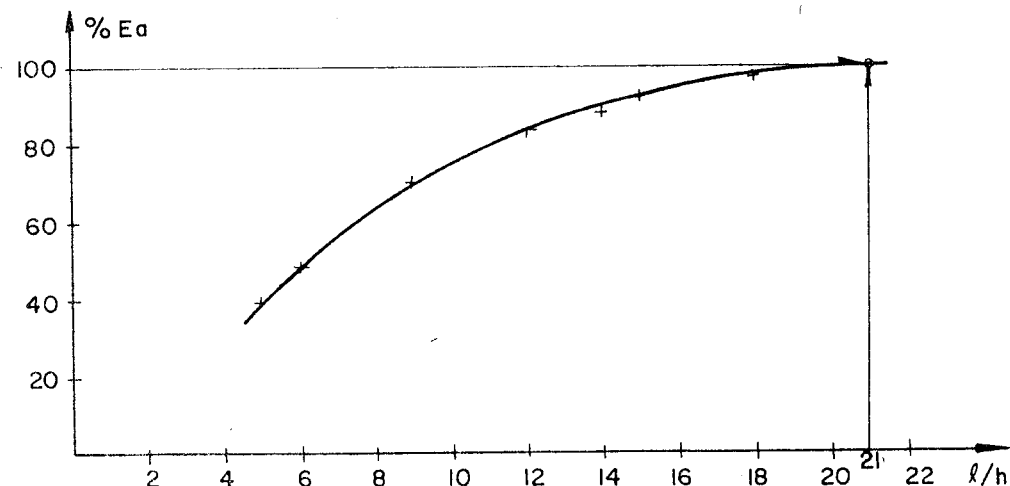


Fig. 17 - Efeito de ℓ/d no Módulo de Elasticidade Longitudinal

As curvas da figura 15 foram traçadas para a razão $E_1/G = 16$. Se esta hipótese for incorreta, a equação (2.45) deve ser resolvida por outros meios. Uma possível solução é relacionar estatisticamente G e E_1 . BODIG e GOODMAN (1973), apresentaram a seguinte relação :

$$G = \alpha E_1^\beta \text{ ou } G = \alpha E_1 \exp(\beta) \quad (2.51)$$

Substituindo-se, então, a equação (2.51) em (2.44), obtem-se:

$$a = \frac{P\ell^3}{48 E_1 I_3} + \frac{0,3 P\ell}{A \alpha E_1^\beta} \quad (2.52)$$

Na equação (2.51), α vale 3.685,2 e β 0,23585. Portanto (2.52), torna-se:

$$a = \frac{P\ell^3}{48 E_1 I_3} + \frac{0,3 P\ell}{3.685,2 E_1 \exp(0,23585)} \quad (2.53)$$

Consequentemente se as características geométricas de uma viga e o carregamento são conhecidos, a flecha pode ser calculada sem a necessidade do conhecimento de G . Por outro lado, se o deslocamento é medido e E_1 é determinado, o problema torna-se mais complexo, utilizando-se um processo iterativo para solucioná-lo.

2.1.3.1.5. Outros aspectos da utilização da equação completa da flecha

As dificuldades na aplicação da equação (2.45), têm convencido muitos pesquisadores a utilizar um ensaio de flexão pura para determinar E_1 . Os ensaios são baseados no esquema:

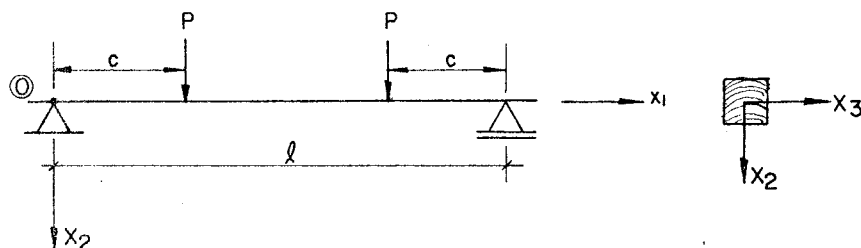


Fig. 18 - Esquema de Ensaio com 2 cargas equidistantes dos apoios

como uso da equação:

$$a = \frac{P\ell^3}{24 E I} \left(\frac{3c}{\ell} - \frac{4c^3}{\ell^3} \right) \quad (2.54)$$

Segundo KOLLMANN e CÔTE (1967), existe uma certa facilidade em se determinar o valor do parâmetro elástico E_1 , apresentando por outro lado dificuldade na determinação do parâmetro elástico G . Os valores de G podem ser obtidos através do ensaio de torção, como indicado no Método D143 da ASTM, ou através de relações entre as equações (2.44) e (2.54).

A preocupação com este tipo de análise tem sido agora introduzida no Brasil, com os estudos desenvolvidos no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM).

A NBR 6230 não apresenta ensaio para determinação de G e o valor do módulo de elasticidade longitudinal E é um valor aparente, além disto o dimensionamento à flexão, dado pela NBR 7190, segue os resultados da NBR 6230, acarretando incorreções no cálculo das estruturas de madeira.

2.1.3.2. Método de Ensaio para determinação dos módulos de elasticidade longitudinal e transversal de madeira.

Os ensaios mecânicos são realizados para se obter dados para prever o comportamento de um material em uso. Embora este objetivo possa ser alcançado de várias maneiras, é essencial simplificar todos os ensaios ao grau compatível com o acervo de dados existentes. Os ensaios são planejados para observar o comportamento de um material para uma ou possivelmente duas componentes de tensão ao mesmo tempo. Subsequentemente, os resultados de muitos ensaios podem ser combinados para prover uma base de soluções de problemas complexos. Na realização dos ensaios mecânicos são determinadas importantes componentes de tensões e de deformações, normais e tangenciais, parâmetros elásticos, entre outros. Os procedimentos dos ensaios estão direcionados para se obter medidas realistas para cada uma das componentes mencionadas.

Historicamente, os ensaios em pequenos corpos de prova de madeira, isentos de defeitos, sob condições controladas, têm recebido ampla utilização para avaliar as propriedades

mecânicas da madeira. Atualmente, em alguns países evoluídos no estudo da madeira, como nos Estados Unidos e Canadá, são realizados ensaios em peças de dimensões estruturais, sob condições similares às aquelas encontradas em serviço.

São descritos a seguir, alguns dos principais métodos de ensaio para determinação dos parâmetros elásticos: E_1 e G .

2.1.3.2.1. Módulo de elasticidade longitudinal

NBR 6230 (Brasil)

. Notação: para o módulo de elasticidade longitudinal: E_m

. Corpo de Prova:

Dimensões: $(6 \times 6 \times 100) \text{ cm}^3$

Distância entre os apoios: 84 cm

. Número de Corpo de Prova:

12 (doze), unidade do ponto de saturação das fibras

. Esquema de Ensaio:

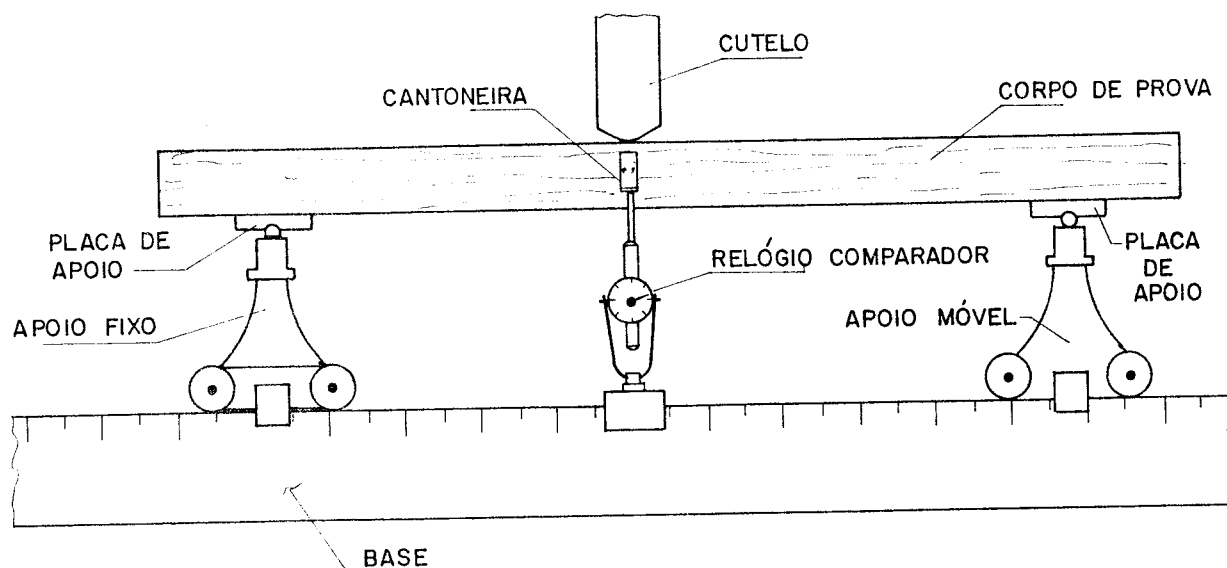


Fig. 19 - Esquema de Ensaio para Determinação de E_m

. Cálculo:

$$E_m = \frac{L^3 p}{4 f b h^3} \quad (2.55)$$

sendo: f = flecha no limite de proporcionalidade (cm)

b = largura do corpo de prova (cm)

h = altura do corpo de prova (cm)

p = carga no limite de proporcionalidade (kgf)

L = distância entre os apoios (cm)

DIN 52-185 (Alemanha Ocidental)

. Notação para o módulo de elasticidade longitudinal: E_B

. Corpo de Prova:

Dimensões: $b = h = (20 \pm 1)$ mm

ℓ = distância entre os apoios $> 15 h$

Comprimento do corpo de prova: $L = \ell + 3h$

. Esquema de Ensaio:

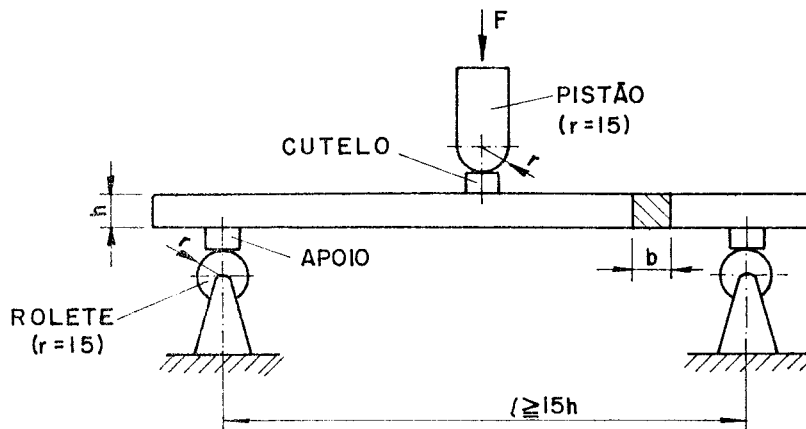


Fig. 20 - Esquema de Ensaio com uma Carga Central

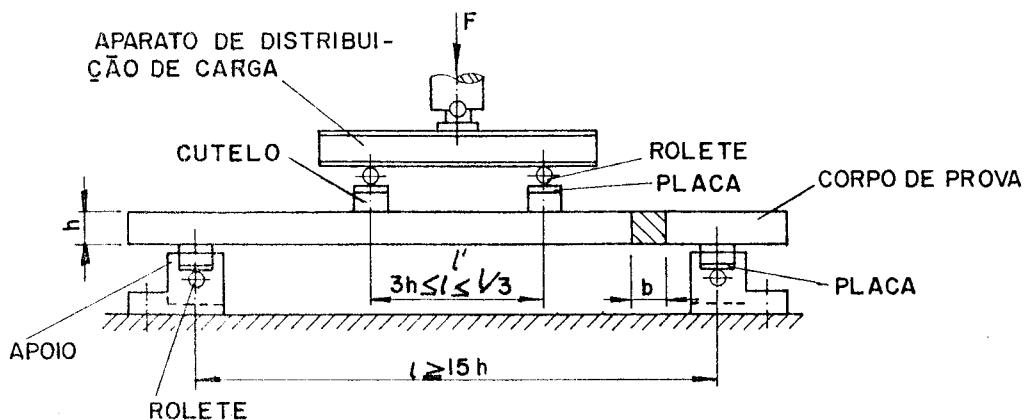


Fig. 21 - Esquema de Ensaio com duas Cargas Pontuais

. Cálculo:

Para esquema com uma carga

$$E_B = \frac{\ell^3}{4 b h^3} \frac{\Delta F}{\Delta f} \quad (2.56)$$

Para esquema com duas cargas

$$E_B = \frac{(2\ell^3 - 3\ell \bar{\ell}^2 + \bar{\ell}^3)}{8 b h^3} \frac{\Delta F}{\Delta f} \quad (2.57)$$

sendo: ℓ = distância entre os apoios (mm)

$\bar{\ell}$ = distância entre as cargas (mm)

$\frac{\Delta F}{\Delta f}$ = variação de carga e deslocamento até 1/3 da carga de ruptura (N/mm)

BS 5820 (Inglaterra)

Este método apresenta cálculo para o módulo de elasticidade longitudinal (E_m) e para módulo de elasticidade longitudinal aparente ($E_{m \text{ app}}$), conforme esquemas de ensaios mostrados a seguir:

- Esquema I

. Notação: para o módulo de elasticidade longitudinal: E_m

. Corpo de Prova:

Dimensões: $(b \times d)$ (mm), sem valores fixos.

Comprimento do Corpo de Prova: $18d + 150$ mm

Distância entre os apoios: $18d$

. Esquema de Ensaio:

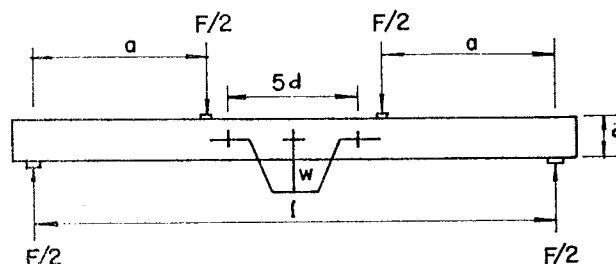


Fig. 22 - Esquema I de Ensaio - Determinação de E_m

. Cálculo:

$$E_m = \frac{\Delta F a \cdot \ell_1^2}{16 I \Delta w} \quad (2.58)$$

sendo: $\frac{\Delta F}{\Delta w}$ = variação de carga e deslocamento (N/mm)

I = momento de inércia da seção (mm⁴)

ℓ_1 = distância entre as cargas (mm)

a = distância entre a carga e o apoio (mm)

- Esquema II

. Notação: para o módulo de elasticidade longitudinal: $E_{m \text{ app}}$

. Corpo de Prova:

Dimensões: (b x d) mm

Comprimento do Corpo de Prova: 18d + 150 mm

Distância entre os apoios: 5d

. Esquema de Ensaio:

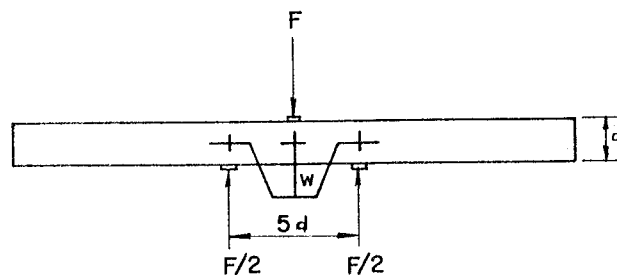


Fig. 23 - Esquema II de Ensaio - Determinação de $E_{m \text{ app}}$

. Cálculo:

$$E_{m \text{ app}} = \frac{\ell^3 \Delta F}{48 I \Delta w} \quad (2.59)$$

sendo: ℓ = distância entre os apoios

I = momento de inércia da seção

$\frac{\Delta F}{\Delta w}$ = variação do carregamento e do deslocamento

ASTM (Estados Unidos)

- ASTM D143 - Flexão Estática em Pequenos Corpos de Prova

. Corpo de Prova:

Dimensões: $b = h = 5 \text{ cm}$

Comprimento do Corpo de Prova: $L = 76 \text{ cm}$

Distância entre os apoios: 70 cm

. Esquema de Ensaio:

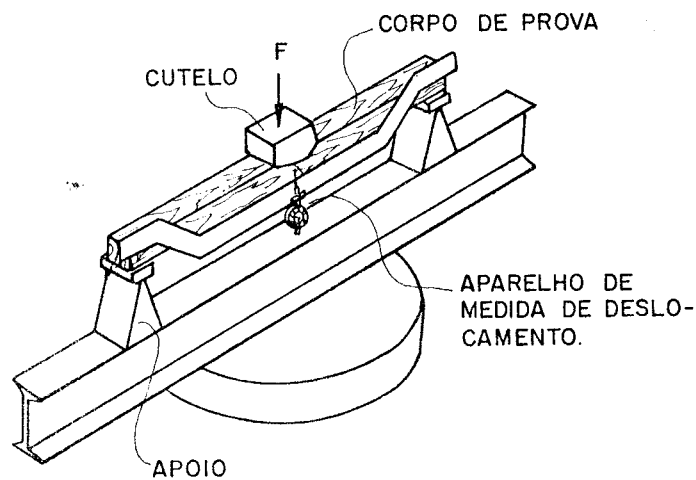


Fig. 24 - Esquema de Ensaio para Determinação de E_f

. Cálculo:

$$E_f = \frac{P' a}{48 I \Delta} (3L^2 - 4a^2) \quad (2.60)$$

sendo: $\Delta =$ flecha (cm)

$a = L/2$ (cm)

$P' =$ carga no limite de proporcionalidade (lb)

$I =$ momento de inércia (cm^4)

- ASTM D198 - Flexão Estática em Corpos de Prova de Dimensões Estruturais

. Corpo de Prova:

Dimensões: $(b \times h) > (5 \times 5) \text{ cm}^2$

Comprimento do Corpo de Prova: ℓ

. Esquema de Ensaio:

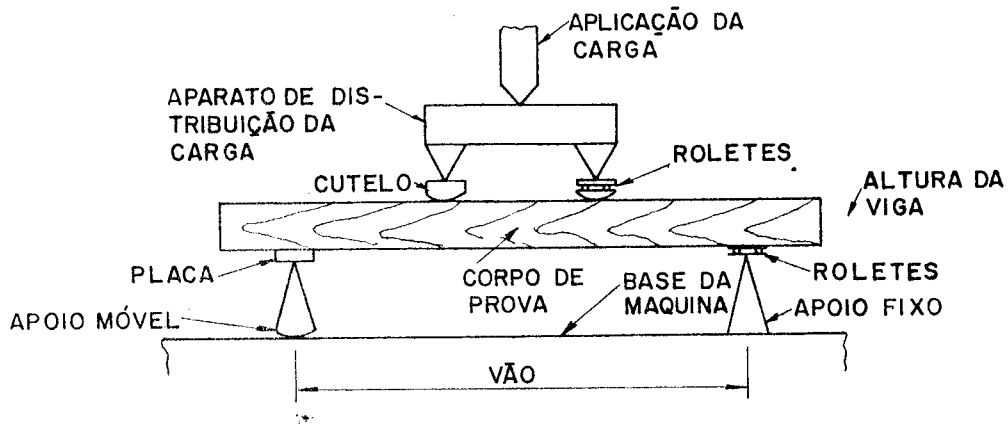


Fig. 25 - Esquema de Ensaio para Determinação de E_G

. Cálculo:

$$E_G = \frac{P' a (3L^2 - 4a^2)}{4 bh^3 \Delta \left(1 - \frac{3 P' a}{5 bh GA}\right)} \quad (2.61)$$

sendo: E_G = módulo de elasticidade longitudinal (psi)

G = módulo de elasticidade transversal (psi)

Δ = flecha (cm)

2.1.3.2.2. Módulo de Elasticidade Transversal (G)

BS 5820 (Inglaterra)

Para determinar a constante elástica G , utiliza-se o cálculo de E_m e de $E_m \text{ app}$.

. Cálculo:

$$G = 1,2 \frac{h^2}{\ell^2} \left(\frac{1}{E_m \text{ app}} - \frac{1}{E_m} \right) \quad (2.62)$$

- ASTM D198 - Torção em Corpos de Prova de Dimensões Estruturais

. Corpo de Prova:

Dimensões: segundo a ASTM, as dimensões variam de acordo com o processo de ensaio, devendo, entretanto, ter o comprimento mínimo 8 vezes a maior dimensão da seção transversal.

. Esquema de Ensaio:

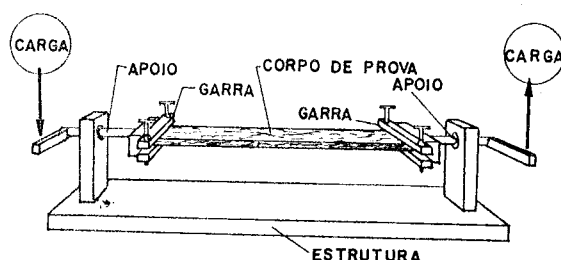


Fig. 26 - Esquema de Ensaio para Torção

. Cálculo:

$$G = \frac{6 P'a}{10 bh \left[\Delta - \left(\frac{L^2}{\ell^2} - \frac{4a^2}{3\ell^2} \right) \Delta_\ell \right]} \quad (2.63)$$

sendo: Δ_ℓ = flecha medida a $\ell/2$ do apoio (cm)

Δ = flecha medida a $\ell/4$ do apoio (cm)

2.2. Resistência à flexão

2.2.1. Tensão na flexão

2.2.1.1. Distribuição de tensão

Embora a teoria mais genericamente aplicada para o dimensionamento de vigas e aceita para caracterização das propriedades mecânicas da madeira seja a teoria elástica elementar, baseada na lei de Hooke, formulada sob certas condições, torna-se importante conhecer suas limitações.

O emprego da equação:

$$\sigma_1 = \frac{M_3 \cdot x_2}{I_3} \quad (2.64)$$

para a flexão estática, exige-se o comportamento elástico-linear do material; as seções planas devem permanecer planas durante a flexão, e o módulo de elasticidade deve ser o mesmo na tração e na compressão. TIMOSHENKO (1971).

Até o limite elástico, a variação entre a tensão e a deformação numa viga de madeira é linear, porém se a tensão é gradualmente incrementada, passando do limite de proporcionalidade, esta relação não é mais válida. Isto ocorre devido às resistências à tração e à compressão serem diferentes. Gráficos típicos ilustram este fenômeno, de acordo com RAMOS (1961), figura 27.

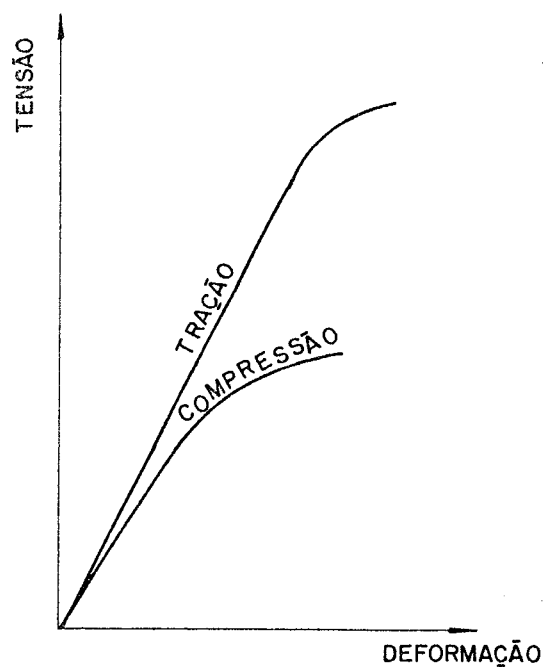


Fig. 27 - Diagrama Tensão-Deformação para Compressão e Tração

Como consequência, há alteração no diagrama tensão-deformação, ilustrado por ZAKIC (1973) na figura 28.

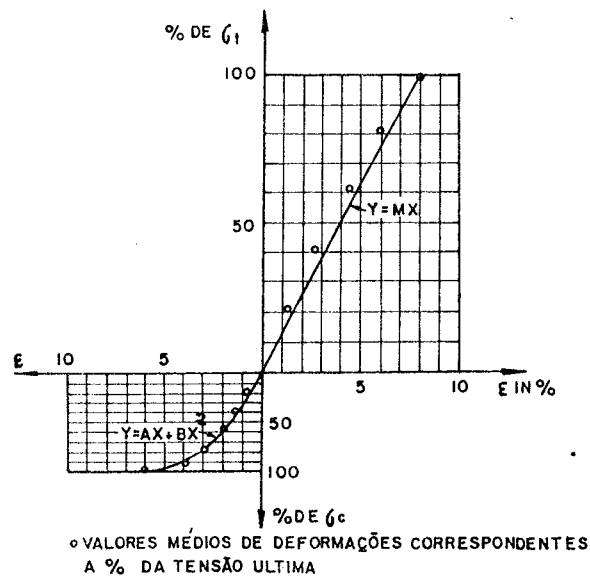


Fig. 28 - Distribuição de Tensão-Deformação - ZAKIC

Tanaka, 1906 (*apud* KOLLMANN e CÔTÉ, 1967), propôs a seguinte modificação na equação (2.64), para peças de seção retangular:

$$\sigma_F = \frac{3 P \ell}{2wh^n} \quad (2.65)$$

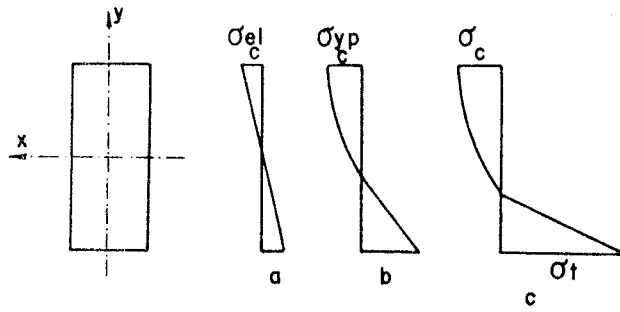
sendo: w = flecha

n = constante dependente da espécie de madeira

Monnin, 1919, 1923 (*apud* KOLLMANN e CÔTÉ, 1967), estudando esta equação preferiu atribuir variação para n , não em função das espécies, mas em função da classificação das peças. A equação deduzida por Monnin, com $n = 10/6$, é utilizada no método Francês para Flexão Estática (AFNOR-B5-28) e pelo método do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) de Portugal.

Bach e Baumann, 1923 (*apud* KOLLMANN e CÔTÉ 1976), BROCHARD (1960), RAMOS (1961) e KARLSEN (1967), apresentaram soluções para a distribuição de tensões e de deformações em vigas de seção retangular de madeira. Mais recentemente, ZAKIC (1973), mostrou através de alguns diagramas, a complexidade do fenômeno de distribuição de tensões normais na madeira, como ilustrado

na figura 29:



ETAPAS DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO NUMA VIGA DE MADEIRA
g) FASE ELÁSTICA
b) ALÉM DA FASE ELÁSTICA
c) RUPTURA

Fig. 29 - Distribuição de Tensão na Seção Central da Viga, na fase elástica, não elástica e na ruptura

É interessante também, apresentar a distribuição de deformações normais, associada ao estudo de ZAKIC (1973), e mostrada na figura 30:

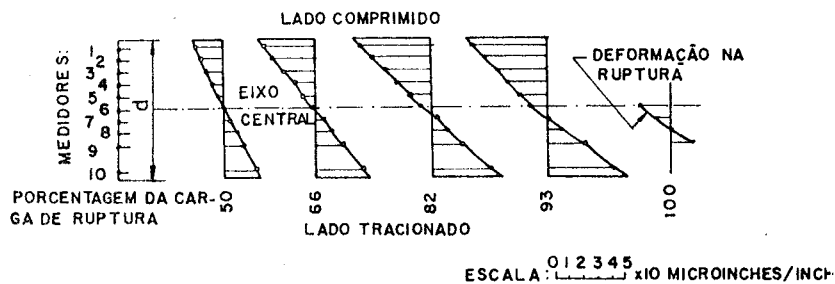


Fig. 30 - Distribuição de Deformação na Seção Central da Viga, na fase elástica, não elástica e na ruptura

Um outro aspecto tratado por este pesquisador está relacionado com um equacionamento da distribuição de tensões normais em peças de madeira fletida. Com base na figura 28 é verificado que as tensões normais da região comprimida, distribuem-se segundo uma função polinomial do 2º grau, enquanto as da região tracionada a uma função polinomial do 1º grau.

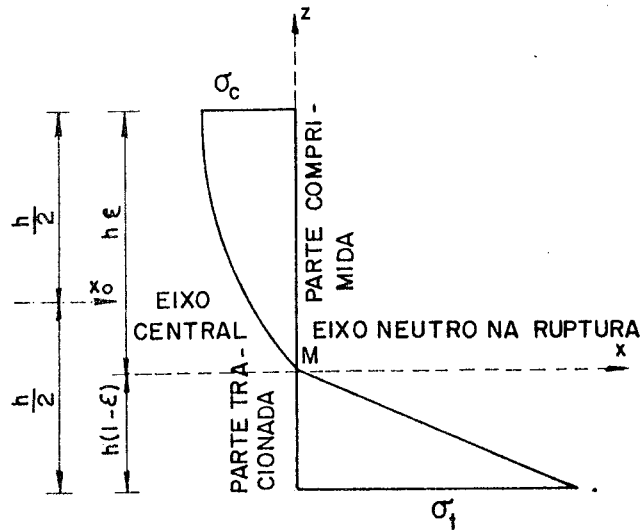


Fig. 31 - Diagrama de Distribuição de Tensão Normal na Ruptura

Assim, são estabelecidas as duas funções:

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \frac{\sigma_c}{\xi^2 h^2} z^2 - 2 \frac{\sigma_c}{\xi h} z \\ x = \frac{\sigma_t}{h(1-\xi)} z \end{array} \right. \quad (2.66)$$

Através destas equações (2.66), propôs relações entre o momento fletor interno, no limite elástico (M_{el}^{ul}) e no limite plástico (M_{pl}^{ul}), obtendo; para razão $\sigma_t = 3\sigma_c$:

$$\eta = \frac{M_{pl}^{ul}}{M_{el}^{ul}} = 1,76 \quad (2.67)$$

Realizou, também, comparação entre o momento fletor interno último e o momento fletor externo último em corpos de prova de madeira, evolução significativa para o cálculo e dimensionamento de estruturas de madeira.

LARA PINTO (1983), estudando a flexão no LaMEM, chegou à seguinte equação para tensão de flexão na ruptura; em peças de seção retangular de Pinho do Paraná:

$$\sigma_F^R = \frac{2 P \ell}{3} \frac{y'}{bh} \quad (2.68)$$

sendo: y' = distância da linha neutra até a borda comprimida.

Vista a complexidade da distribuição das tensões na flexão, a equação (2.64), pode ser considerada como uma estimativa da "verdadeira tensão de ruptura na flexão", conhecida nos Estados Unidos como MOR.

2.2.1.2. Influência da relação l/d na resistência à flexão

Baumann, 1922 (*apud* KOLLMANN e CÔTÉ, 1967), demonstrou que o módulo de ruptura à flexão (MRF), varia com a razão l/d . A variação é ilustrada pela figura:

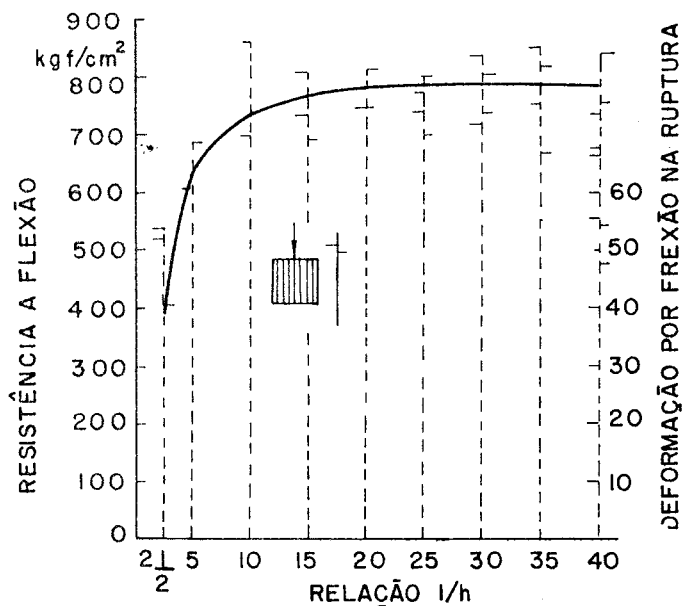


Fig. 32 - Influência da Relação l/h na Resistência à Flexão Estática

Observa-se que a partir de $l/d \geq 20$, o MRF é praticamente constante.

BREGHIEL e NORRIS (1959) também estudaram a variação da resistência à flexão de peças de madeira com a relação l/d , apresentando várias tabelas nas quais os resultados se ajustam à curva apresentada na figura-32.

2.2.1.3. Influência do tamanho na resistência à flexão de vigas de madeira

BOHANNAN (1968), estabeleceu relações evidenciando a variação da resistência de vigas de madeira à flexão, em

função do tamanho e em particular, da altura da seção transversal da viga.

NEWLIN e TRAYER (1924), e Dawley e Youngquist, 1947 (*apud* BOHANNAN, 1968), já haviam se interessado pelo problema e apresentado o seguinte diagrama para esclarecimento do assunto:

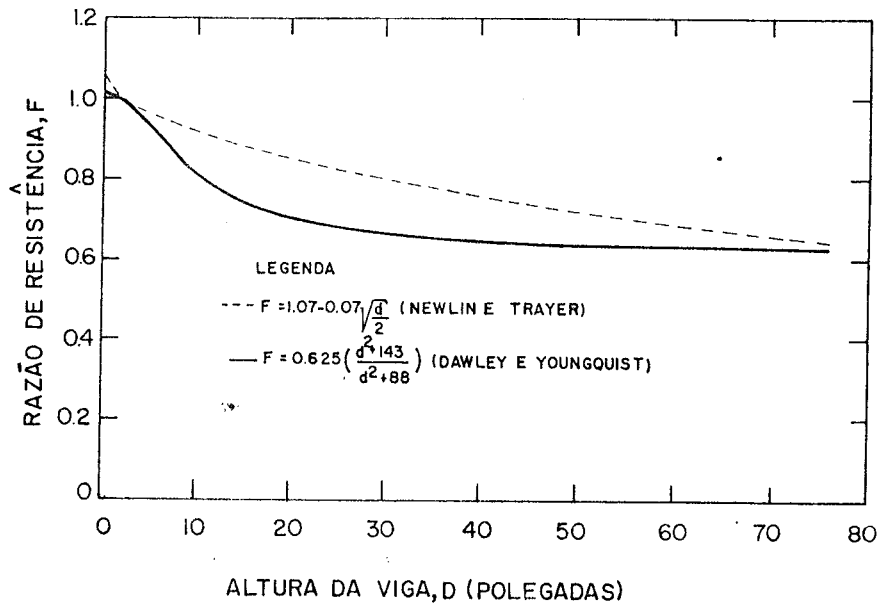


Fig. 33 - Influência da Altura da Viga na Razão de Resistência à Flexão

Para chegarem às equações das curvas da figura 33, estes pesquisadores compararam a resistência de uma viga de $(5 \times 5 \times 70) \text{ cm}^3$, com a resistência de vigas de altura variadas, num ensaio de flexão com carga central, fornecendo a razão F . É interessante notar a diminuição da resistência à flexão com a altura da viga. Nas normas americanas: National Design Specifications (NDS) e do American Institute of Timber Construction (AITC), esta comparação é feita em uma viga padrão de 30 cm de altura e calculada pela expressão:

$$K_d = \left(\frac{12}{d} \right)^{1/9} \quad (2.69)$$

na qual K_d é denominado "fator de tamanho" e d em polegadas.

Para outras relações diferentes de 30 cm, Bohannan cita a seguinte equação:

$$F = 0,81 \left(\frac{d^2 + 143}{d^2 + 88} \right) \quad (2.70)$$

Bohanann também apresenta um diagrama para comparar os resultados da equação obtida por Dawley e Youngquist com a equação obtida utilizando a teoria estatística de resistência dos materiais, deduzida por Weibull, 1923 (apud BOHANNAN, 1968):

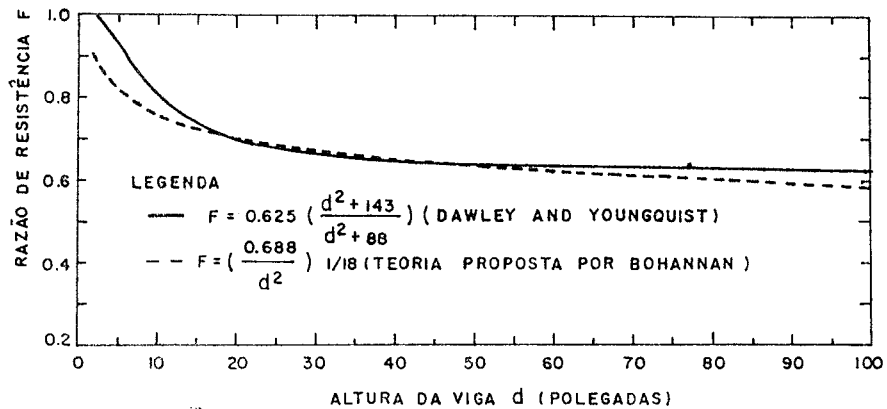


Fig. 34 - Influência da Altura da Viga na Razão de Resistência à Flexão - Proposta de Bohannan

A equação apresentada por Bohannan:

$$F = \left(\frac{0,688}{d^2} \right)^{1/18} \quad (2.71)$$

quando comparado com a equação (2.69), mostra razoável aproximação.

SILVA (1942), apresentou resultados de ensaio de flexão estática em peças de dimensões estruturais, de Pinho do Paraná (*Araucaria angustifolia*) e comparou estes resultados com os os de pequenos corpos de prova isentos de defeitos, concluindo haver uma redução de cerca de 31,5%.

MIWA e HELLMEISTER (1976), estudaram a influência da variação da altura de peças de madeiras submetidas à flexão. O esquema da figura 35 mostra como foram retirados os corpos de prova e a variação da altura (4,8,12 e 16 cm), com o comprimento e a espessura inalterados.

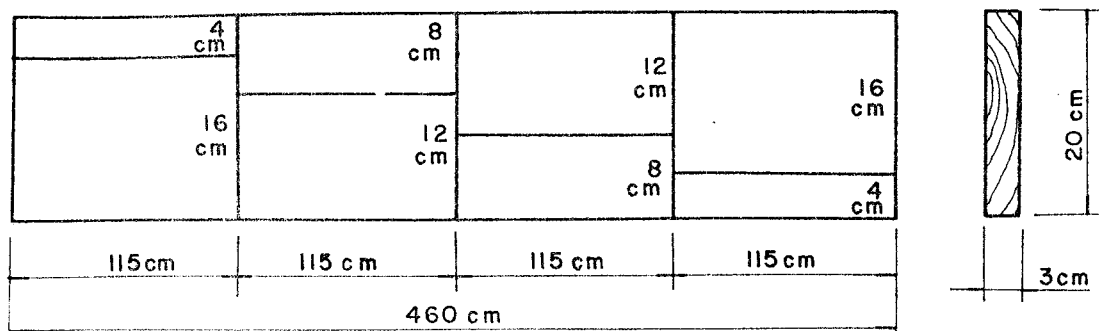


Fig. 35 - Esquema de Retirada dos Corpos de Prova

No QUADRO III, estão os resultados obtidos:

QUADRO III. Relação das Tensões de Ruptura com as Alturas das Peças

h (cm)	σ_f^R (kgf/cm ²)
4	803
8	746
12	630
16	574

2.2.2. Formas de ruptura

Uma viga de madeira, isenta de defeito, solicitada à flexão e/ou cisalhamento, apresenta padrões típicos de ruptura. BODIC e JAYNE (1982), interessados neste estudo, reuniram várias formas de ruptura à flexão estática, ilustradas na figura 36.

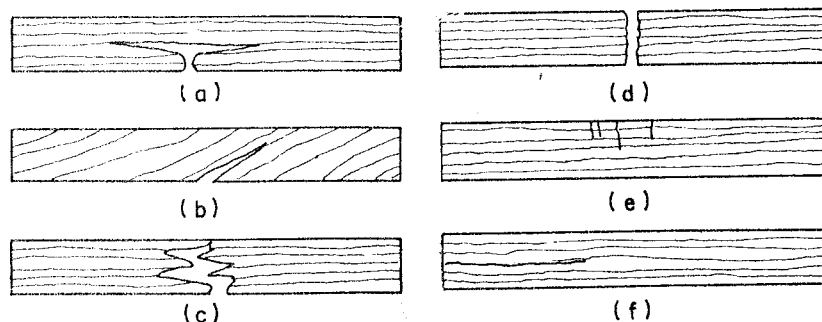


Fig. 36 - Formas de Ruptura: a)Tração: Simples b)Tração segundo Fibras c)Tração: Fragmentação d)Tração: Separação e)Compressão f)Cisalhamento Horizontal

Em peças de madeira com defeitos, como nós, inclinação acentuada de fibras, acúmulo de resinas, etc, é observada uma variabilidade ampla de forma de ruptura.

Pela complexidade da distribuição de tensões em alguns destes pontos ou destas regiões de descontinuidade macroscópica do material, e também pelo fato da madeira ter uma estrutura interna heterogênea, somente informações limitadas são extrapoladas a partir das formas de ruptura de peças isentas de defeitos, para peças com defeitos.

Existem muitas formas de ruptura associada, por exemplo, a ocorrência de nós na madeira, como ilustra a figura 37.

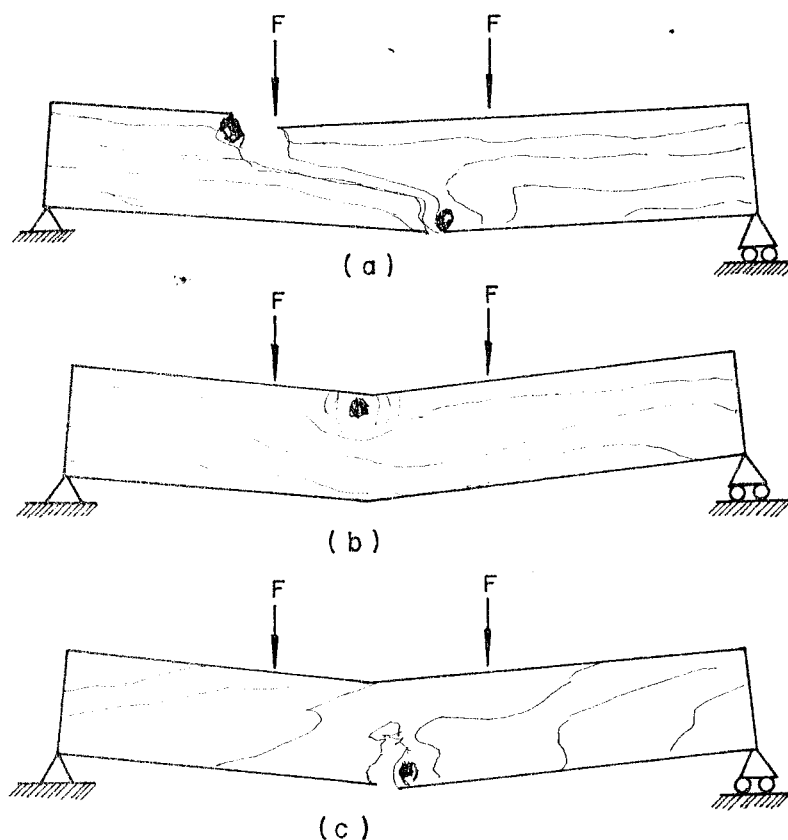


Fig. 37 - Formas de Ruptura Associada à Presença de Nós

A análise das teorias de Weibull, 1923 e Griffith (apud BODIG e JAYNE, 1982), a respeito do desenvolvimento do mecanismo de ruptura, a partir de elementos volumétricos como os nós de madeira, não é objetivo desta revisão bibliográfica nem deste trabalho.

2.2.3. Métodos de Ensaio para determinação da resistência da madeira à flexão estática

Os métodos de ensaio para determinação da resistência da madeira à flexão se baseiam nos resultados de ensaios de pequenos corpos de prova, isentos de defeitos.

Como já citado no item 2.1.3.2., em alguns países mais dedicados ao estudo e ao uso da madeira para fins estruturais mais amplos, realizam-se ensaios em peças de dimensões estruturais, para uma avaliação direta e conclusiva da resistência à flexão, expresso pelo módulo de ruptura à flexão.

Alguns dos principais métodos de ensaio para avaliação do valor da resistência à flexão são descritas a seguir:

2.2.3.1. Módulo de Ruptura à Flexão

NBR 6230 (Brasil)

- . Notação: para módulo de ruptura à flexão: σ_f
- . Corpo de Prova:
Dimensões: $(2 \times 2 \times 30) \text{ cm}^3$
- . Número de Corpos de Prova:
80 (oitenta), sendo 40 com umidade acima do ponto de saturação das fibras e 40 secos ao ar.
- . Esquema de Ensaio:

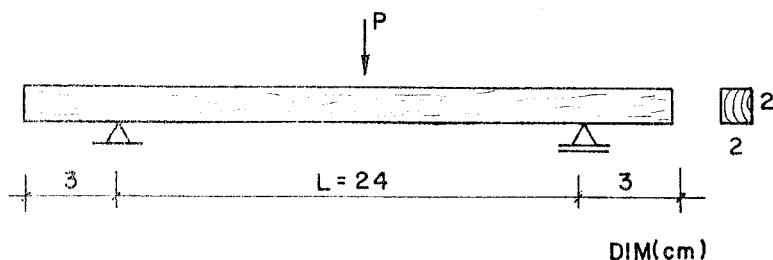


Fig. 38 - Esquema de Ensaio e Ilustração do Corpo de Prova

. Cálculo:

Para a peça de seção transversal quadrada:

$$\sigma_f = \frac{3}{2} \frac{P L}{bh^2} \quad (2.72)$$

com correção dos resultados dos ensaios dos corpos de prova secos ao ar, para 15% de umidade.

DIN 52 186 (Alemanha Ocidental)

. Notação: para módulo de ruptura à flexão: σ_B

. Corpo de Prova:

Dimensões: $b = h = (20 \pm 1)$ mm

Comprimento do Corpo de Prova: $L = l + 3h$

Distância entre os apoios $> 15h$

. Esquema de Ensaio:

Ver item 2.1.3.2.1., DIN 52 186

. Cálculo:

- Para o esquema de ensaio com carga central:

$$\sigma_B = \frac{3F l}{2bh^2} \quad (2.73)$$

- Para o esquema com duas cargas:

$$\sigma_B = \frac{3F (l - l')}{3bh^2} \quad (2.74)$$

BS 5820 (Inglaterra)

. Notação: para módulo de ruptura à flexão: f_m

. Corpo de Prova:

Dimensões: $(b \times d)$ mm, sem valores fixos

Comprimento do Corpo de Prova: $18 \times d + 150$ mm

Distância entre os apoios: $18d$

. Esquema de Ensaio:

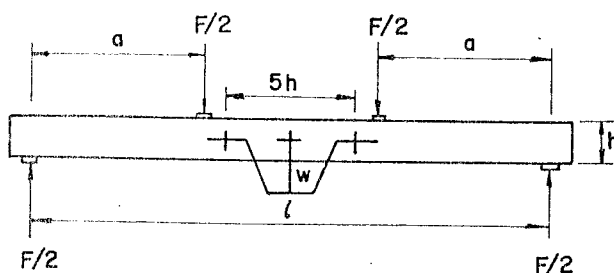


Fig. 39 - Esquema de Ensaio para Determinação de f_m

. Cálculo:

$$f_m = \frac{F_{\max} a}{2w} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (2.75)$$

sendo: w = o módulo de resistência

ASTM D143 - Flexão estática em pequenos corpos de prova (Estados Unidos)

. Notação: para módulo de ruptura à flexão: MOR

. Corpo de Prova:

Ver item 2.1.3.2.1., ASTM D143

. Esquema de Ensaio:

Ver item 2.1.3.2.1., ASTM D143

. Cálculo:

$$\text{MOR} = \frac{3}{2} \frac{P L}{bh^2} \quad (2.76)$$

sendo: P = carga na ruptura (lb)

- ASTM D198 - Flexão Estática em peças de dimensões estruturais

. Notação: para módulo de ruptura à flexão: MOR

. Corpo de Prova:
Ver item 2.1.3.2.1., ASTM D198

. Esquema de Ensaio:
Ver item 2.1.3.2.1., ASTM D198

. Cálculo:

$$\text{MOR} = \frac{3 Pa}{bh^2} \quad (2.77)$$

sendo: P = carga na ruptura (lb)

AFNOR - B5-28 (França)

. Notação: para módulo de ruptura à flexão: F_H

. Corpo de Prova:
Dimensões: b = h = 2,0 cm
Comprimento do Corpo de Prova: 30 cm
Distância entre os apoios: $(28 \pm 0,1)$ cm

. Esquema de Ensaio:

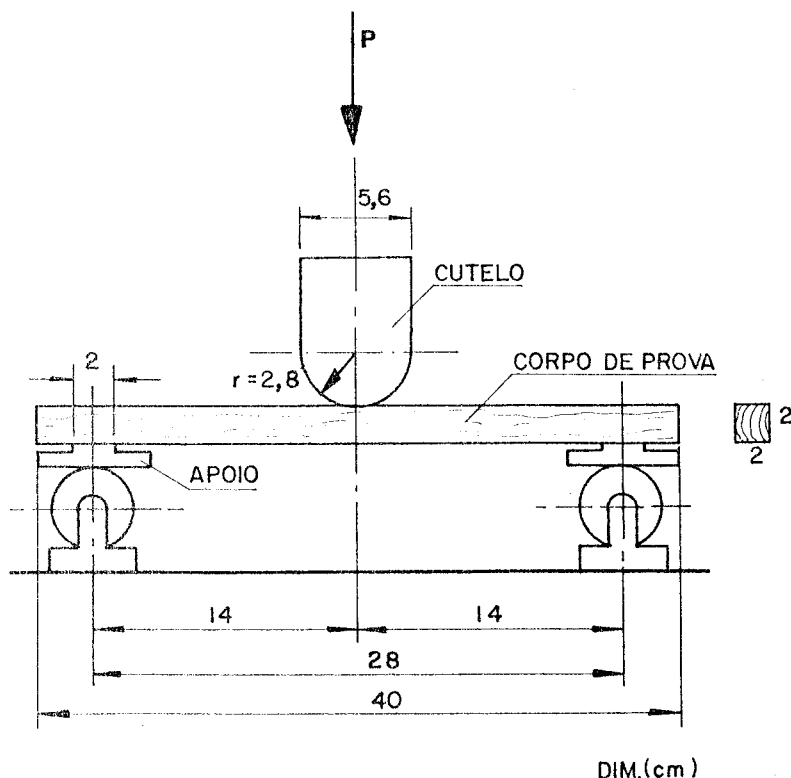


Fig. 40 - Esquema de Ensaio para Flexão Estática

. Umidade:

$$U = 20\%$$

. Cálculo:

$$F_H = \frac{3 P \ell}{2bh^{10/6}} \quad (2.78)$$

sendo: P = carga de ruptura (kgf)

A resistência de flexão é dada pela expressão reduzida por Monnin.

LNEC - (Laboratório Nacional de Engenharia Civil) - E.74 (Portugal)

. Notação: para módulo de ruptura à flexão: σ_{fH}

. Corpo de Prova:

Idem AFNOR - B5-28

. Esquema de Ensaio:

Idem AFNOR - B5-28

. Umidade:

O teor de umidade varia entre 9% e 15%

. Cálculo:

$$\sigma_{fH} = \frac{3 F \ell}{2bh^{10/6}} \quad (2.79)$$

Fórmula de Monnin (ver equação 2.78)

2.3. Relações entre parâmetro elástico e de Ruptura da madeira

Em projeto de estruturas de madeira, as tensões de projeto devem ser previstas para uma máxima economia e para uma segurança adequada, como é característico da engenharia.

Os valores básicos das propriedades mecânicas (resistência, módulo de elasticidade, etc) têm sido obtidos, de um modo geral, a partir dos resultados do ensaio de pequenos corpos de prova, isentos de defeitos. Em alguns países como Canadá e Estados Unidos, estes valores básicos são ajustados para conter a influência: da variabilidade dos resultados dos ensaios; da duração da carga; das cargas acidentais; dos defeitos existentes nas peças de dimensões estruturais e de quaisquer outros ajustamentos pertinentes ao projeto de estruturas de madeira. Em outros países, como o Brasil, estes valores básicos são reduzidos por coeficientes, chamados de segurança ou de ponderação, obtendo-se as tensões admissíveis.

A classificação visual, prescrita na ASTM 245, segundo WALTERS e REISS (1977), não é tão precisa ou segura, e a classificação mecânica desenvolvida a partir de testes não destrutivos, com um método alternativo, requer equipamentos especiais. De acordo com GALLIGAN (1977), a classificação visual tem suficiência entre os projetistas americanos. A partir destas considerações outras soluções foram e são investigadas.

É reconhecido internacionalmente o parâmetro elástico - módulo de elasticidade longitudinal - como um bom estimador do valor da resistência da madeira. Ylinen, 1943 (apud KOLLMANN e CÔTÉ, 1967) já tinha obtido a seguinte relação:

$$\frac{\sigma_{f1}}{E_1} = \frac{\sigma_{f2}}{E_2} = \epsilon = \text{cte} \quad (2.80)$$

e o seguinte gráfico:

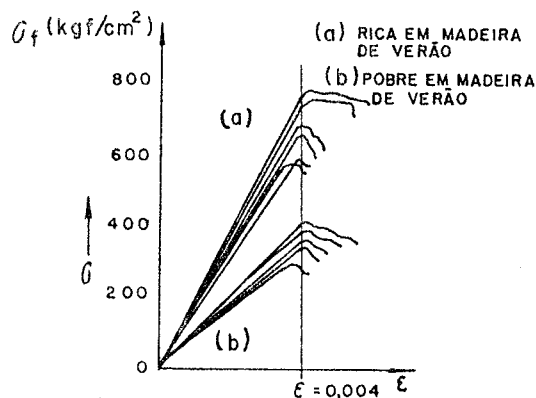


Fig. 41 - Relação entre Parâmetros de Ruptura e de Elasticidade

Dentre muitos trabalhos, citam-se os desenvolvidos por: JOHNSON (1965), WALTERS e REISS (1977), GALLIGAN (1977), AMANTINO (1978), ATHERTON (1980).

Os trabalhos desenvolvidos concentram-se na realização de uma grande quantidade de ensaios de corpos de prova padronizados para avaliação de E e de MRF, e posteriormente constatar as relações existentes entre os parâmetros avaliados.

Walter e Reiss, chegaram à seguinte relação linear entre MOR e MOE, realizando ensaios segundo ASTM D198, para 600 peças de madeira da espécie Red Oak (*Quercus borealis*) e 300 para a espécie Cotton Wood (*Populus deltoides*).

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{MOR} = 5470 + 3.230 \text{ MOE} \\ \text{MOR} = 3000 + 3.231 \text{ MOE} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (2.81) \\ (2.82) \end{array}$$

Com MOR e MOE em psi e em psi/1000.

É interessante ressaltar que o coeficiente de correlação (R^2) para equações (2.81) e (2.82) foi de 0,41 e 0,51 e os pesquisadores consideraram satisfatórios os valores obtidos, devido à grande viabilidade do material, expresso pelo coeficiente de variação (δ) igual a 22%.

Atherton obteve melhores resultados para a espécie Douglas Fir (*Pseudotsuga menziesii*). Apresenta vários gráficos relacionando linearmente MOR e MOE, como apresentado por um destes gráficos, figura 42.

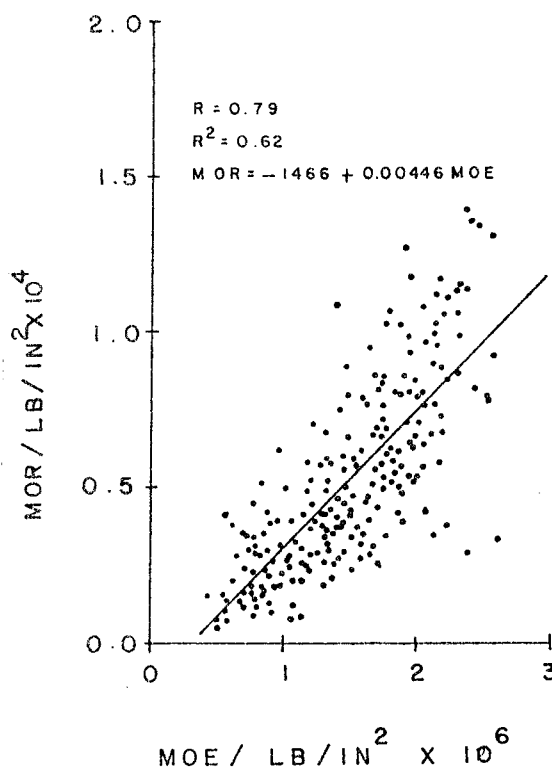


Fig. 42 - Relação entre MOR e MOE - (Douglas fir)

com:

$$\begin{aligned} \text{MOR} &= -1466 + 0,00446 \text{ MOE} & (2.83) \\ R^2 &= 0,62 \end{aligned}$$

HOYLE (1968), agrupou uma s\u00e9rie de valores de coeficientes de correla\u00e7\u00e3o R^2 , segundo o modelo mais adotado, o modelo linear: $y = Ax + B$, para os par\u00e2metros MOR e MOE, de diversas publica\u00e7\u00f5es e apresentou o seguinte quadro, onde mostra a gama de variabilidade existente para R^2 .

QUADRO IV. Modelo de Regress\u00e3o Linear e Varia\u00e7\u00e3o de R^2

Modelo de Regress\u00e3o	R^2	N\u00b0 de Investigadores
$y = Ax + B$	0,57 - 0,87	12
	0,70 - 0,88	6
$(\text{MOR}) = A(\text{MOE}) + B$	0,59 - 0,84	6
	0,77 - 0,95	8

No LaMEM, alguns trabalhos atentaram para a import\u00e2ncia da ado\u00e7\u00e3o do estimador E para prever o valor de MRF: LARA PINTO e ROCCO LAHR (1983).

Destacam-se tamb\u00e9m os trabalhos de FURIATI (1981) e MELLO (1984), o primeiro utilizando-se do valor de E obtido por ensaio de flex\u00e3o simples, na constru\u00e7\u00e3o, chamado "ensaio de obra", para classifica\u00e7\u00e3o das pecas, e o segundo atrav\u00e9s de ensaios n\u00e3o destrutivos, utilizando-se da m\u00e1quina de classifica\u00e7\u00e3o (Stress Grading Machine) para classifica\u00e7\u00e3o mec\u00e2nica de pecas de madeira.

2.4. Distribui\u00e7\u00e3o de frequ\u00eancia de par\u00e2metro de Ruptura e Elasticidade

Para descrever uma s\u00e9rie de resultados de testes \u00e9 necess\u00e1rio conhecer-se a fun\u00e7\u00e3o de distribui\u00e7\u00e3o de uma vari\u00e1vel qualquer X, associada a um fen\u00f4meno considerado.

A distribui\u00e7\u00e3o de Gauss ou Normal tem sido a distribui\u00e7\u00e3o mais aceita para representar a variabilidade do par\u00e2metro de elasticidade e de ruptura da madeira. Essa distribui\u00e7\u00e3o \u00e9 definida pela seguinte fun\u00e7\u00e3o de densidade de probabilidade:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_x} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_x^2} (x - \mu_x)^2 \right] \quad (2.84)$$

válido para $\sigma_x > 0$, no intervalo $-\infty < x < \infty$, onde:

$f(x)$ = densidade de probabilidade

μ_x = valor médio da distribuição

$\sigma = \sigma_x$ = desvio padrão da distribuição

Fazendo-se uma mudança da variável, do tipo:

$$u = \frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \quad (2.85)$$

obtem-se a forma reduzida da distribuição normal:

$$f(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{1}{2} u^2 \right) \quad (2.86)$$

obtem-se

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(u) du = 1 \quad \text{com} \quad \mu_u = 0 \quad \text{e} \quad \sigma_u^2 = 1$$

A figura 43 mostra a curva da equação (2.85)

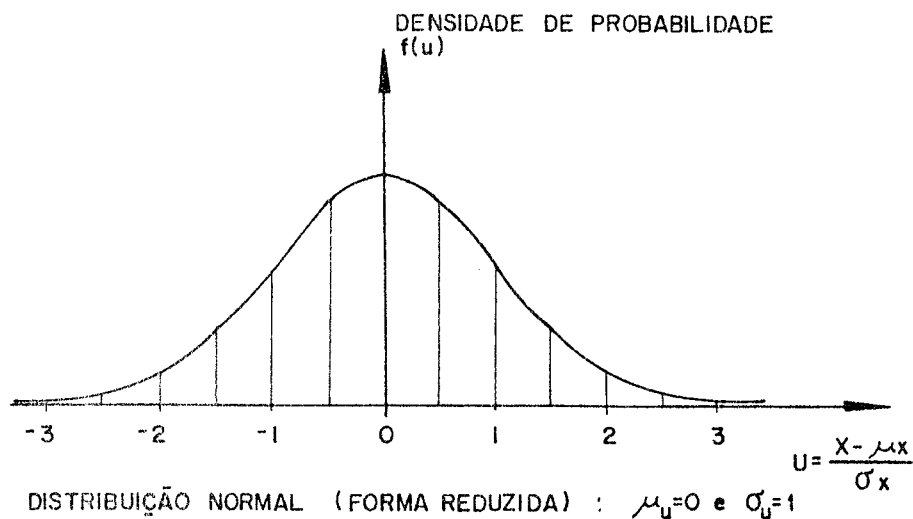


Fig. 43 - Distribuição Normal - (Forma Reduzida)

Inúmeros pesquisadores apresentam a distribuição normal como a representante da distribuição de resultados de ensaios em pequenos corpos de prova, isentos de defeitos, ou para resultados de testes em peças para construção ou ainda para uso geral.

MATEUS (1962), apresenta gráficos de distribuição de frequência de MOR e MOE, sugerindo aproximação para a distribuição normal, como indicado na figura 44.

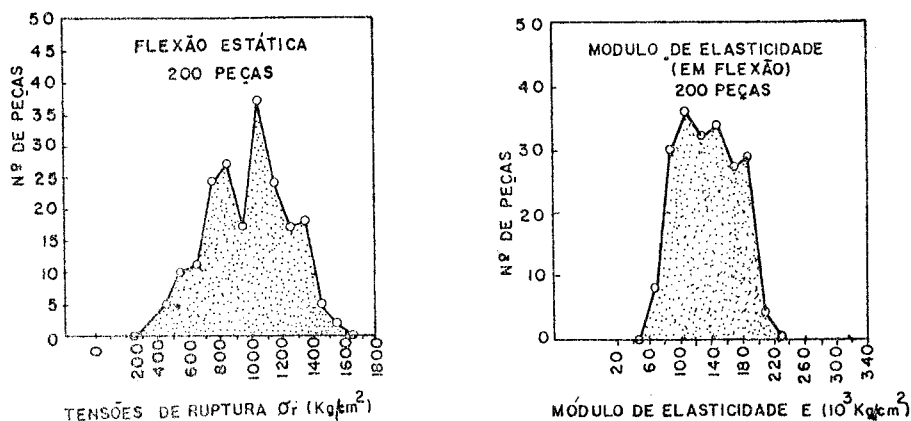


Fig. 44 - Distribuição de Frequência de Parâmetros de Ruptura e de Elasticidade - MATEUS (1962)

Segundo JOHNSON (1965), a distribuição de frequência para módulo de elasticidade longitudinal (MOE) e módulo de ruptura (MOR), para a espécie Douglas fir, é considerada normal, figura 45.

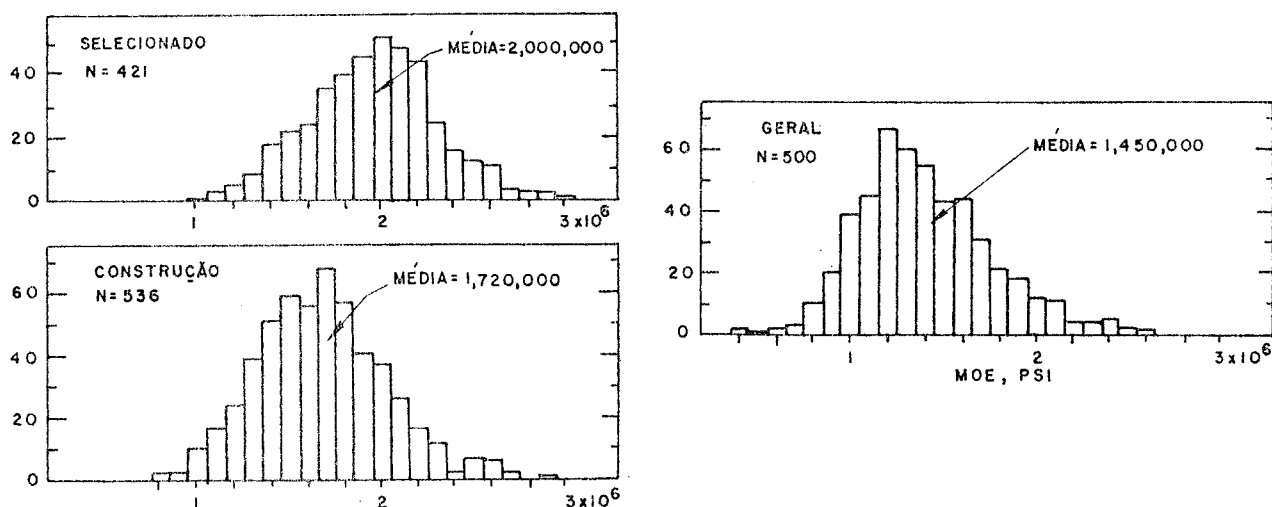


Fig. 45 - Distribuição de Frequência para MOE para 3 classes de utilização

OZELTON e BAIRD (1976), mostram a tendência para a distribuição normal dos resultados para o módulo de elasticidade longitudinal e para o módulo de ruptura. Na figura 46, é apresentada a distribuição dos resultados do módulo de ruptura, sendo para o módulo de elasticidade o mesmo tipo de distribuição.

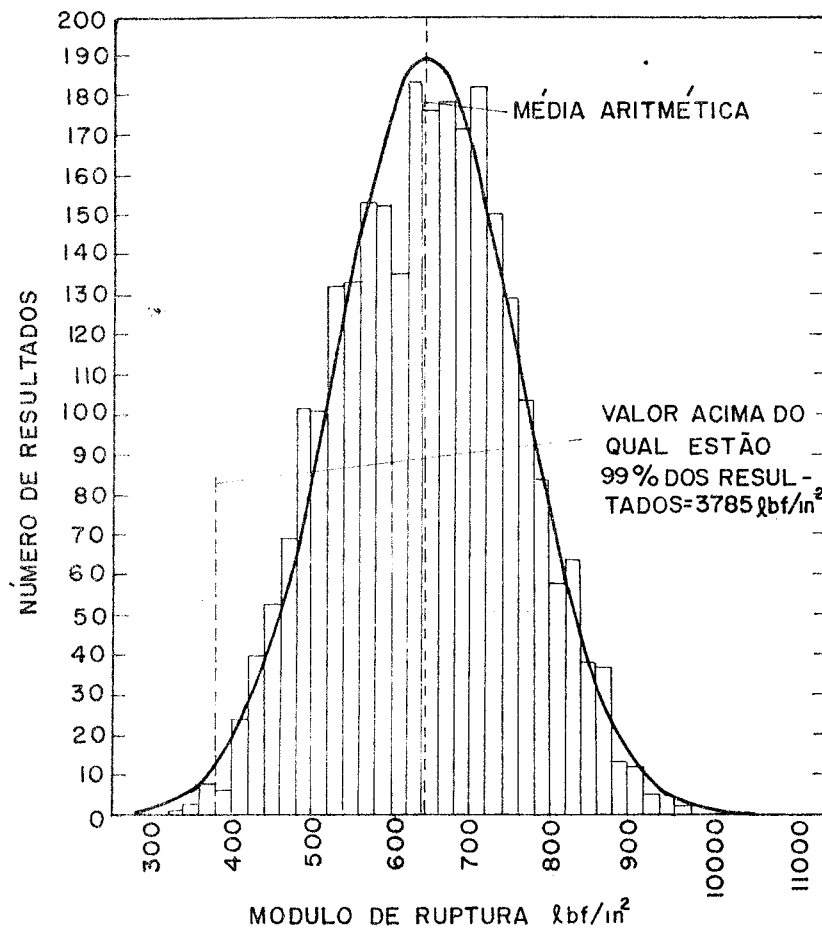


Fig. 46 - Distribuição de Frequência para o Módulo de Elasticidade

AMANTINO (1978), apresenta também histogramas, para MOE e MOR, para madeiras de dimensões estruturais.

Na figura 47 é mostrado o histograma de MOE,

sendo o de MOR com semelhante histograma.

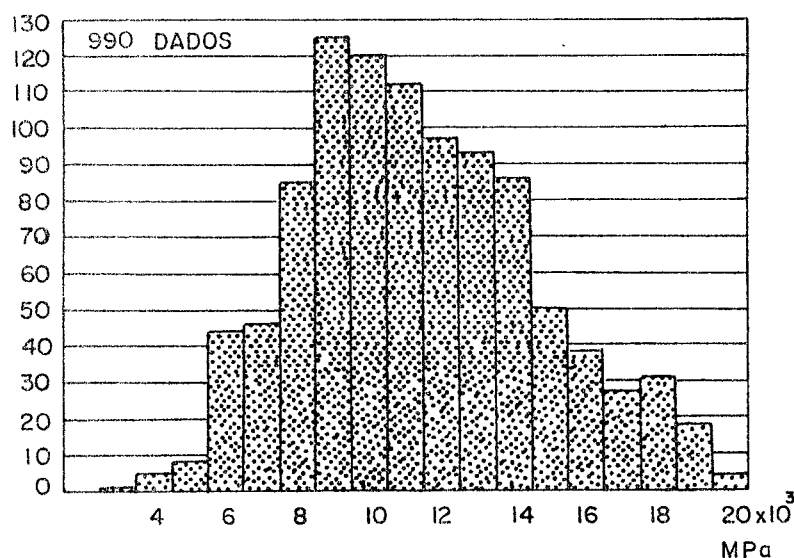


Fig. 47 - Histograma do Módulo de Elasticidade Longitudinal

BODIG e JAYNE (1982), admitem a variabilidade dos resultados em testes de pequenos corpos de prova como aproximadamente normal.

2.5. Considerações a respeito do dimensionamento de Estruturas de madeira

O dimensionamento de estruturas de madeira tem sido feito, em alguns países, inclusive no Brasil, pelo método das tensões admissíveis. Por encontrar-se a engenharia em constante evolução, em busca de métodos que retratem mais verdadeiramente a segurança estrutural, pode-se prever a substituição deste método pelos métodos semi-probabilístico e probabilístico.

2.5.1. Métodos das tensões admissíveis

De acordo com este método determinístico, a segurança das estruturas é feita através de um coeficiente de segurança γ_m , impondo-se que as máximas tensões atuantes em serviço não ultrapassem o valor da resistência do material, dividido por γ_m , estabelecido para cada tipo de material e para cada tipo de solicitação. O quociente da resistência do material

por γ_m recebe o nome de tensão admissível e é formulado por:

$$\sigma_{adm} = \frac{f}{\gamma_m} \quad (2.87)$$

Como o coeficiente γ_m é aplicado às tensões, é definido como coeficiente de segurança interno.

De acordo com este método, as maiores tensões que podem aparecer durante a utilização da estrutura, não devem ultrapassar às correspondentes admissíveis, ou, algebricamente:

$$\sigma_{max} \leq \sigma_{adm} \quad (2.88)$$

No Brasil, este método é indicado pelo itens 20,51 e seguintes da NBR 7190. A tensão σ_{adm} é a média aritmética das tensões de ruptura em pequenos corpos de prova padronizados pela NB 6230. Para a flexão estática o coeficiente de segurança vale $\gamma = 6,67$

É de fundamental importância ressaltar que este método não considera a variabilidade da resistência das peças ensaiadas em laboratório; não considera também a variabilidade das peças realmente utilizadas nas estruturas; não considera o efeito de duração das cargas, o efeito da variação do teor de umidade, da altura e da forma da seção transversal da peça e de possíveis defeitos.

2.5.2. Métodos adotados em Normas Internacionais

As principais normas internacionais, destacando-se a norma canadense "National Building Code of Canada" (apud MADSEN, 1975) normas americanas NDS e AITC, o código europeu de estruturas da madeira 9B, e a norma inglesa CP 112 (apud OZELTON e BAIRD, 1976), evoluíram em relação ao dimensionamento das estruturas de madeira pelo método das tensões admissíveis, se preocupando com o lado probabilístico das tensões de cálculo e da resistência do material.

De uma maneira geral estas normas são semelhantes à norma canadense, a qual apresenta para a flexão o critério para determinação da segurança estrutural, descrito e analisado por MADSEN (1975):

- as tensões de segurança do material à flexão são baseadas em ensaios de pequenos corpos de prova, isentos de defeitos. Os resultados destes ensaios são ajustados por fatores indicativos da variabilidade do material, da duração de carga, da variação do teor de umidade, da variação das dimensões da seção, da classificação visual e de um coeficiente de segurança:

$$\sigma_{\text{allowable bending}} = (\bar{x} - 1,645 s) \times F_{\text{time}} \times F_{\text{moisture}} \times F_{\text{height}} \times F_{\text{grade}} \times (1/F_{\text{safety}}) \quad (2.89)$$

2.5.2.1. Análise dos termos da equação (2.89):

2.5.2.1.1. Termo $(\bar{x} - 1,645 s)$: \bar{x} é a média dos resultados dos ensaios de pequenos corpos de prova e s o desvio-padrão. A distribuição adotada é a de Gauss ou Normal.

O quantil 5% está associado à probabilidade de 95% dos valores de x serem maiores que $(\bar{x} - 1,645 s)$. A figura 48 ilustra este fato:

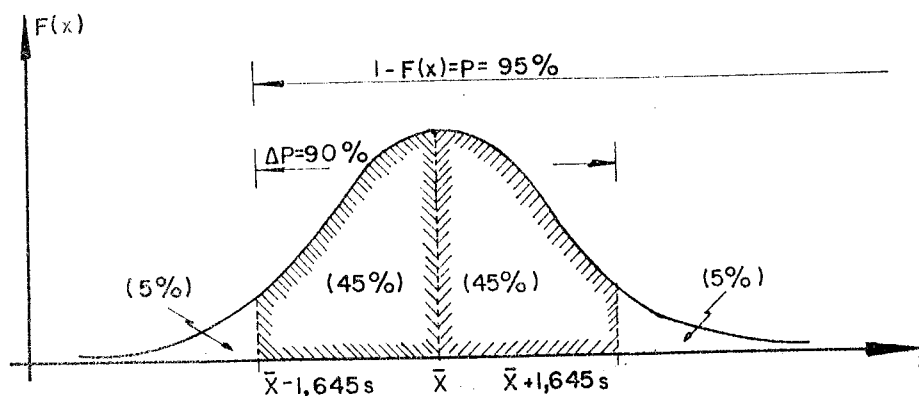


Fig. 48 - Distribuição Normal, Limitação Unilateral e Bilateral

Considera-se ainda um coeficiente de variação δ de 15%.

2.5.2.1.2. F_{time} Duração da carga

Tem sido constatado através de ensaios em pequenos corpos de prova, que existe uma redução na resistência da madeira em função do tempo de duração da carga. Trabalhos de Wood (1947 - 1951), (apud MATEUS, 1961), apresentados em várias normas, como a NDS (Apêndice B), relatam este fenômeno, através de um gráfico, apresentado na figura 49:

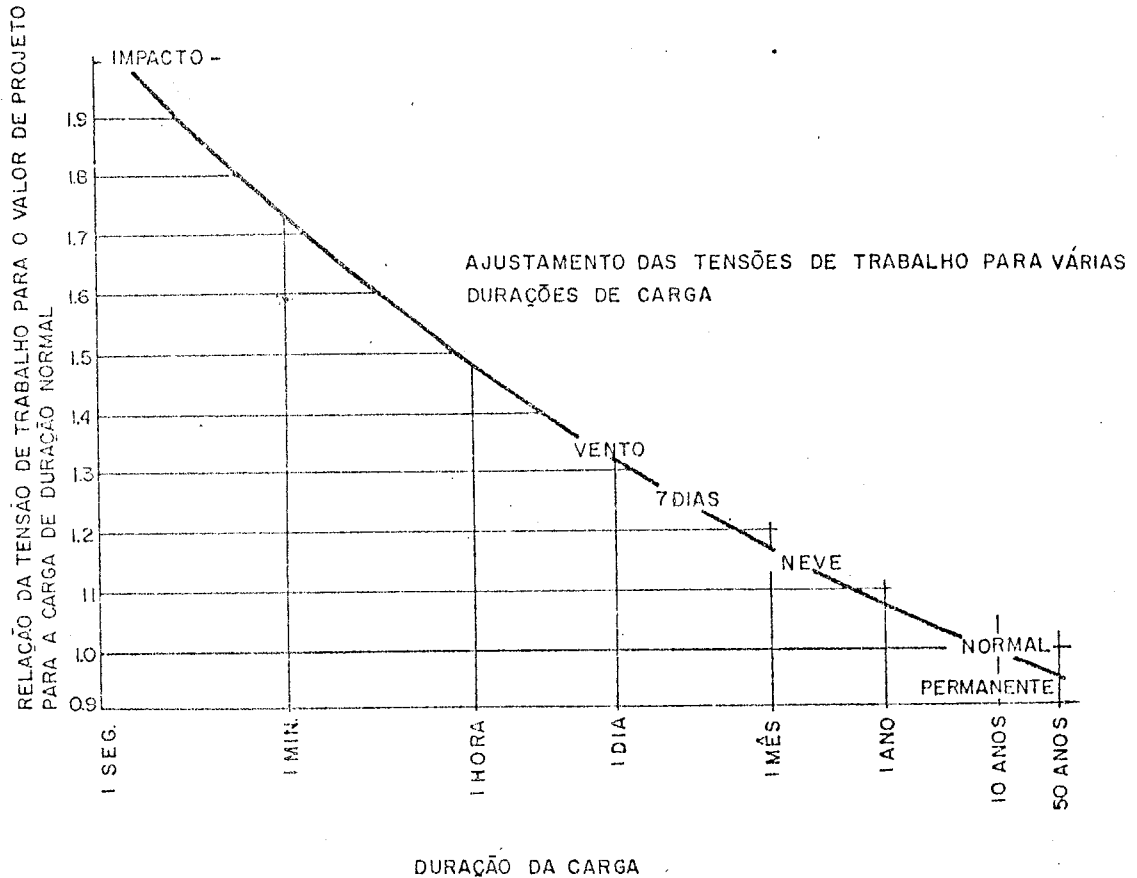


Fig. 49 - Ajustamento das Tensões de Trabalho para as Várias Durações de Carga

Os fatores de ajuste podem ser estimados através deste gráfico. A carga mantida durante um período de 10 anos é considerada normal e o fator de ajuste é neste caso 1,0.

2.5.2.1.3. $F_{moisture}$ Fator de Umidade

Este fator quantifica a influência do teor de umidade na resistência da madeira.

As tabelas de resistência da madeira são publicadas considerando-se o conteúdo de umidade da madeira seca ao ar e da madeira saturada. Para outros teores de umidade há necessidade deste fator de correção.

2.5.2.1.4. F_{height} Fator de Altura

Este fator ajusta a diferença existente entre os resultados obtidos nos ensaios de pequenos corpos de prova em dimensões estruturais. Considerações feitas por BOHANNAN (1968), foram adotadas pela NDS e pela AITC.

2.5.2.1.5. F_{grade} Fator de Classificação

Este fator está relacionado a influência dos defeitos na resistência. No Canadá foram adotadas as "Standard Grading Rules for Canada Lumber". Nos Estados Unidos é adotado o método ASTM D245-74.

2.5.2.1.6. F_{safety} Fator de Segurança

Este fator final vale para flexão 1,30. Este valor parece ser numericamente pequeno, mas em cada um dos fatores descritos existe uma segurança implícita, a qual no conjunto reduz bastante a resistência média da madeira. Além disto é pouco provável a ocorrência simultânea em uma estrutura das piores condições de trabalho, como por exemplo, existir uma peça com os máximos defeitos, cargas de longa duração, condição não favorável de umidade etc.

Vários países, entre os quais se destaca o Canadá, estão adotando para as madeiras conceitos recentes de segurança estrutural, como esclarece ALLEN (1974). A passagem dos atuais métodos determinísticos, ou com alguns conceitos probabilísticos ou semi-probabilísticos, é um dos grandes desafios enfrentados na atualidade pelos calculistas das estruturas de madeira.

2.5.3. Método probabilístico

Este método considera as variáveis envolvidas na verificação da segurança como grandezas aleatórias.

A condição de segurança \bar{e} expressa por:

$$R > S \quad (2.90)$$

sendo: R \bar{e} a capacidade resistente

S \bar{e} o nível de sollicitação da estrutura

Se R e S são determinados por um única variável Z , a condição de segurança vale:

$$Z_R > Z_S \quad (2.91)$$

No método probabilístico, a medida de segurança \bar{e} a probabilidade de ruína, isto \bar{e} :

$$P_{\text{ruína}} = P \left\{ Z_R \leq Z_S \right\} \quad (2.92)$$

Como na atual fase de conhecimento \bar{e} impossível calcular as probabilidades de ruína, segundo considerações de Fusco (1976), \bar{e} por demais interessante estudar outros métodos para estimar segurança, principalmente para estruturas de madeira.

2.5.4. Método semi-probabilístico

As idéias básicas deste método definem que as ações e as sollicitações em seus valores limites tenham pouca probabilidade de serem alcançadas e que os valores limites de resistência do material tenham pouca probabilidade de serem alcançados.

Define-se valor característico de uma ação F , o valor de F_k tal que somente \bar{e} ultrapassado em 5% dos casos, como mostra a figura 50:

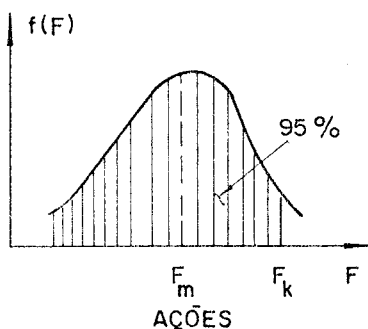


Fig. 50 - Representação Gráfica do Valor Característico de uma Ação F

e formulado por:

$$F_k = (1 + 1,645 \delta) F_m \quad (2.93)$$

A partir da ação característica, definem-se as ações de cálculo F_d e valem:

$$F_d = \gamma_f F_k \quad (2.94)$$

sendo: γ_f o coeficiente de ponderação das ações definido pela ABNT - Projeto de Norma "Ações e Segurança nas Estruturas".

De modo análogo, pode-se definir as solicitações de cálculo a partir dos F_k e dos coeficientes de ponderação das ações γ_f e valem:

$$S_d = S(\gamma_f F_k) \quad (2.95)$$

Finalmente é estabelecida a resistência característica f , como sendo o valor da resistência com apenas 5% de probabilidade de não ser alcançado. Usualmente utiliza-se o valor inferior de distribuição de frequência mostrada na fig. 51.

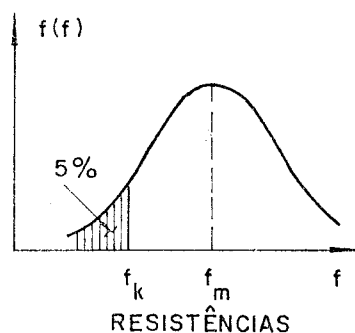


Fig. 51 - Representação Gráfica do Valor da Resistência Característica

e formulada por:

$$f_k = (1 - 1,645 \delta) f_m \quad (2.96)$$

E a resistência de cálculo vale:

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_m} \quad (2.97)$$

sendo: γ_m o coeficiente de ponderação das resistências.

A condição de segurança é elaborada por:

$$S_d \leq R_d \quad (2.98)$$

sendo R_d o esforço solicitante resistente, função de f_d e outros fatores.

2.5.5. Aspectos determinísticos e probabilísticos aplicados ao módulo de elasticidade longitudinal

Os valores do módulo de elasticidade longitudinal (E), utilizados em projetos de estruturas de madeira, geralmente são encontrados em tabelas publicadas por instituições idôneas de pesquisa. Estes valores são as medidas dos resultados experimentais relativos a solicitações de compressão, tração ou flexão. A norma brasileira, NBR 7190, indica em seus itens 47 e 48, que o valor de E adotado para projeto, deve ser aquele obtido através do método brasileiro de ensaios físicos e mecânicos, NBR 6230, item 11. A norma americana NDS indica tabelas para E , obtidos em ensaios realizados segundo os métodos americanos: ASTM D143, ASTM D198 e ASTM D2555. As outras normas seguem este padrão de procedimento para os projetos de estruturais de madeira.

Estes resultados de E são valores determinísticos ou modificados por fatores de ajustamentos. Estes são dependentes de condições relacionadas com o material (densidade, umidade, defeitos), de condições relacionadas com o ambiente (temperatura, umidade relativa) e de condições relacionadas com duração do carregamento (permanente, acidental). Algumas normas, como a inglesa; CP 112 (*apud* OZELTON e BAIRD, 1967), americana (NDS), já incluem alguns conceitos probabilísticos nos valores de E .

2.5.6. Alguns fatores que afetam o valor de E

Estudos realizados por Liska, 1950 (*apud* MATEUS, 1961) revelam a não influência da duração da carga em E , mesmo por períodos longos de atuação da carga.

No entanto, a NDS, no seu item 4.2.4 e em seu apêndice F, indica, por segurança, fator de ajustamento para γ_m de carga, alterando o valor de E .

BODIG e JAYNE (1982), apresentam critérios diferenciados para peças onde há riscos de ocorrência de efeitos de segunda ordem, devidos à deformação da peça e ao tipo de ação à qual está submetida. Caso típico é uma peça sujeita à compressão axial, onde há possibilidade de deformações ao longo do tempo e conseqüente introdução de solicitações de segunda ordem. O valor de E para projeto seria então dado pela expressão:

$$E = K_5 K_p K_S \bar{E} \quad (2.99)$$

sendo: K_p = fator de ajustamento para dimensões d
 K_S = fator de segurança
 K_5 = fator de ajustamento para quantil de 5% de exclusão para E
 \bar{E} = média dos resultados experimentais de E

Portanto a equação (2.99) torna-se:

$$E = K_p K_S \bar{E} (1 - 1,645 \delta) \quad (2.100)$$

sendo: δ = coeficiente de variação

Os valores de K_p e de K_S dependem do δ adotado, valendo para $\delta = 0,25; 0,60$ e $1,66$, respectivamente.

Para o caso da não consideração dos efeitos de segunda ordem, estes autores apresentam a seguinte expressão para E:

$$E = \bar{E} K_t K_p K_d K_g K_m K_S \quad (2.101)$$

onde: K_t, K_p, K_d, K_g, K_m são fatores de ajustamento para duração de carga, dimensões (d = altura da peça), defeitos existentes, classificação visual, umidade na peça, e K_S é um fator de segurança.

No quadro V são apresentados estes valores:

QUADRO V. Valor dos Fatores de Ajustamento (d em polegadas)

Fatores	K_t	K_p	K_d	K_g	K_m			K_S
Valores	1.00	0,94	$(2/d)^{1/9}$	1.0	U < 15%	U < 19%	U > 19%	1.00
					1.20	1.14	1.00	

OZELTON e BAIRD (1976), adotam para E a seguinte expressão:

$$E_N = E_{\text{mean}} - \frac{2,33 \sigma}{\sqrt{N}} \quad (2.102)$$

Para N (número de peças de uma seção transversal) > 4, e

$$E_N = E_{\text{mean}} \quad (2.103)$$

para a $N < 4$

Tanto na expressão (2.102) e (2.103), E_{mean} significa a média dos resultados experimentais de E, σ o desvio padrão da distribuição e o valor 2,33 se refere ao limite de exclusão de 1%. A figura 52 apresenta a distribuição normal para E.

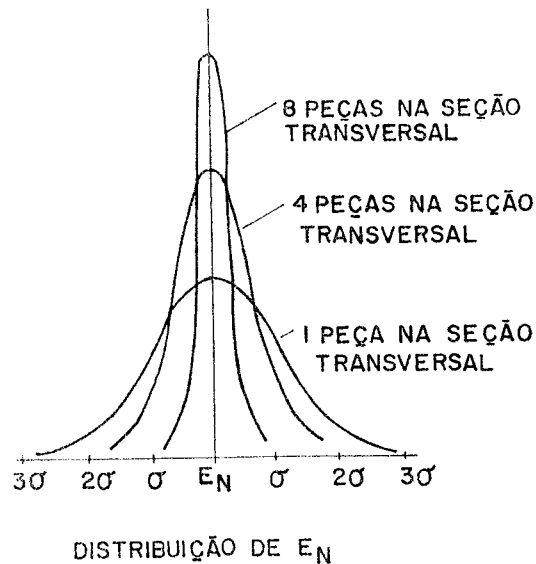


Fig. 52 - Distribuição de Frequência de E_N

KARLSEN (1967), estabelece fatores de ajustes para E, dependendo da condição de exposição da estrutura, permanente ou temporária. É ajustado o valor médio \bar{E} , para exposição permanente, fatores indicados pelo quadro VI.

QUADRO VI Fatores de Ajuste para \bar{E}

Condição de Exposição da Estrutura	Fatores
Submersa em água	0,75
Cravada em solo	0,75
Temperatura entre 35°-50° C	0,80
Carga concentrada	0,80

Para exposição temporária, o fator de ajuste \bar{E} é aplicado para peças submersas em água ou cravado no solo. Para cargas acidentais ou de curta duração, Karlisen não apresenta fatores de ajustamento.

No Brasil, a NBR 7190, em seu item 69a), indica para o módulo de elasticidade longitudinal de peças estruturais submetidas a carregamento permanente o valor:

$$E = \frac{2}{3} E_m \quad (2.104)$$

e, para os demais elementos (submetidos a cargas temporárias) o valor de E_m não sofre alterações.

3. FLEXÃO ESTÁTICA - EXPERIMENTAÇÃO REALIZADA

3.1. Generalidades

A experimentação realizada no decorrer deste trabalho teve por objetivo ensaiar peças de madeira submetidas à flexão estática. Com os resultados obtidos nestes ensaios, tornaram-se possíveis o estudo e a análise dos seguintes tópicos:

- relações entre parâmetros de elasticidade e de ruptura;
- resistência característica de algumas espécies de madeira;
- influência das deformações tangenciais na flecha total de uma viga de madeira;
- comparação entre resultados de ensaios em pequenos corpos de prova (CP) e em corpos de prova (CP) de dimensões estruturais;
- proposta para revisão da NBR 6230 nos itens referentes à flexão estática (itens 10 e 11).

Para execução da experimentação foram empregados os materiais e a metodologia de ensaios descritos nos itens seguintes deste capítulo.

3.2. Material utilizado

3.2.1. Peças com dimensões nominais $2 \times 2 \times 30 \text{ cm}^3$

Os corpos de prova de dimensões $2 \times 2 \times 30 \text{ cm}^3$, indicados pela NBR 6230, item 10, foram retirados de regiões não afetadas de peças, com dimensões nominais de $5 \times 5 \times 120 \text{ cm}^3$ e $6 \times 16 \times 360 \text{ cm}^3$, após os ensaios de flexão estática realizados com estas peças.

As espécies e as quantidades de corpos de prova utilizados foram:

- Peroba Rosa (*Aspidosperma polyneuron*): 74 peças
- Jatobá (*Hymenaea stilbocarpa*): 39 peças
- Peroba do Norte (*Aspidosperma melanocalyx*): 12 peças
- Gonçalves Alves (*Astronium spp*): 6 peças

O teor de umidade adotado para experimentação das peças foi aproximadamente 30%.

3.2.2. Peças com dimensões nominais 5 x 5 x 120 cm³

Os corpos de prova de dimensões nominais 5 x 5 x 120 cm³ foram retirados de vigas e de caibros de dimensões comerciais, adquiridas em diversas serrarias da região de São Carlos-SP e em diversas oportunidades, presumindo-se, assim, reunir amostras aleatorizadas.

As espécies e as quantidades de corpos de prova foram as seguintes:

- Eucalipto Tereticornis (*Eucalyptus tereticornis*): 33 peças
- Jatobã (*Hymenaea stilbocarpa*): 45 peças
- Peroba Rosa (*Aspidosperma polyneuron*): 136 peças
- Peroba do Norte (*Aspidosperma melanocalyx*): 18 peças
- Gonçalves Alves (*Astronium spp*): 6 peças

As peças de Peroba do Norte e de Gonçalves Alves foram adquiridas de um único lote de madeira, em apenas uma ocasião. Com efeito, o campo amostral destas duas espécies se restringem apenas à aleatorização da amostra, não influenciando o parâmetro tempo.

O teor de umidade das peças para experimentação foi também aproximadamente 30%.

3.2.3. Peças com dimensões nominais 6 x 6 x 360 cm³

Os corpos de prova de dimensões nominais 6 x 6 x 360 cm³, também denominados neste trabalho de peças de dimensões estruturais, foram adquiridas em diversas serrarias da região de São Carlos-SP, em várias oportunidades no ano de 1984.

A espécie de madeira escolhida para realização dos ensaios foi a Peroba Rosa, com seleção ocasional de seis exemplares.

O teor de umidade das peças para a experimentação também foi de aproximadamente 30%.

3.3 Equipamentos utilizados

3.3.1. Nos ensaios das peças com dimensões nominais 2 x 2 x 30 cm³

. Máquina Universal de ensaio AMSLER, capacidade de 25 tf.

3.3.2. Nos ensaios das peças com dimensões nominais
5 x 5 x 120 cm³

- . Máquina Universal de ensaio AMSLER, capacidade para 25 tf
- . Relógios Comparadores MITUTOYO, precisão 0,01 mm, curso de 10 mm até 50mm

3.3.3. Nos ensaios das peças com dimensões nominais
6 x 16 x 360 cm³

- . Macaco Hidráulico VICKERS, capacidade 5 tf
- . Anel Dinamométrico E.L.E., capacidade 5 tf
- . Relógio Comparador MITUTOYO, precisão 0,01, curso de 50 mm

3.4. Metodologia dos ensaios

Foram adotados quatro esquemas de ensaio de flexão estática durante a realização da parte experimental deste trabalho.

3.4.1. Esquema de ensaio (A)

Este esquema foi utilizado na experimentação dos corpos de prova de 2 x 2 x 30 cm³ (item 3.2.1.)

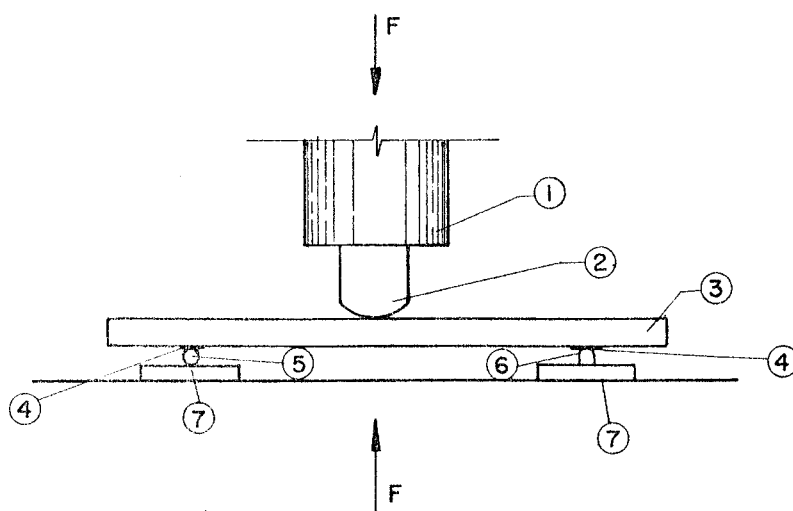


Fig. 53 - Esquema de Ensaio - A

Legenda:

- 1 - Sistema de Carregamento
- 2 - Cutelo
- 3 - Corpo de Prova
- 4 - Placa
- 5 - Apoio Móvel
- 6 - Apoio Fixo
- 7 - Placa de Apoio

3.4.1.1. Esquema estático

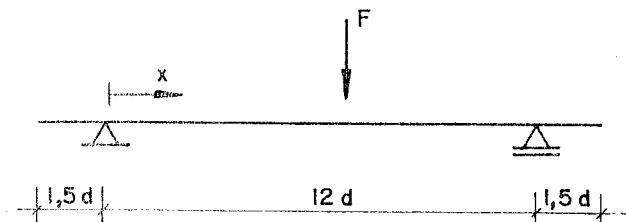


Fig. 54 - Esquema Estático - A

3.4.1.2. Figura ilustrativa

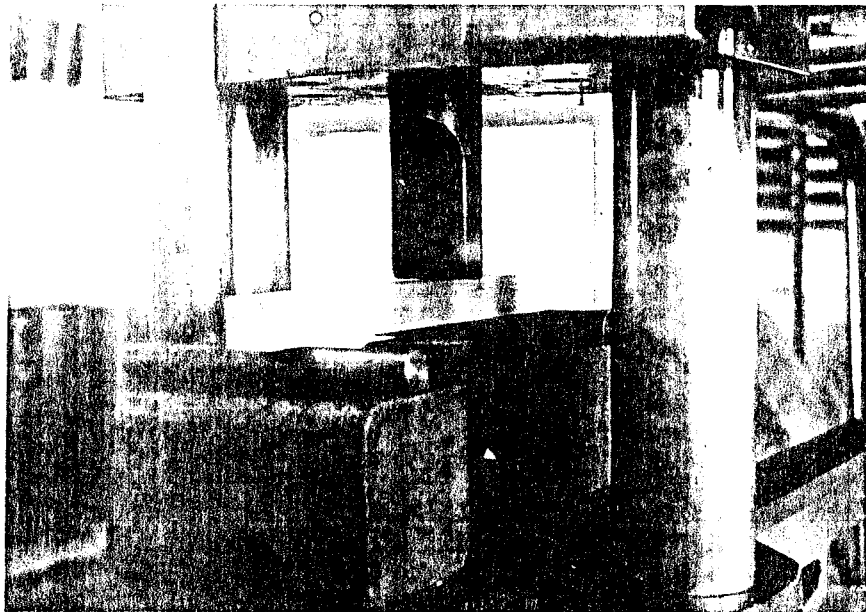


Fig. 55 - Montagem do Ensaio de Flexão Estática Segundo Esquema A

3.4.1.3. Observações gerais

Este esquema de ensaio é análogo ao do item 10 da atual NBR 6230.

O objetivo deste ensaio é a determinação do Módulo de Ruptura à Flexão. Neste trabalho a simbologia adotada para este parâmetro é:

• MRF_{ij} , sendo:

M = módulo

R = ruptura

F = flexão

i = distância entre apoios, indicado por 21, 14 ou 12

j = tipo de carregamento, indicado por 1f ou 2f

Portanto a simbologia para o Módulo de Ruptura à Flexão é:

$MRF_{12,1f}$,

sendo seu valor igual a:

$$MRF_{12,1f} = \frac{18 F}{bd} \quad (3.1)$$

onde: b = largura da seção transversal da peça

d = altura da seção transversal da peça

F = carga de ruptura

A equação (3.1) foi obtida, substituindo-se na equação clássica da teoria elástica $\sigma = My/I$, os valores de b, d e F.

3.4.1.4. Velocidade de carregamento

A aplicação de carga se fez à razão de 10 MPa por minuto.

3.4.2. Esquema de ensaio (B)

Este esquema foi utilizado na experimentação dos corpos de prova de $5 \times 5 \times 120 \text{ cm}^3$ (item 3.2.2.) e $6 \times 16 \times 360$

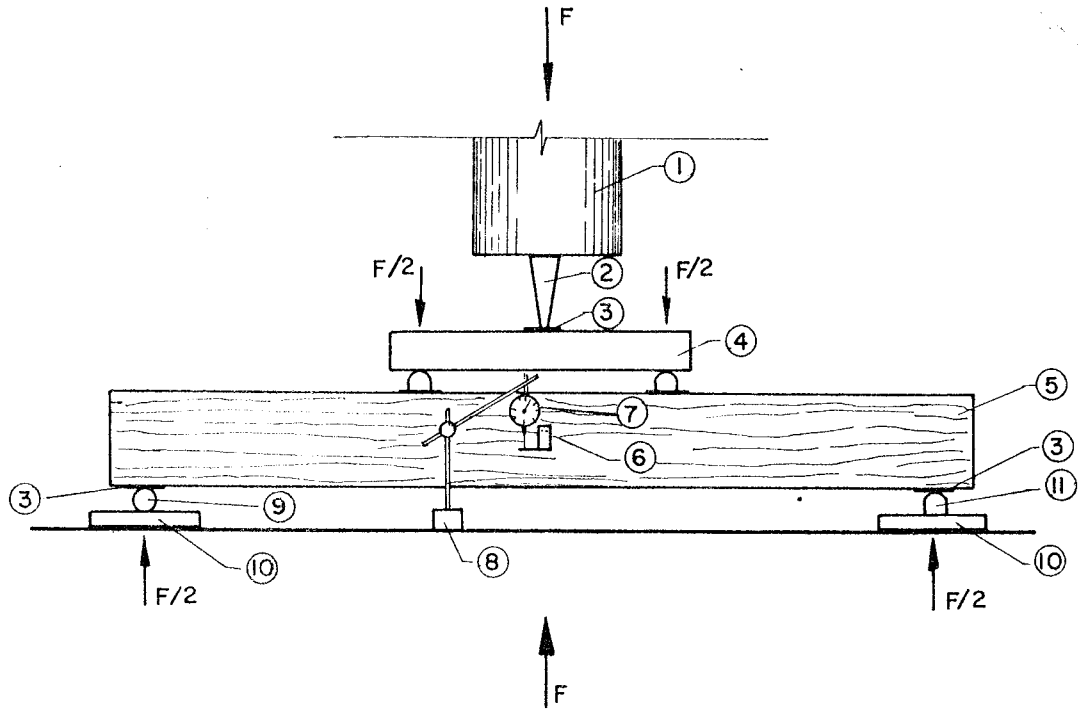


Fig. 56 - Esquema de Ensaio - B

Legenda:

- 1 - Sistema de Carregamento
- 2 - Cutelo
- 3 - Placa
- 4 - Sistema de Distribuição de Carga
- 5 - Corpo de Prova
- 6 - Cantoneira
- 7 - Relógio Comparador
- 8 - Base Magnética
- 9 - Apoio Móvel
- 10 - Placa de Apoio
- 11 - Apoio Fixo

3.4.2.1. Esquema estático e posição do relógio comparador

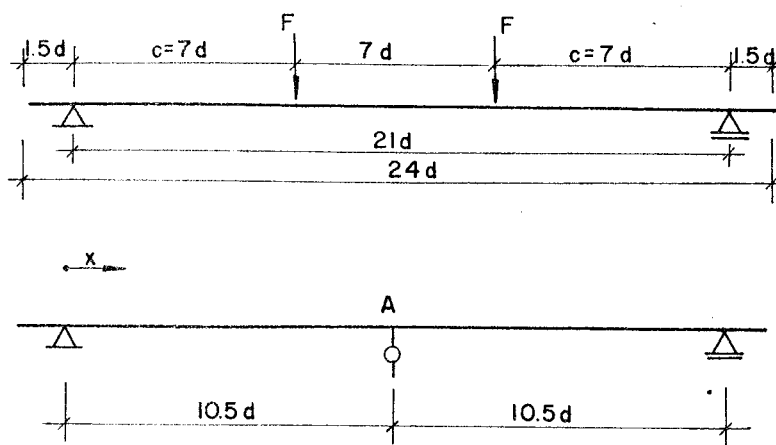


Fig. 57 - Esquema Estático - B

3.4.2.2. Figura ilustrativa

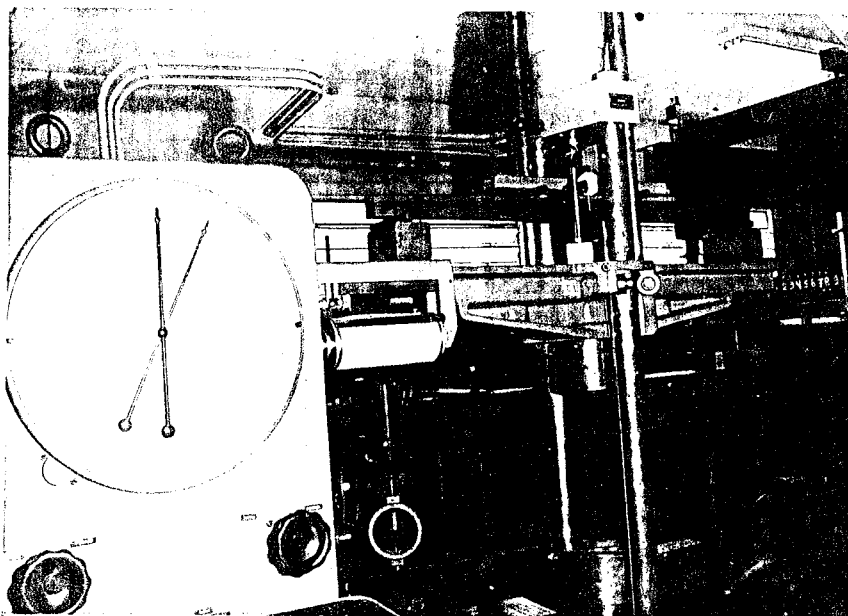


Fig. 58 - Montagem do Ensaio de Flexão Estática Segundo Esquema B

3.4.2.3. Observações gerais

Neste esquema adotou-se o vão livre da peça igual a $21d$, possibilitando a obtenção do módulo de elasticidade à flexão. Foram aplicadas duas cargas equidistantes dos apoios e medidas as flechas até o limite de proporcionalidade no ponto central da peça. Este esquema garante a minimização da interferência das deformações devidas às tensões tangenciais na região

da peça, onde são medidas as flechas.

A simbologia adotada para este parâmetro é:

E_{ij} , sendo:

E = módulo de elasticidade longitudinal

i = distância entre apoios, indicado por 21 ou 14

j = tipo de carregamento, indicado por 1f ou 2f

Assim a simbologia para o módulo de elasticidade longitudinal é:

$E_{21,2f}$,

sendo seu valor calculado pela equação da elasticidade:

$$a(x) = \frac{F \cdot c}{6IE_{21,2f}} (3lx - 3x^2 - c^2) \quad (3.2)$$

para: $c \leq x \leq 2c$.

No ponto A: $x = 10,5d$

$c = 7d$

$l = 21d$

$$I = \frac{bd^3}{12}$$

Portanto:

$$E_{21,2f} = \frac{3944,5}{b} \cdot \frac{F}{a_A} \quad (3.3)$$

sendo: b = largura da seção transversal

d = altura da seção transversal

F = carga aplicada

I = momento de inércia

a_A = flecha no ponto A.

3.4.2.4. Observações para as peças de dimensões

6 x 16 x 360 cm³

O esquema de ensaio (B) adotado para as peças de dimensões 6 x 16 x 360 cm³ apresentou, devido às dimensões destas peças, outra configuração, diferente das mostradas nas figuras 56 e 58. Todavia o esquema estático e os cálculos são aqueles indicados nos itens 3.4.2.1. e 3.4.2.3.

Houve preocupação em se verificar a estabilidade lateral da peça, seguindo roteiro de cálculo da NBR 7190, item 56.

Apresenta-se a seguir o esquema de ensaio (B) para as peças de dimensões $6 \times 16 \times 360 \text{ cm}^3$ e também uma foto ilustrativa do modelo.

3.4.2.4.1. Esquema de ensaio

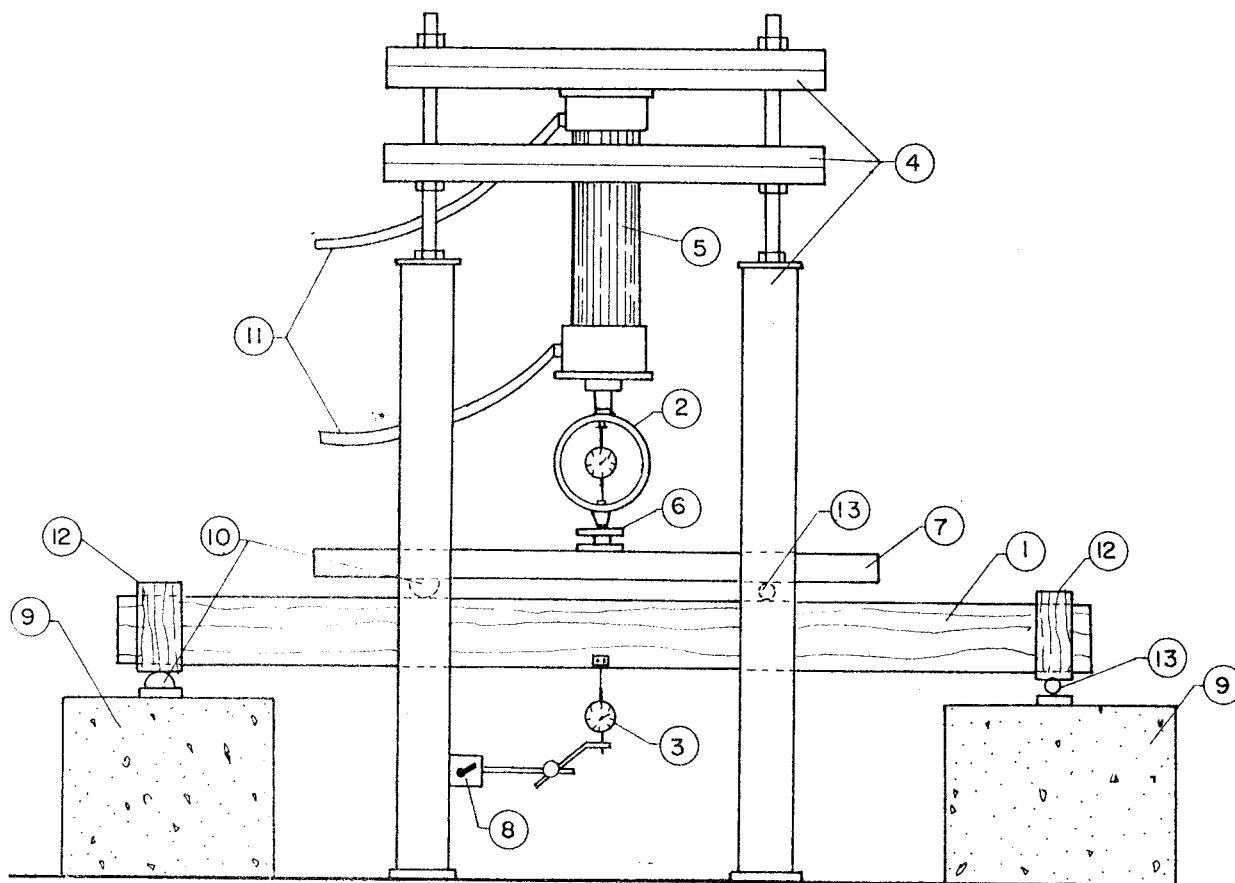


Fig. 59 - Esquema de Ensaio para Peças de $6 \times 16 \times 360 \text{ cm}^3$

Legenda

- 1 - Viga a ensaiar
- 2 - Anel dinamométrico
- 3 - Relógio comparador
- 4 - Estrutura de fixação do cilindro hidráulico
- 5 - Cilindro hidráulico para aplicação de carga
- 6 - Junta universal
- 7 - Perfil metálico para distribuição da carga
- 8 - Base magnética
- 9 - Blocos de apoio
- 10 - Apoio fixo
- 11 - Mangueiras hidráulicas

12 - Vĩnculo

13 - Apoio mōvel

3.4.2.4.2. Figura ilustrativa

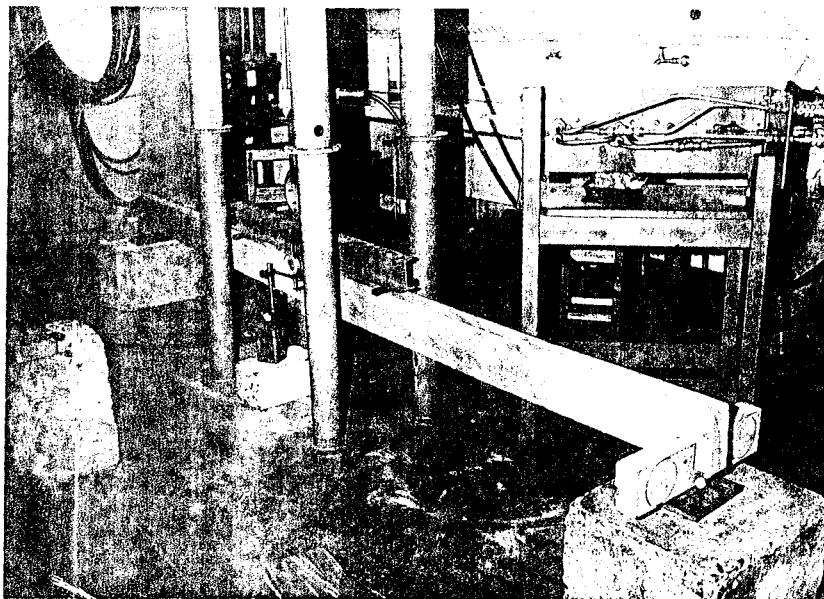


Fig. 60 - Montagem do Ensaio - Esquema B - Peça $6 \times 16 \times 360 \text{ cm}^3$

3.4.2.5. Velocidade de carregamento

A aplicação de carga se fêz ã razão 10 MPa por minuto, tanto nas peças de dimensões $5 \times 5 \times 120 \text{ cm}^3$, quanto nas de $6 \times 16 \times 360 \text{ cm}^3$.

3.4.3. Esquema de ensaio (C)

Este esquema foi utilizado na experimentação dos corpos de prova de $5 \times 5 \times 120 \text{ cm}^3$ (item 3.2.2) e $6 \times 16 \times 360 \text{ cm}^3$ (item 3.2.3).

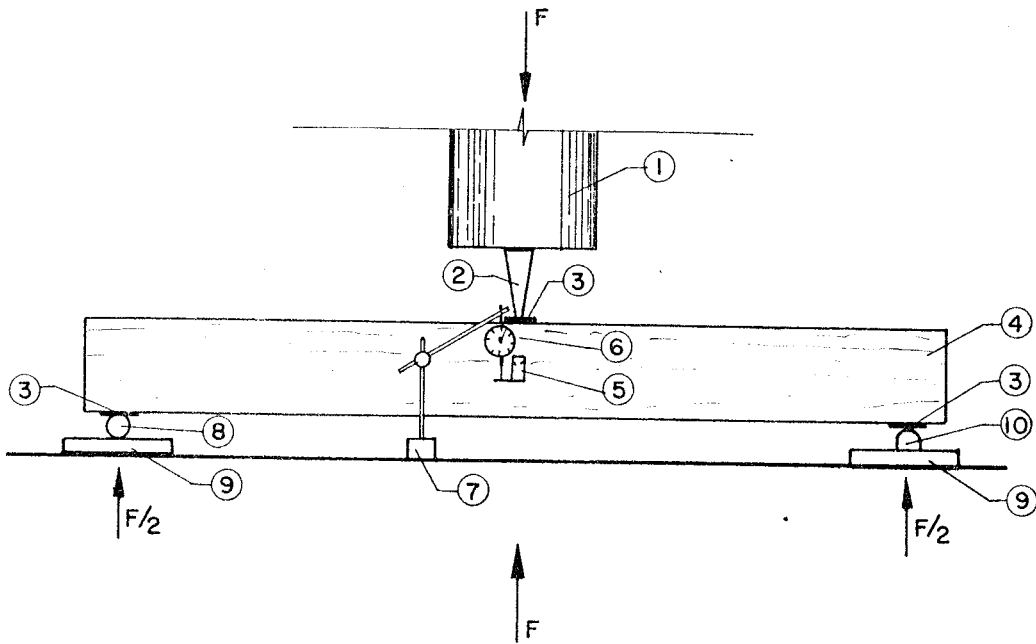


Fig. 61 - Esquema de Ensaio - C

Legenda

- 1 - Sistema de Carregamento
- 2 - Cutelo
- 3 - Placa Metálica
- 4 - Corpo de Prova
- 5 - Cantoneira
- 6 - Relógio Comparador
- 7 - Base Magnética
- 8 - Apoio Móvel
- 9 - Placa de apoio
- 10 - Apoio Fixo

3.4.3.1. Esquema Estático e posição do relógio comparador

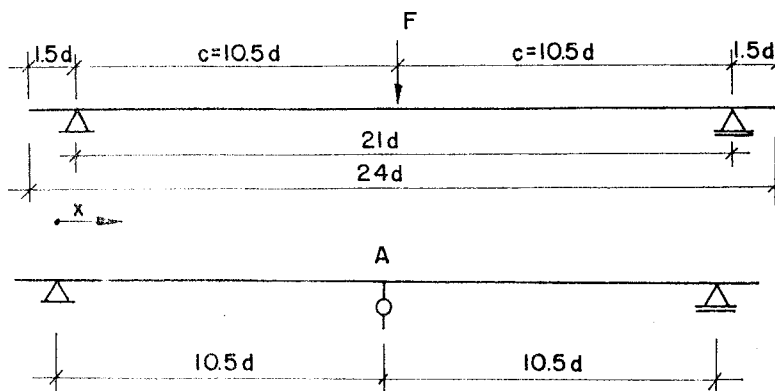


Fig. 62 - Esquema Estático - C

3.4.3.2. Figura ilustrativa

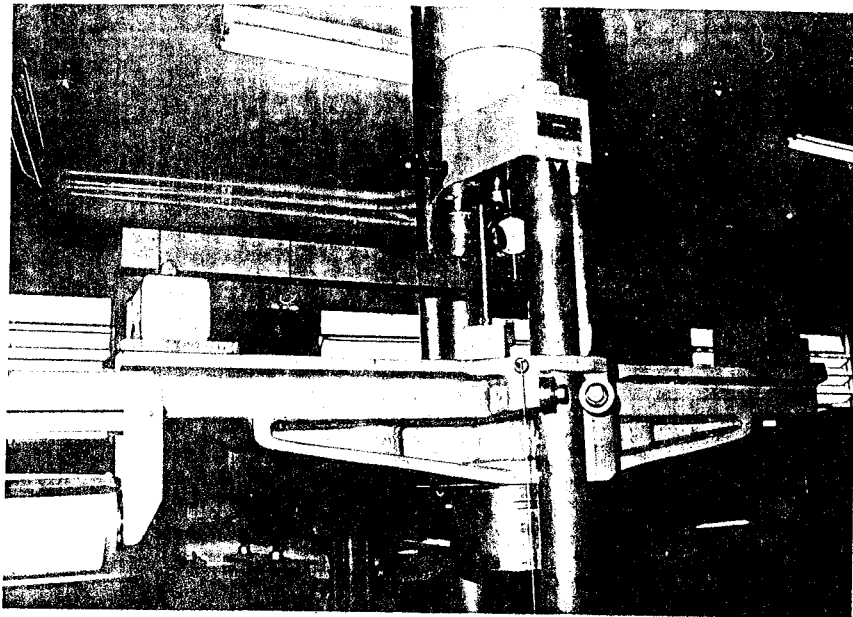


Fig. 63 - Montagem do Ensaio de Flexão Estática Segundo Esquema C

3.4.3.3. Observações gerais

Neste esquema, adotou-se o vão livre da peça igual a $2ld$, com aplicação de carga central, possibilitando a obtenção de um módulo de elasticidade com influência de deformações devidas às tensões tangenciais.

A simbologia utilizada é a mesma do item 3.4.2.3, alterando-se, entretanto, a representação $j = 2f$ para $j = 1f$. O valor de $E_{21,1f}$ é calculado pela equação elástica:

$$a(x) = \frac{Fl^3}{48E_{21,1f}} \left[3 \frac{x}{l} - 4 \left(\frac{x}{l} \right)^3 \right] \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \text{No ponto A: } x &= \frac{l}{2} \\ I &= \frac{bd^3}{12} \end{aligned}$$

Portanto:

$$E_{21,1f} = \frac{2315,25}{b} \cdot \frac{F}{a_A} \quad (3.5)$$

Os parâmetros b , d e I são idênticos aos do Esquema B.

Outro parâmetro calculado com os resultados obtidos neste esquema de ensaio é o Módulo de Ruptura à Flexão ($MRF_{21,1f}$), dado pela equação:

$$MRF_{21,1f} = \frac{31,5 F}{bd} \quad (3.6)$$

A equação (3.6) é obtida de modo semelhante à equação (3.1)

3.4.3.4. Observações para as peças de dimensões $6 \times 16 \times 360 \text{ cm}^3$

Enquadram-se, neste item, as observações descritas em 3.4.2.4., ressaltando-se todavia que o esquema de ensaio C para as peças de $6 \times 16 \times 360 \text{ cm}^3$, foi montado retirando-se o perfil metálico para distribuição de carga.

Com objetivo de ilustrar o esquema de ensaio C para peças de $6 \times 16 \times 360 \text{ cm}^3$ é apresentada a foto ilustrativa do modelo.

3.4.3.4.1. Figura ilustrativa

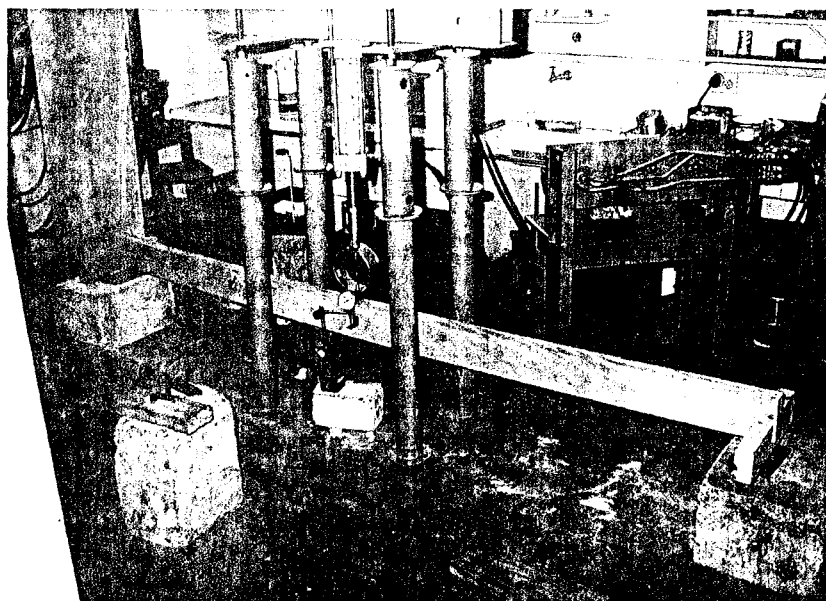


Fig. 64 - Montagem do Ensaio - Esquema C - Peça $6 \times 16 \times 360 \text{ cm}^3$

3.4.3.5. Velocidade de carregamento

Ver item 3.4.2.5.

3.4.4. Esquema de ensaio (D)

Este esquema foi utilizado na experimentação dos corpos de prova $5 \times 5 \times 120 \text{ cm}^3$ (item 3.2.2) e $6 \times 16 \times 360 \text{ cm}^3$ (item 3.2.3).

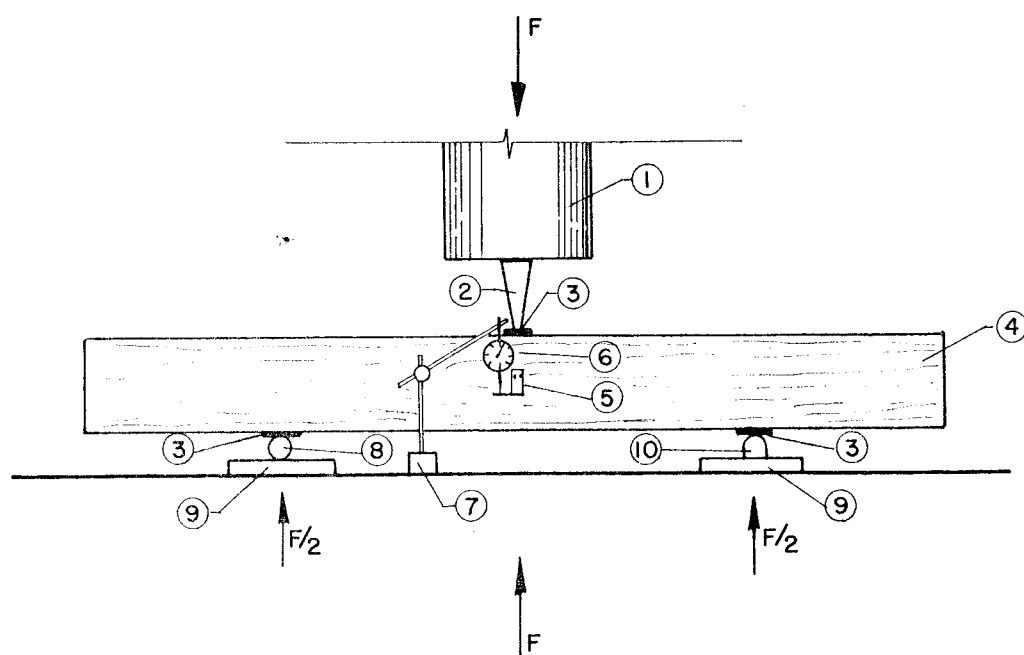


Fig. 65 - Esquema de Ensaio - D

Legenda

- 1 - Sistema de carregamento
- 2 - Cutelo
- 3 - Placa Metálica
- 4 - Corpo de Prova
- 5 - Cantoneira
- 6 - Relógio Comparador
- 7 - Base Metálica
- 8 - Apoio Móvel
- 9 - Placa de Apoio
- 10 - Apoio Fixo

3.4.4.1. Esquema estático e posição do relógio Comparador

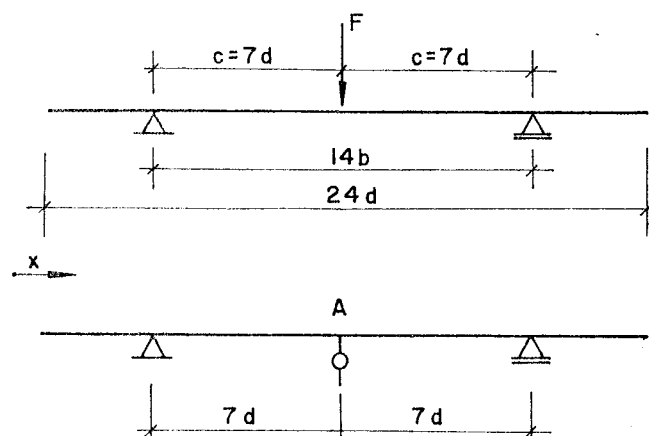


Fig. 66 - Esquema Estático - D

3.4.4.2. Figura ilustrativa

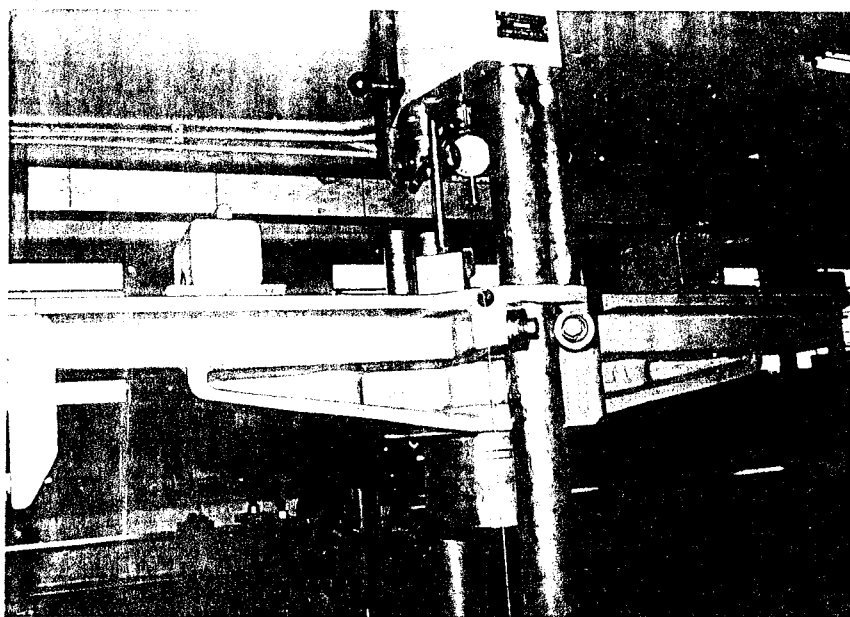


Fig. 67 - Montagem do Ensaio Segundo Esquema D

3.4.4.3. Observações gerais

Neste esquema de ensaio adotou-se o vão livre da peça igual a $14d$, com aplicação de carga central.

Os objetivos destes ensaios são:

- determinar o módulo de elasticidade longitudinal E , através da equação:

$$E_{14,1f} = \frac{F\ell^3}{48a_A I} \quad (3.7)$$

A equação (3.7) não toma em consideração o efeito das deformações tangenciais no valor do módulo de elasticidade de longitudinal.

- determinar o módulo de elasticidade transversal G , através da equação:

$$G = \frac{126 FdIE_{21,2f}}{A (30a_A IE_{21,2f} - 1715Fd^3)} \quad (3.8)$$

A equação (3.8) é obtida substituindo-se o valor de $E_{21,2f}$, na equação completa da flecha, expressa por:

$$a_A = \frac{F\ell^3}{48IE_{21,2f}} + \frac{3 F\ell}{10 GA} \quad (3.9)$$

3.4.4.4. Observações para as peças de dimensões $6 \times 16 \times 360 \text{ cm}^3$

As observações referentes às peças $6 \times 16 \times 360 \text{ cm}^3$ são as mesmas do item 3.4.3.4, acrescentando-se o cálculo do parâmetro de elasticidade G , descrito no item 3.4.4.3.

3.4.4.4.1. Figura ilustrativa

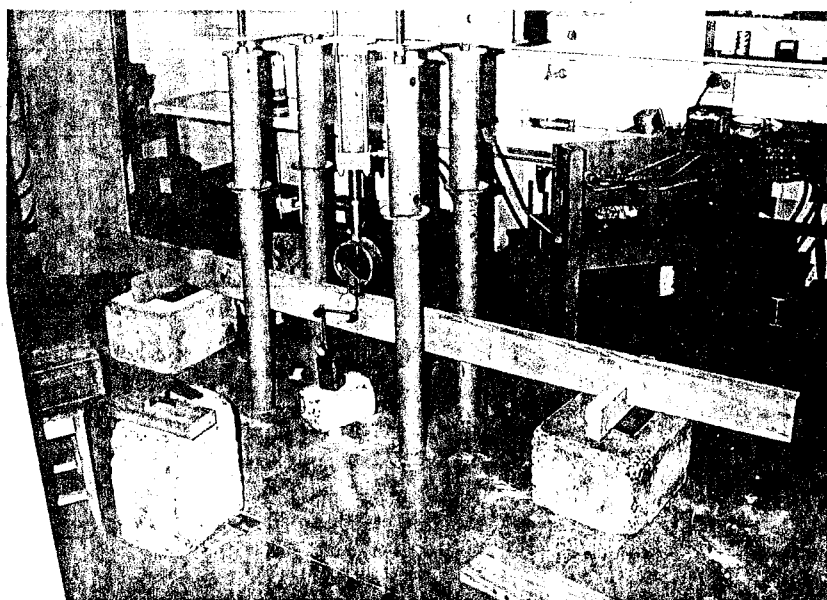


Fig. 68 - Montagem do Ensaio - Esquema D - Peça $6 \times 16 \times 360 \text{ cm}^3$

3.4.4.5. Velocidade de carregamento

Ver item 3.4.2.5.

3.5. Apresentação dos resultados obtidos

Com o material utilizado e seguindo a metodologia de ensaio descrita nos itens deste capítulo foram obtidos resultados para os parâmetros de ruptura e de elasticidade. Estes resultados foram agrupados em quadros, evidenciando-se as dimensões das peças e as espécies de madeiras utilizadas na experimentação. Quanto a notação CP*, ver observação na p.97.

3.5.1. Resultados obtidos das peças de dimensões 2 x 2 x 30 cm³ - Unidades em MPa

3.5.1.1. Espécie - Jatobá

QUADRO VII- Módulo de Ruptura à Flexão Estática

C.P.	MRF _{12,1f}	C.P.	MRF _{12,1f}	C.P.	MRF _{12,1f}
1	98	12	166	23	138
2	124	13	177	24	122
3	174	14	157	25	106
4	154	15	171	26	132
5	152	16	205	27	139
6	155	17	179	28	161
7	158	18	157	29	132
8	169	19	188	30	131
9	171	20	92	31	123
10	189	21	128	32	113
11	162	22	112	33	137

QUADRO VIII- Módulo de Ruptura à Flexão Estática - CP*

C.P.*	MRF _{12,1f}	C.P.*	MRF _{12,1f}	C.P.*	MRF _{12,1f}
1	135	3	140	5	106
2	138	4	141	6	130

3.5.1.2. Espécie - Peroba do Norte

QUADRO IX - Módulo de Ruptura à Flexão Estática

CP	MRF _{12,1f}	CP	MRF _{12,1f}	CP	MRF _{12,1f}
1	93	3	105	5	97
2	74	4	87	6	80

QUADRO X - Módulo de Ruptura à Flexão Estática - CP*

CP*	MRF _{12,1f}	CP*	MRF _{12,1f}	CP*	MRF _{12,1f}
1	84	3	84	5	67
2	87	4	82	5	91

3.5.1.3. Espécie - Peroba Rosa

QUADRO XI - Módulo de Ruptura à Flexão Estática

CP	MRF _{12,1f}	CP	MRF _{12,1f}	CP	MRF _{12,1f}
1	89	17	81	33	53
2	93	18	80	34	104
3	93	19	92	35	71
4	91	20	82	36	59
5	97	21	73	37	57
6	86	22	76	38	75
7	79	23	62	39	86
8	61	24	58	40	63
9	90	25	88	41	90
10	91	26	90	42	92
11	72	27	40	43	62
12	63	28	40	44	72
13	74	29	78	45	65
14	83	30	72	46	82
15	65	31	66	47	60
16	103	32	64	48	54
-	-	-	-	49	87
-	-	-	-	50	61

QUADRO XII - M \bar{o} dulo de Ruptura \bar{a} Flex \bar{a} o Est \bar{a} tica - CP*

CP*	MRF _{12,1f}	CP*	MRF _{12,1f}	CP*	MRF _{12,1f}
1	54	7	86	13	65
2	85	8	63	14	82
3	71	9	90	15	60
4	77	10	92	16	54
5	98	11	62	17	87
6	71	12	72	18	61

3.5.1.4. Esp \bar{e} cie - Gon \bar{c} alo Alves

QUADRO XIII - M \bar{o} dulo de Ruptura \bar{a} Flex \bar{a} o Est \bar{a} tica

CP	MRF _{12,1f}	CP	MRF _{12,1f}	CP	MRF _{12,1f}
1	82	3	77	5	74
2	87	4	82	6	95

3.5.2. Resultados obtidos das pe \bar{c} as de dimens \bar{o} es
5 x 5 x 120 cm³ - Unidades em MPa

3.5.2.1. - Esp \bar{e} cie - Jatob \bar{a}

QUADRO XIV - Par \bar{a} m \bar{e} tros de Ruptura e de Ela \bar{s} ticidade

CP	MRF _{14,1f}	E _{21,2f}	E _{21,1f}	E _{14,1f}	G
1	128	19890,0	19230.0	18247.0	888.00
2	118	19808,0	19202.0	18175.0	708.00
3	163	23714,0	23555.0	21234.0	792.00
4	159	21095,0	21060.0	19571.0	966.00
5	162	24531,0	23201.0	22587.0	609.00
6	164	23025,0	22746.0	19572.0	855.00
7	162	23659,0	23495.0	21916.0	824.00
8	160	24619,0	23675.0	18371.0	478.00
9	163	23994,0	23201.0	20788.0	659.00
10	169	24073,0	23796.0	19854.0	535.00
11	151	24444,0	24168.0	22635.0	1069.00
12	148	23471,0	23201.0	21027.0	827.00
13	160	26724,0	26719.0	22087.0	524.00

QUADRO XIV - Parâmetros de Ruptura e de Elasticidade - continuação

CP	MRF _{14,1f}	E _{21,2f}	E _{21,1f}	E _{14,1f}	G
14	146	25597,0	25378.0	21218.0	764.00
15	155	23220,0	22320.0	19437.0	730.00
16	147	23065,0	21978.0	18067.0	420.00
17	155	21017,0	21003.0	18709.0	830.00
18	163	22541,0	22529.0	20087.0	1055.00
19	169	22283,0	22069.0	19375.0	737.00
20	144	15783,0	15757.0	14712.0	495.00
21	112	18498,0	18382.0	16008.0	550.00
22	134	17265,0	16869.0	16339.0	675.00
23	125	17977,0	17259.0	16486.0	522.00
24	125	17265,0	16793.0	16008.0	456.00
25	110	18558,0	18305.0	15509.0	669.00
26	101	18439,0	18341.0	17228.0	401.00
27	149	19787,0	19529.0	18560.0	727.00
28	145	17675,0	17612.0	15506.0	603.00
29	117	20501,0	19976.0	16960.0	715.00
30	122	16334,0	16211.0	15077.0	548.00
31	140	18098,0	18064.0	16764.0	421.00
32	119	18146,0	17967.0	16186.0	656.00
33	115	16296,0	16036.0	14756.0	232.00

QUADRO XV - Módulo de Ruptura à Flexão Estática - CP*

CP	MRF _{14,1f}	MRF _{21,1f}
1	146	128
2	122	128
3	129	125
4	136	142
5	134	136
6	133	133

3.5.2.2. Espécie - Peroba do Norte

QUADRO XVI - Parâmetros de Ruptura e de Elasticidade

CP	MRF _{14,1f}	E _{21,2f}	E _{21,1f}	E _{14,1f}	G
1	71	10613,0	10570.0	9644.0	533
2	82	10591,0	10512.0	9716.0	437
3	105	15807,0	15621.0	14547.0	744
4	98	16050,0	15989.0	15018.0	696
5	102	12916,0	12880.0	11496.0	533
6	95	13924,0	13710.0	12418.0	534

QUADRO XVII- Módulo de Ruptura à Flexão - CP*

CP	MRF _{14,1f}	MRF _{21,1f}
1	82	97
2	78	66
3	86	87
4	78	84
5	84	85
6	85	86

3.5.2.3. Espécie - Peroba Rosa

Para a espécie Peroba Rosa foram feitos 94 ensaios com os esquemas B e D e 60 com os esquemas B, C e D. Isto explica a subdivisão dos resultados em dois quadros e para os parâmetros de ruptura e de elasticidade.

QUADRO XVIII-Parâmetros de Ruptura e de Elasticidade

CP	MRF _{14,1f}	E _{21,2f}	E _{14,1f}	G
1	93	10111.0	8898.0	181.00
2	97	12339.0	9980.0	211.00
3	110	12332.0	10534.0	305.00
4	99	14446.0	10403.0	215.00

QUADRO XVIII - Parâmetros de Ruptura e de Elasticidade - Continuação

CP	MRF _{14,1f}	E _{21,2f}	E _{14,1f}	G
5	97	11940.0	9615.0	223.00
6	91	10400.0	8818.0	393.00
7	100	12056.0	10328.0	492.00
8	128	14773.0	10664.0	306.00
9	116	13332.0	10880.0	243.00
10	88	9692.0	8440.0	230.00
11	88	10393.0	8440.0	230.00
12	69	9626.0	7729.0	208.00
13	77	10093.0	8230.0	177.00
14	91	10627.0	8802.0	255.00
15	81	8627.0	7625.0	199.00
16	71	8748.0	7276.0	210.00
17	103	10143.0	9746.0	277.00
18	86	9752.0	8467.0	234.00
19	118	12945.0	11371.0	275.00
20	75	8022.0	7065.0	194.00
21	82	9098.0	7855.0	264.00
22	110	13146.0	9622.0	294.00
23	78	8196.0	7827.0	209.00
24	74	7986.0	7150.0	416.00
25	82	9151.0	7694.0	189.00
26	69	7696.0	6654.0	166.00
27	71	8630.0	6901.0	189.00
28	94	10365.0	8410.0	296.00
29	95	9777.0	8379.0	184.00
30	87	9189.0	7915.0	173.00
31	127	12687.0	10796.0	341.00
32	82	8181.0	7482.0	222.00
33	86	9449.0	8143.0	237.00
34	103	11204.0	9451.0	775.00
35	90	9478.0	9153.0	237.00
36	94	11603.0	10104.0	418.00
37	93	11845.0	11177.0	888.00
38	61	6379.0	5691.0	386.00
39	70	7229.0	6835.0	716.00
40	100	13735.0	11600.0	545.00

QUADRO XVIII - Parâmetros de Ruptura e de Elasticidade - Continuação

CP	MRF _{14,1f}	E _{21,2f}	E _{14,1f}	G
41	92	11662.0	9456.0	431.00
42	75	9936.0	8874.0	132.00
43	81	10564.0	10166.0	108.00
44	84	10177.0	9699.0	522.00
45	86	11005.0	10450.0	1141.00
46	73	11690.0	8995.0	239.00
47	54	9158.0	8545.0	527.00
48	63	9345.0	8024.0	1153.00
49	65	10119.0	8274.0	277.00
50	76	11462.0	10372.0	709.00
51	60	6896.0	5858.0	211.00
52	62	6587.0	5246.0	637.00
53	95	11983.0	11483.0	1106.00
54	104	12389.0	11416.0	735.00
55	60	8854.0	8382.0	699.00
56	70	8592.0	7909.0	309.00
57	100	12059.0	10723.0	111.00
58	92	11619.0	10317.0	997.00
59	58	6353.0	6062.0	376.00
60	69	7267.0	6329.0	457.00
61	103	11372.0	10431.0	844.00
62	100	12012.0	10224.0	376.00
63	65	8621.0	7777.0	518.00
64	52	6450.0	5719.0	310.00
65	65	8342.0	7975.0	202.00
66	55	7946.0	6073.0	169.00
67	83	10405.0	9137.0	421.00
68	63	7705.0	6557.0	398.00
69	80	10757.0	9513.0	477.00
70	81	8681.0	8368.0	299.00
71	77	10975.0	8907.0	182.00
72	73	11155.0	9490.0	175.00
73	77	10925.0	9082.0	169.00
74	75	11015.0	9159.0	207.00

Continua

QUADRO XVIII-Parâmetros de Ruptura e de Elasticidade - Continuação

CP	MRF _{14,1f}	E _{21,2f}	E _{14,1f}	G
75	90	11665.0	9470.0	177.00
76	90	11561.0	9255.0	181.00
77	91	11632.0	8824.0	143.00
78	92	12031.0	10839.0	687.00
79	66	8704.0	7459.0	438.00
80	69	7970.0	6209.0	172.00
81	77	10182.0	8423.0	265.00
82	69	8941.0	7849.0	118.00
83	71	8733.0	7987.0	572.00
84	65	8828.0	7327.0	245.00
85	72	9592.0	8214.0	352.00
86	66	9934.0	9133.0	1197.00
87	58	8046.0	6687.0	244.00
88	56	7061.0	6292.0	326.00
89	56	8599.0	7075.0	233.00
90	60	7535.0	7014.0	425.00
91	79	11828.0	9943.0	261.00
92	79	11738.0	9963.0	288.00
93	78	11309.0	9534.0	230.00
94	76	11409.0	9484.0	411.00

QUADRO XIX- Parâmetros de Ruptura e de Elasticidade

CP*	MRF _{14,1f}	E _{21,2f}	E _{21,1f}
1	100	12056.0	11893.0
2	94	11603.0	11583.0
3	93	11845.0	11753.0
4	61	6379.0	6100.0
5	70	7229.0	7108.0
6	100	13735.0	13651.0
7	92	11662.0	11340.0
8	75	9936.0	9187.0
9	81	10564.0	10530.0

Continua

QUADRO XIX - Parâmetros de Ruptura e de Elasticidade - Continuação

CP*	MRF _{14,1f}	E _{21,2f}	E _{21,1f}
10	84	10177.0	9953.0
11	86	11005.0	10709.0
12	73	11690.0	10967.0
13	54	9158.0	8960.0
14	63	9345.0	9088.0
15	65	10119.0	9776.0
16	76	11462.0	11362.0
17	60	6896.0	6512.0
18	62	6587.0	6377.0
19	95	11983.0	11911.0
20	104	12389.0	12172.0
21	60	8854.0	8789.0
22	70	8592.0	8402.0
23	100	12059.0	11925.0
24	92	11619.0	11382.0
25	58	6353.0	6230.0
26	69	7267.0	6940.0
27	103	11372.0	11111.0
28	100	12012.0	11495.0
29	65	8621.0	8534.0
30	52	6450.0	5951.0
31	65	8342.0	8176.0
32	55	7946.0	7802.0
33	83	10405.0	10049.0
34	63	7705.0	7469.0
35	80	10757.0	10592.0
36	81	8681.0	8645.0
37	77	10975.0	10807.0
38	73	11155.0	11146.0
39	77	10925.0	10908.0
40	75	11015.0	11004.0
41	90	11665.0	11649.0
42	90	11561.0	11475.0
43	91	11632.0	11631.0
44	92	12031.0	12105.0

Continua

QUADRO XIX - Parâmetros de Ruptura e de Elasticidade - Continuação

CP*	MRF _{14,1f}	E _{21,2f}	E _{21,1f}
45	66	8704.0	8632.0
46	69	7970.0	7399.0
47	77	10182.0	10267.0
48	69	8941.0	8851.0
49	71	8733.0	8590.0
50	65	8828.0	8645.0
51	72	9592.0	9581.0
52	66	9934.0	9980.0
53	58	8046.0	7641.0
54	56	7061.0	6467.0
55	56	8599.0	8275.0
56	60	7535.0	7472.0
57	79	11828.0	11589.0
58	100	11739.0	11513.0
59	78	11309.0	11449.0
60	76	11409.0	11345.0

QUADRO XX - Módulo de Ruptura à Flexão Estática

CP	MRF _{14,1f}	CP	MRF _{14,1f}	CP	MRF _{14,1f}
1	100	17	60	33	83
2	94	18	62	34	63
3	93	19	95	35	80
4	61	20	104	36	81
5	70	21	60	37	79
6	100	22	60	38	53
7	92	23	100	39	77
8	75	24	92	40	77
9	81	25	58	41	90
10	84	26	69	42	92
11	86	27	103	43	69
12	73	28	100	44	69
13	54	29	65	45	65
14	63	30	52	46	72
15	65	31	65	47	58
16	76	32	55	48	56
-	-	-	-	49	79
-	-	-	-	50	78

QUADRO XXI - Mōdulo de Ruptura ã Flexão Estática - CP*

CP*	MRF _{14,1f}	MRF _{21,1f}
1	69	60
2	76	77
3	72	83
4	92	89
5	78	92
6	82	71
7	77	73
8	77	75
9	90	90
10	92	91
11	69	66
12	69	77
13	65	71
14	72	66
15	58	56
16	56	60
17	79	79
18	78	76

3.5.2.4. Espēcie - Gonçalo Alves

Para a espēcie Gonçalo Alves nã foram realiza - dos ensaios para obtençã de resultados de MRF_{21,1f}.

QUADRO XXII - Parâmetro de Ruptura e de Elasticidade

CP	MRF _{14,1f}	E _{21,2f}	E _{21,1f}	E _{14,1f}	G
1	70	13976.0	13956.0	11423.0	325.0
2	57	11181.0	10975.0	9623.0	234.0
3	84	14439.0	13015.0	12232.0	447.0
4	89	13834.0	13716.0	12062.0	396.0
5	71	11586.0	11427.0	10672.0	358.0
6	96	14938.0	14889.0	13842.0	488.0

3.5.2.5. Espécie - Eucalipto Tereticornis

Para a espécie Eucalipto Tereticornis não foram realizados ensaios para obtenção de resultados de $E_{21,1f}$ e de $MRF_{21,1f}$.

QUADRO XXIII-Parâmetros de Ruptura e de Elasticidade

CP	$MRF_{14,1f}$	$E_{21,2f}$	$E_{14,1f}$	G
1	94	10517.0	10854.0	331.0
2	97	10678.0	10284.0	389.0
3	108	12289.0	9469.0	289.0
4	85	9703.0	10213.0	384.0
5	80	3308.0	10306.0	509.0
6	110	12296.0	9409.0	334.0
7	109	12691.0	8908.0	277.0
8	109	12778.0	11377.0	394.0
9	119	13118.0	11507.0	405.0
10	86	9971.0	8917.0	336.0
11	92	10065.0	8917.0	336.0
12	114	11949.0	10596.0	355.0
13	75	8613.0	7436.0	388.0
14	108	12586.0	10596.0	407.0
15	91	10013.0	9536.0	325.0
16	118	13061.0	11347.0	403.0
17	110	12570.0	10833.0	401.0
18	93	10291.0	8585.0	270.0
19	101	11324.0	9754.0	501.0
20	128	13971.0	12722.0	529.0
21	93	10238.0	9350.0	341.0
22	71	7869.0	6684.0	246.0
23	84	9061.0	7962.0	261.0
24	112	12475.0	10562.0	258.0
25	109	12165.0	10055.0	277.0
26	120	13218.0	11209.0	292.0
27	88	9830.0	8685.0	267.0

Continua

QUADRO XXIII - Parâmetro de Ruptura e de Elasticidade - Continuação

CP	MRF _{14,1f}	E _{21,2f}	E _{14,1f}	G
28	100	10730.0	8212.0	294.0
29	87	9431.0	8002.0	218.0
30	100	11323.0	9893.0	325.0
31	118	12845.0	11218.0	243.0
32	90	9722.0	8360.0	277.0
33	103	11688.0	9745.0	323.0

3.5.3 - Resultados Obtidos das Peças de Dimensões
6 x 16 x 360 cm³ - Unidades em MPa

3.5.3.1 - Espécie - Peroba Rosa

QUADRO XXIV - Parâmetros de Ruptura e de Elasticidade

CP	MRF _{21,1f}	E _{21,2f}	E _{21,1f}	E _{14,1f}	G
1	55	11042.0	10997.0	9223.0	307.0
2	76	11714.0	11643.0	9353.0	288.0
3	59	8884.0	8874.0	7654.0	224.0
4	64	9290.0	9119.0	8447.0	568.0
5	46	7651.0	7244.0	6887.0	374.0
6	72	10935.0	10530.0	9833.0	370.0

3.5.3.2. Resultados obtidos das peças de dimensões
2 x 2 x 30 cm³, 5 x 5 x 120 cm³, retirados das
peças de dimensões 6 x 16 x 360 cm³ - (MPa)

Foram retiradas das regiões não afetadas das peças de 6 x 16 x 360 cm³, corpos de prova de 2 x 2 x 30 cm³ e de 5 x 5 x 120 cm³, com objetivo de realizar ensaios de flexão para analisar a influência das dimensões da peça na resistência e nos parâmetros de elasticidade da madeira. O resultado dos ensaios são apresentados nos quadros seguintes:

QUADRO XXV - Módulo de Ruptura à Flexão Estática em Função do Tamanho do Corpo de Prova

CP	MRF _{21,1f}	MRF _{21,1f}	MRF _{12,1f}
1	55	74	76
2	76	91	90
3	56	72	69
4	64	69	69
5	46	58	58
6	72	77	74

Observação: A segunda coluna do quadro acima corresponde ao corpo de prova de seção 6 x 16 cm²; a terceira corresponde ao de seção 5 x 5 cm² e a quarta 2 x 2 cm².

QUADRO XXVI - Parâmetros de Elasticidade em Função do tamanho do CP e do Esquema de Ensaio

CP	TAMANHO (cm ³)	E _{21,2f}	E _{21,1f}	E _{14,1f}	G
1	6 x 6 x 360	11042.0	10997.0	9223.0	307.0
1	5 x 5 x 120	10993.0	10996.0	9159.0	185.0
2	6 x 6 x 360	11714.0	11643.0	9353.0	288.0
2	5 x 5 x 120	11722.0	11715.0	9597.0	297.0
3	6 x 6 x 360	8884.0	8874.0	7654.0	224.0
3	5 x 5 x 120	8924.0	8785.0	7585.0	248.0
4	6 x 6 x 360	9290.0	9119.0	8447.0	568.0
4	5 x 5 x 120	9272.0	9174.0	8165.0	592.0
5	6 x 6 x 360	7651.0	7244.0	6887.0	374.0
5	5 x 5 x 120	7810.0	7464.0	6767.0	306.0
6	6 x 6 x 360	10935.0	10530.0	9833.0	370.0
6	5 x 5 x 120	11572.0	11474.0	9731.0	297.0

OBSERVAÇÃO: A utilização da notação diferenciada para os corpos de prova, isto é, CP e CP*, advem do fato da aplicação dos resultados indicados nos quadros anexos para as diferentes análises realizadas no transcorrer deste trabalho.

3.6. Utilização de Programa Estatístico para análise de resultados

Utilizou-se, como subsídio para análise estatística dos resultados, a subrotina MINITAB (IBM 370/148) do Centro de Processamento de Dados da Escola de Engenharia de São Carlos USP. Também se valeu do microcomputador HP 9825T, do Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira, da mesma entidade.

4. RELAÇÕES ENTRE PARÂMETROS DE RUPTURA E DE ELASTICIDADE

4.1. Objetivos

Com base em conceitos estatísticos correntes em Engenharia de Estruturas um dos objetivos da experimentação realizada é a determinação de relações entre parâmetros de ruptura e de elasticidade da madeira. Estas relações são de grande importância, pois permitem, através de ensaios destrutivos de um número reduzido de corpos de prova avaliar as características do material e estimar a segurança dos elementos componentes de uma estrutura de madeira, a um certo nível da confiança, otimizando o aproveitamento da madeira.

Todavia, para se comprovar a veracidade desta afirmação há necessidade de serem avaliadas as relações entre aqueles parâmetros, utilizando amostras com um número adequado de elementos (n), para possibilitar a aplicação dos conceitos relativos às grandes amostras.

As relações propostas e analisadas são:

$$- MRF_{14,1f} \times E_{21,2f}$$

$$- MRF_{14,1f} \times E_{21,1f}$$

$$- MRF_{14,1f} \times E_{14,1f}$$

Obtidas estas relações há disponibilidade de dados para comprovar se os parâmetros de elasticidade são bons estimadores do parâmetro de ruptura, ou não. Em caso afirmativo, é possível definir uma função estimadora dos valores da resistência das peças componentes de um lote de madeira, através dos valores dos parâmetros de elasticidade. Paralelamente a isto, pode-se ter uma noção da resistência e dos módulos de elasticidade para cálculo de uma estrutura de madeira.

4.2. Tratamentos estatísticos dos resultados

A partir dos resultados apresentados para peças de 5 x 5 x 120 cm³ nos quadros dos itens 3.5.2.1. a 3.5.2.5. do

capítulo 3, foram feitas duas análises estatísticas, uma envolvendo os resultados obtidos por espécies, e outra reunindo-se os resultados obtidos para todas as espécies estudadas neste trabalho.

Procedeu-se à análise, traçando-se gráficos de dispersão, para visualizar a dependência entre o parâmetro de ruptura e os parâmetros de elasticidade. A seguir, foram ajustados vários modelos de regressão, entre a variável dependente, genericamente definida por Y_i , e as independentes (x_1, x_2, \dots, x_m) . O modelo estatístico de regressão linear pode ser escrito:

$$Y_i = B_0 + B_1x_1 + B_2x_2 + \dots + B_mx_m + e_i \quad (4.1)$$

onde e_i , chamado "erro", representa as variações medidas ou o efeito de outras variáveis omitidas no modelo, e apresenta-se como uma variável aleatória, com distribuição normal de parâmetros 0 e σ^2 , isto é, média zero e variância σ^2 , ou sinteticamente $e \sim N(0, \sigma^2)$.

4.3. Análise dos resultados

Com o intuito de sintetizar a apresentação da análise dos resultados, optou-se pela condensação de resultados em quadros de "Resumo da Análise Estatística".

4.3.1. Análise por espécie

A seguir são apresentados os quadros de "Resumo da Análise Estatística", para as espécies: Jatobá, Peroba Rosa e Eucalipto Tereticornis.

Adota-se para a análise de regressão linear o nível de significância (α), em torno de 5%.

Nos Quadros de Análise de Regressão a unidade de medida para os parâmetros de ruptura e de elasticidade é o MPa.

4.3.1.1. Análise dos resultados - JATOBÁ

TÍTULO: RELAÇÃO ENTRE $MRF_{14,1f}$ X $E_{21,2f}$

ESPÉCIE: JATOBÁ (Utilização do QUADRO XIV)

QUADRO XXVII-RESUMO DA ANÁLISE DE REGRESSÃO

ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO	OBSERVAÇÕES
MODELO	$y = a_0 + a_1 x_1$	Equação obtida pelo ajuste e pela teoria dos mínimos quadrados.
EQUAÇÃO (4.2)	$MRF_{14,1f} = 44,3 + 0,0047 E_{21,2f}$	
COEF. DE CORRELAÇÃO LINEAR	$R^2 = 52,2\%$	Grau de correlação linear aceitável.
TESTE "F"	$F(1,31) = 33,89$ nível de significância $\alpha < 0,1\%$	Regressão altamente significativa.
TESTE "t" (valor para variável)	$x_1: t = 5,82$ nível de significância $\alpha < 0,05\%$	A variável x_1 está altamente correlacionada com y.
GRÁFICO DA EQUAÇÃO (4.2)	Fig. 69 $MRF_{14,1f}$ vs $E_{21,2f}$	Não revela tendência, modelo satisfatório. Não revela anomalia, modelo satisfatório. Pode-se considerar distribuição normal de resíduos.
ANÁLISE DE RESÍDUOS	Fig. 70 Resíduos vs Valores Preditos.	
	Fig. 71 Resíduos vs Variável x_1 .	
	Fig. 72 Gráfico probabilístico ($R^2 = 97\%$)	

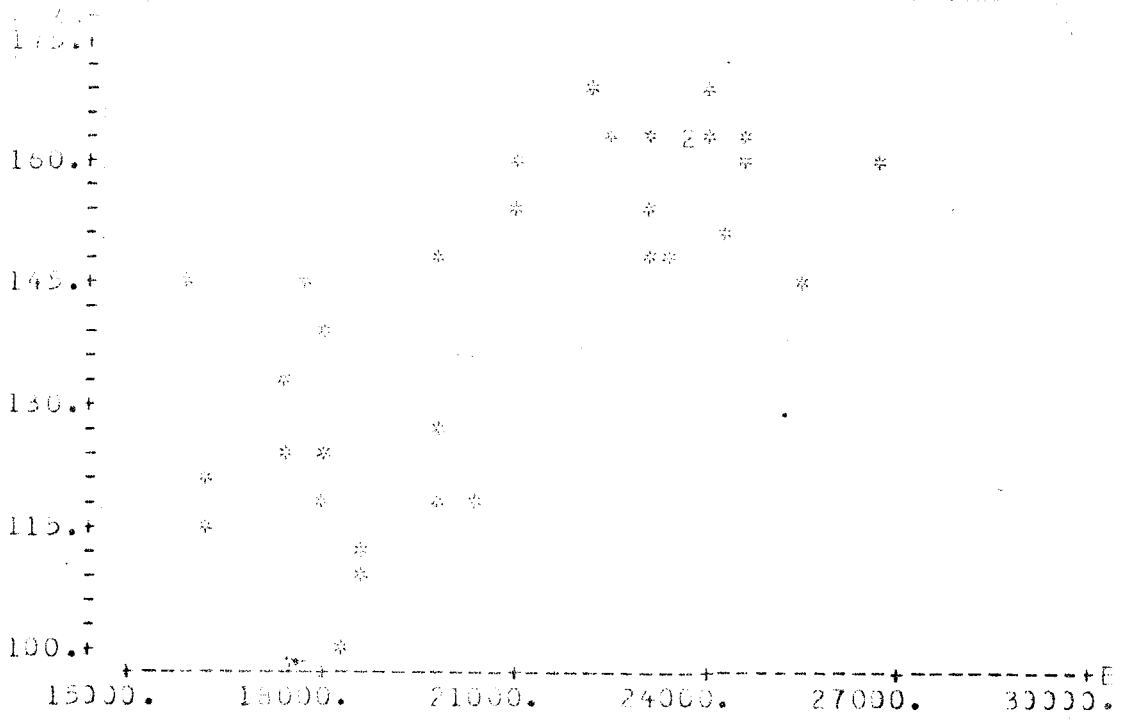


Fig. 69 MRF 14,1f vs E 21,2f

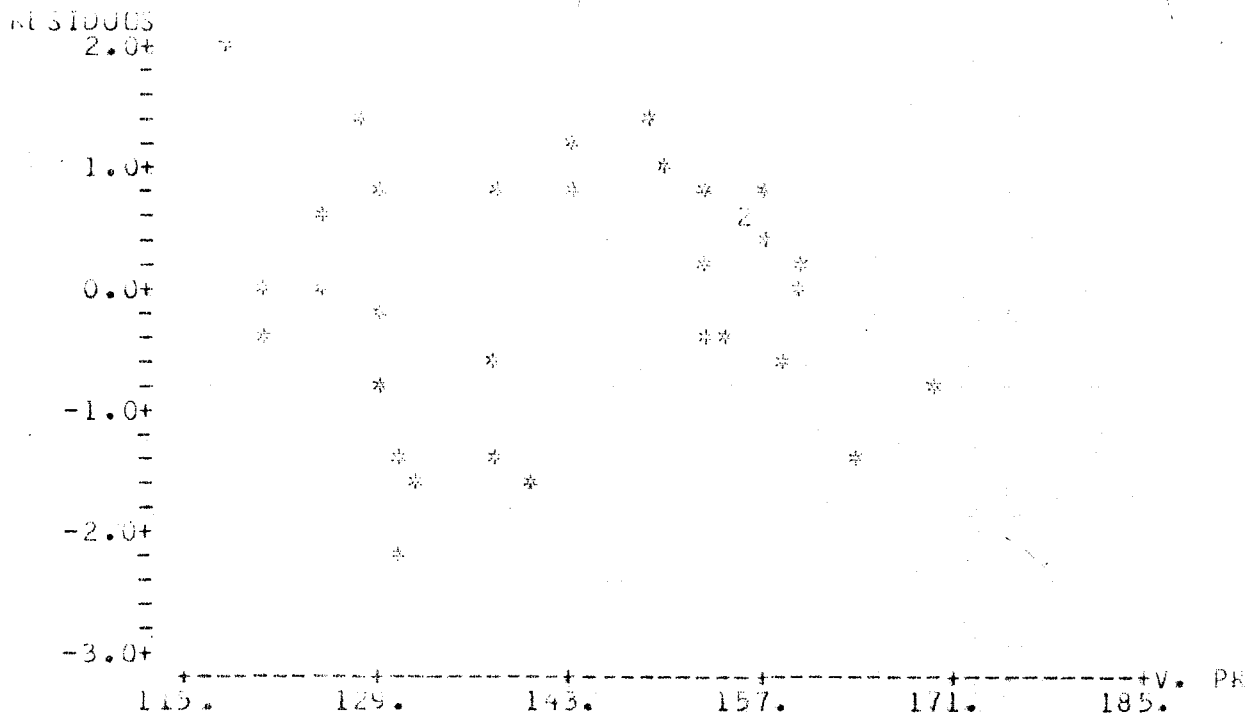


Fig. 70 Resíduos vs Valores Preditos

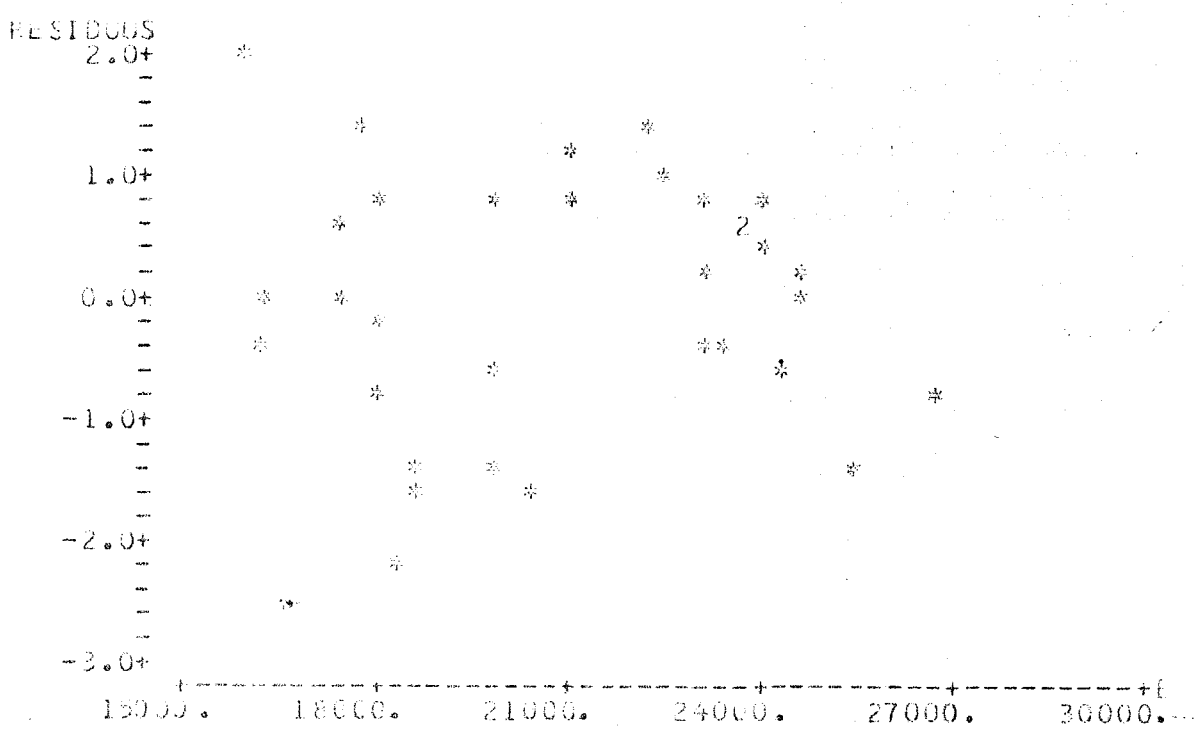


Fig. 71 Resíduos vs Variável x₁

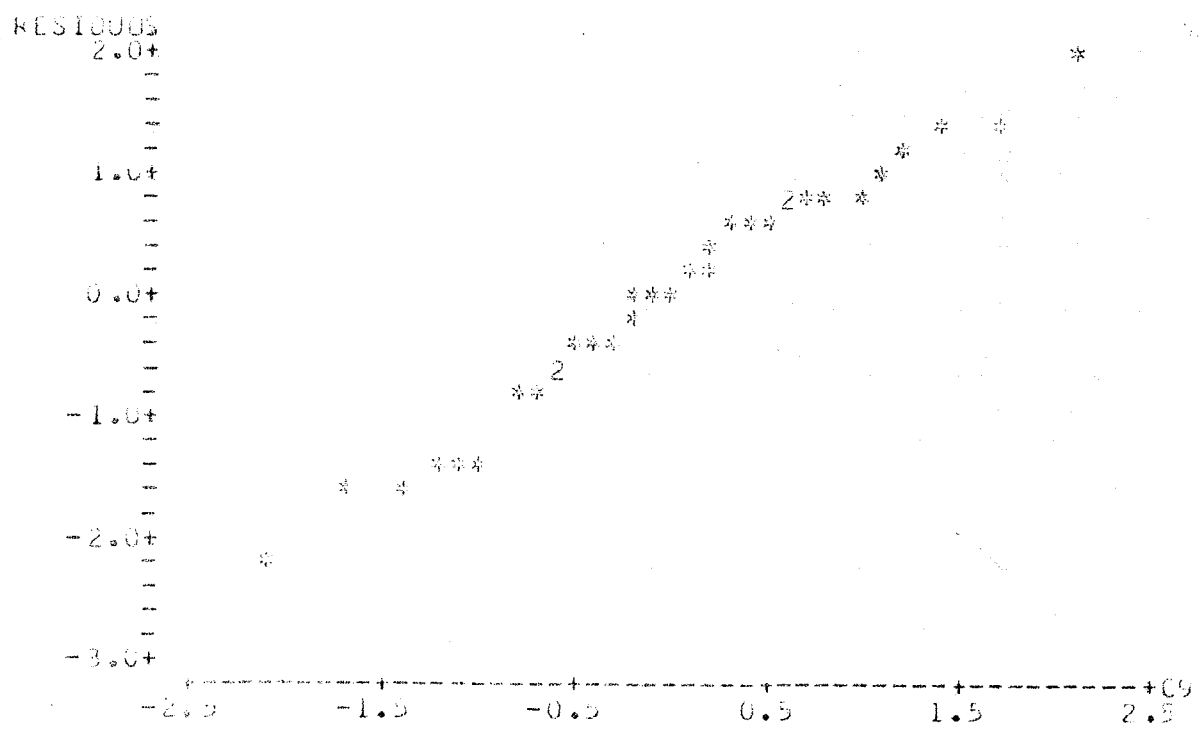


Fig. 72 Gráfico Probabilístico - ($R^2 = 97\%$)

TÍTULO: RELAÇÃO ENTRE $MRF_{14,1f} \times E_{21,1f}$

ESPÉCIE: JATOBÁ (Utilização do QUADRO XIV)

QUADRO XXVIII-RESUMO DA ANÁLISE DE REGRESSÃO

ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO	OBSERVAÇÕES
MODELO	$y = a_0 + a_1 x_1$	Equação obtida pelo ajuste e pela teoria dos mínimos quadrados.
EQUAÇÃO (4.3)	$MRF_{14,1f} = 42,4 + 0,0049 E_{21,1f}$	
COEF. DE CORRELAÇÃO LINEAR	$R^2 = 53,6\%$	Grau de correlação linear aceitável.
TESTE "F"	$F(1,31) = 35,73$ nível de significância α $\alpha < 0,1\%$	Regressão altamente significativa.
TESTE "t" (valor para variável)	$x_1: t = 5,98$ nível de significância α $\alpha < 0,5\%$	A variável x_1 está altamente correlacionada com y .
GRÁFICO DA EQUAÇÃO (4.3)	Fig. 73 $MRF_{14,1f} \text{ vs } E_{21,1f}$	
ANÁLISE DE RESÍDUOS	Fig. 74 Resíduos vs Valores Preditos	Não revela tendência. modelo satisfatório.
	Fig. 75 Resíduos vs Variável x_1 .	Não revela anomalia, modelo satisfatório.
	Fig. 76 Gráfico Probabilístico. ($R^2 = 97\%$)	Pode-se considerar distribuição normal de resíduos.

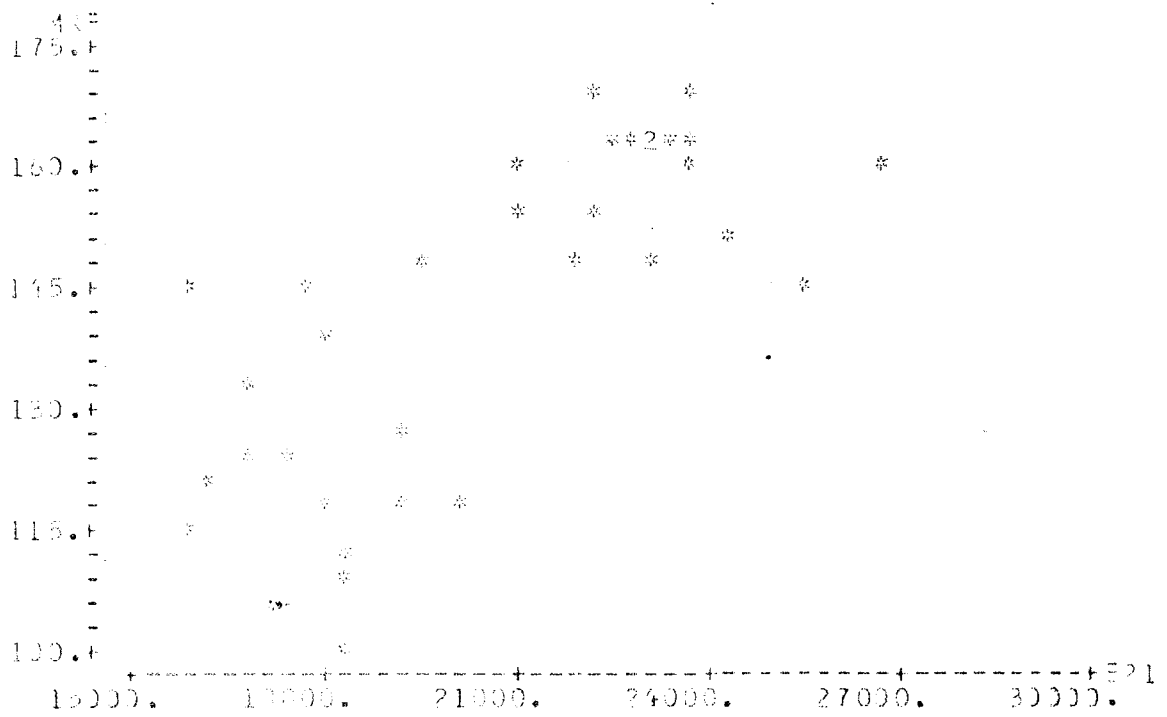


Fig. 73 MRF_{14,1f} vs E_{21,1f}

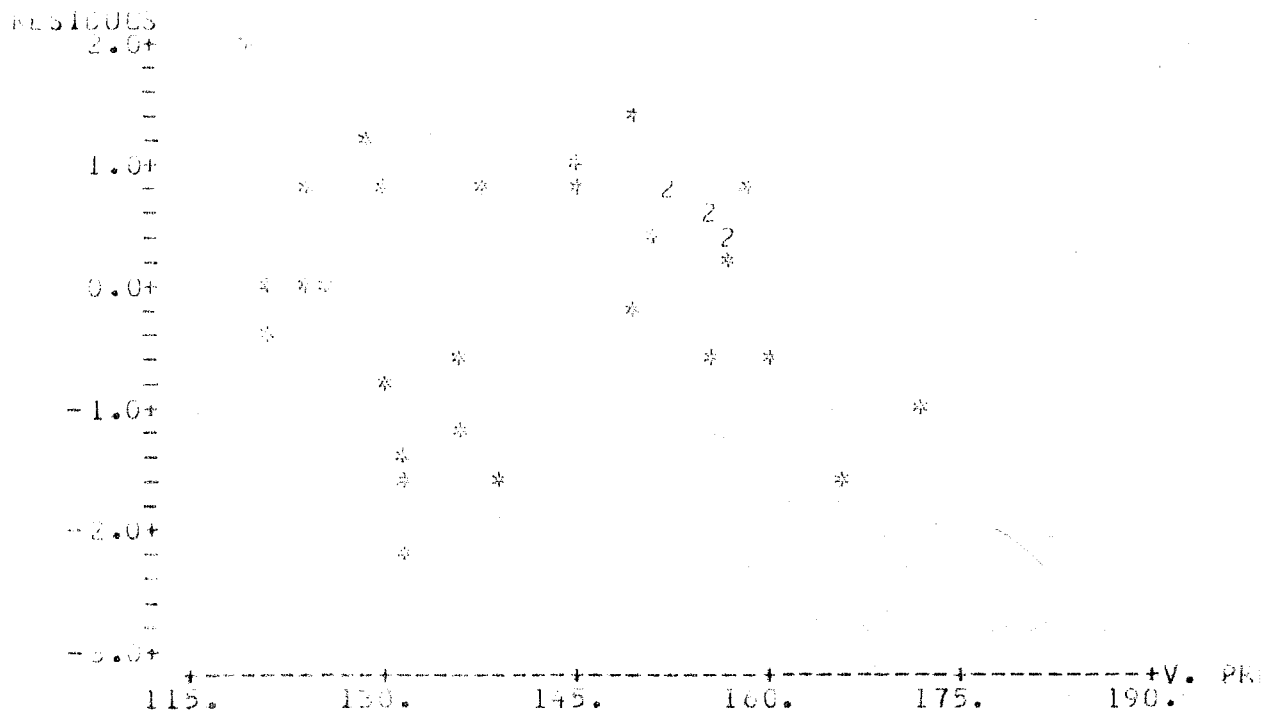


Fig. 74 Resíduos vs Valores Preditos

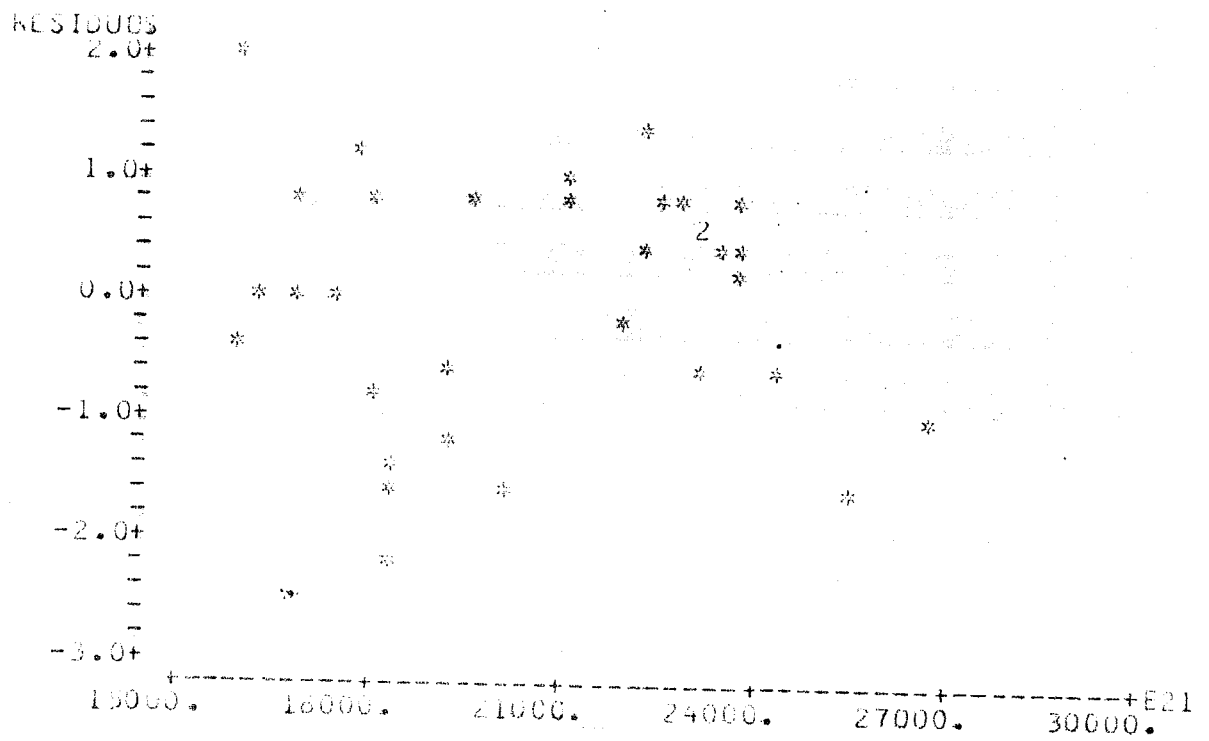


Fig. 75 Resíduos vs Variável x_1

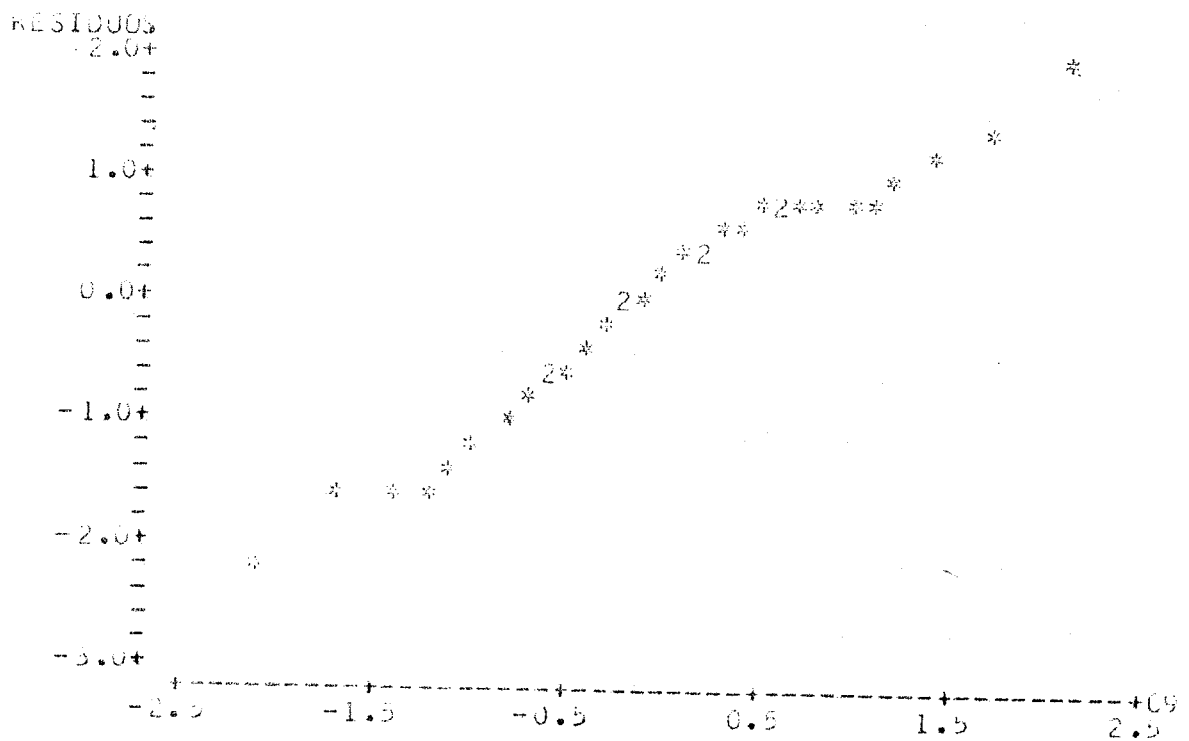


Fig. 76 Gráfico Probabilístico - ($R^2 = 97\%$)

TÍTULO: RELAÇÃO ENTRE $MRF_{14,1f}$ x $E_{14,1f}$

ESPÉCIE: JATOBÁ (Utilização do QUADRO XIV)

QUADRO XXIX - RESUMO DA ANÁLISE DE REGRESSÃO

ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO	OBSERVAÇÕES
MODELO	$y = a_0 + a_1 x_1$	Equação obtida pelo ajuste e pela teoria dos mínimos quadrados.
EQUAÇÃO (4.4)	$MRF_{14,1f} = 32,1 + 0,0060 E_{14,1f}$	
COEF. DE CORRELAÇÃO LINEAR	$R^2 = 51,4\%$	Grau de correlação linear aceitável.
TESTE "F"	$F(1,31) = 32,82$ nível de significância α $\alpha < 0,1\%$	Regressão altamente significativa.
TESTE "t" (valor para variável)	$x_1: t = 5,73$ nível de significância α $\alpha < 0,05\%$	A variável x_1 está altamente correlacionada com y.
GRÁFICO DA EQUAÇÃO (4.4)	Fig. 77 $MRF_{14,1f}$ vs $E_{14,1f}$	Não revela tendência, modelo satisfatório. Não revela anomalia, modelo satisfatório. Pode-se considerar distribuição normal de resíduos.
ANÁLISE DE RESÍDUOS	Fig. 78 Resíduos vs Valores Preditos.	
	Fig. 79 Resíduos vs Variável x_1 .	
	Fig. 80 Gráfico Probabilístico. ($R^2 = 98\%$)	

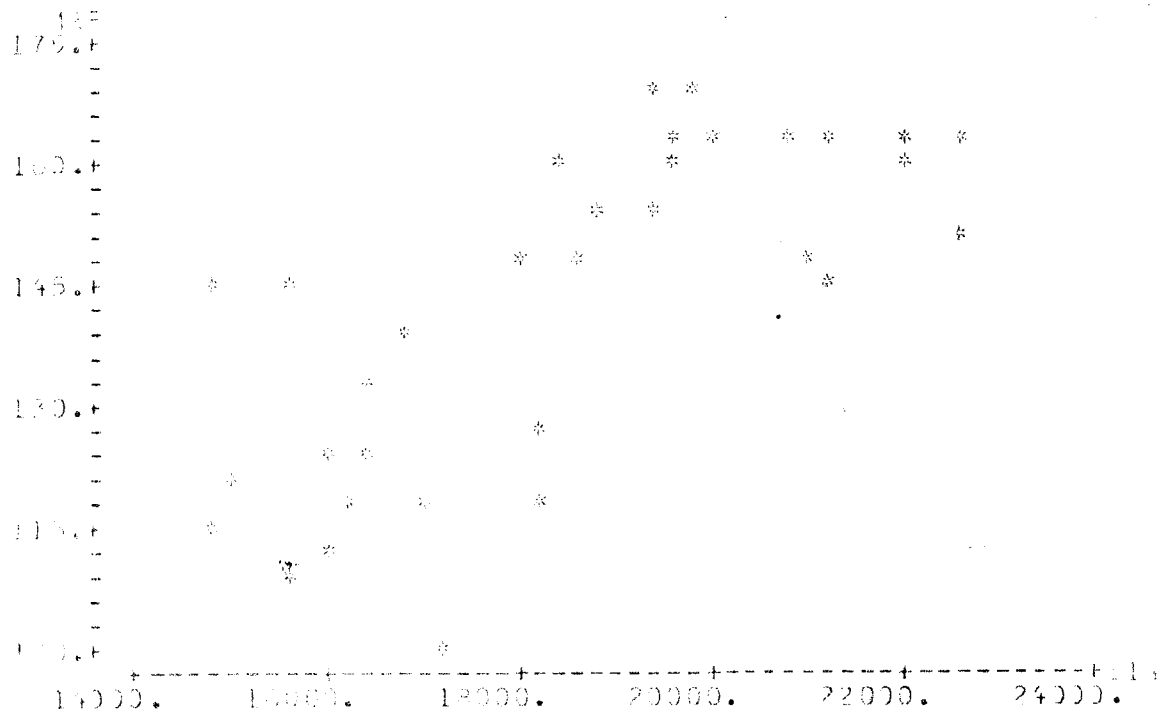


Fig. 77 MRF_{14,1f} vs E_{14,1f}

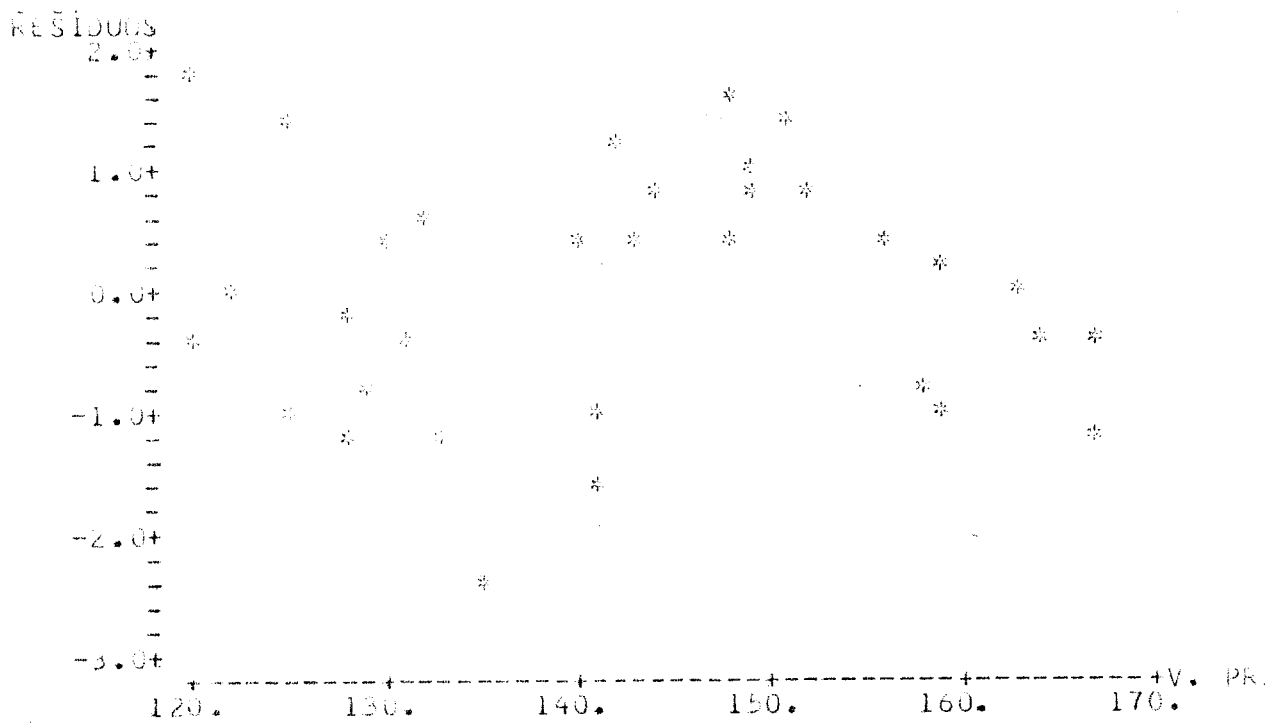


Fig. 78 Resíduos vs Valores Preditos

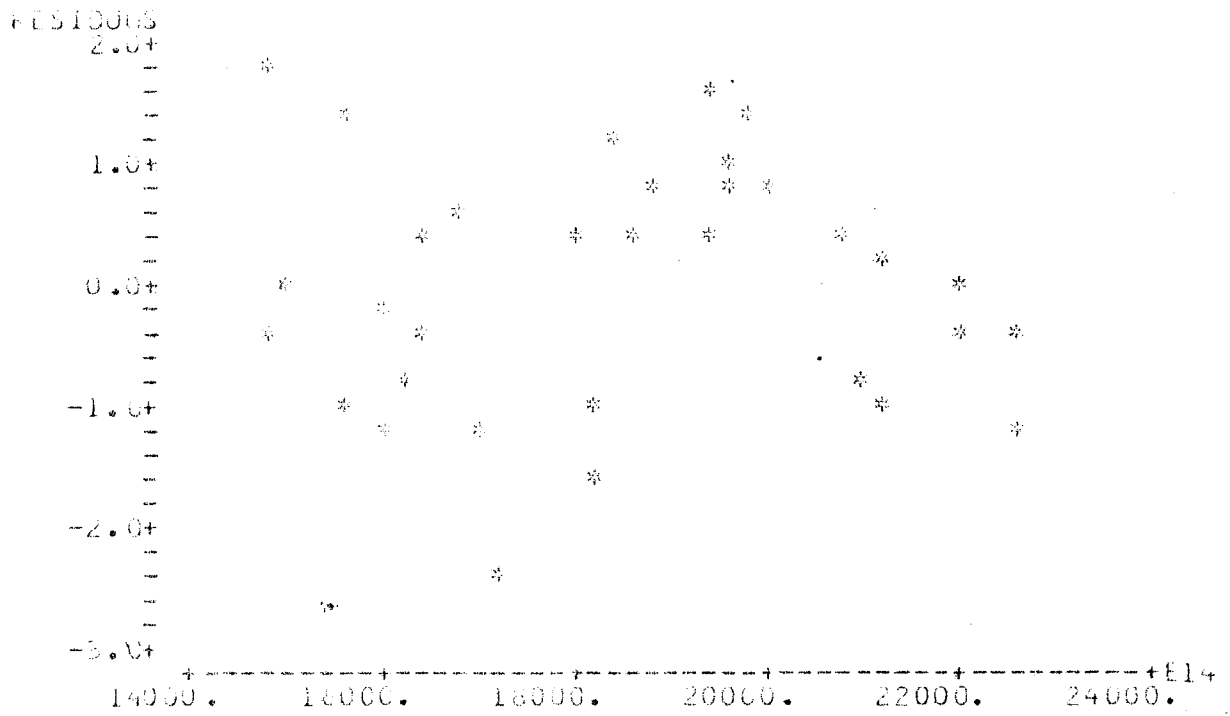


Fig. 79 Resíduos vs Variável x_1

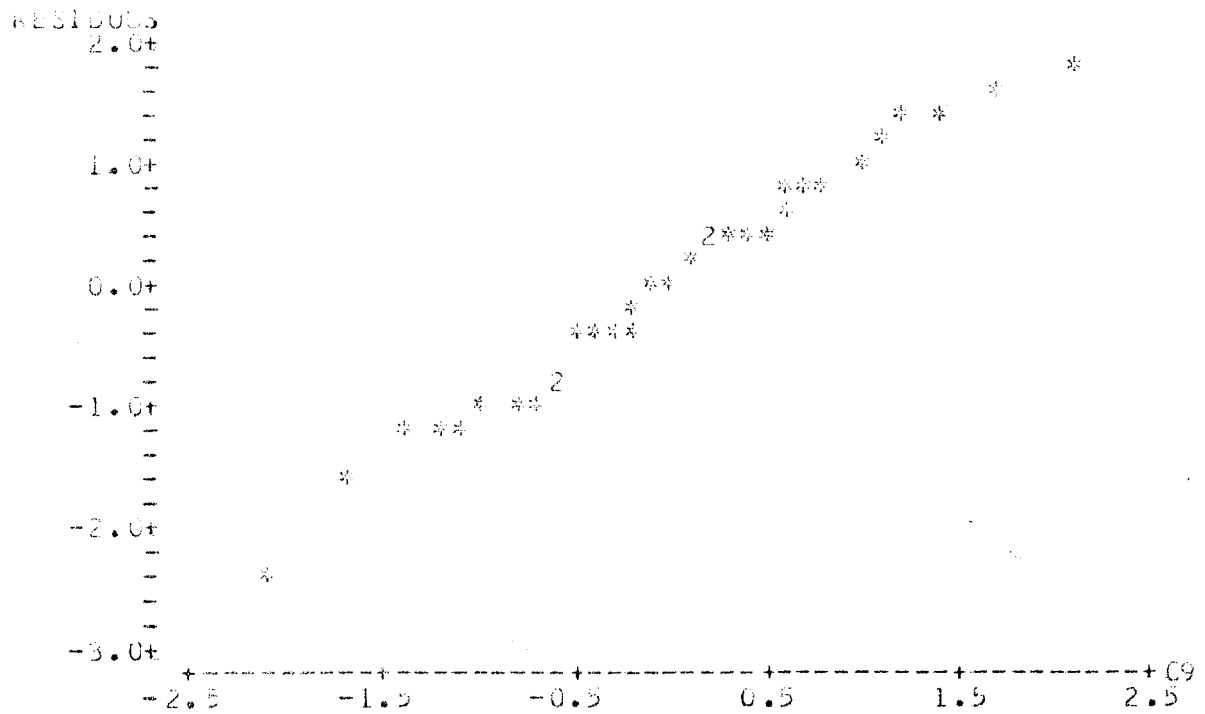


Fig. 80 Gráfico Probabilístico - ($R^2 = 98\%$)

4.3.1.2. Análise dos resultados - PEROBA ROSA

TÍTULO: RELAÇÃO ENTRE $MRF_{14,1f} \times E_{21,2f}$

ESPÉCIE: PEROBA ROSA (utilização do QUADRO XVIII)

QUADRO XXX RESUMO DA ANÁLISE DE REGRESSÃO

ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO	OBSERVAÇÕES
MODELO	$y = a_0 + a_1 x_1$	Equação obtida pelo ajuste e pela teoria dos mínimos quadrados.
EQUAÇÃO (4.5)	$MRF_{14,1f} = 10,4 + 0,0071 E_{21,2f}$	
COEF. DE CORRELAÇÃO LINEAR	$R^2 = 64,9\%$	Possui bom grau de correlação linear.
TESTE "F"	$F(1,92) = 170,24$ nível de significância α $\alpha < 0,1\%$	Regressão altamente significativa.
TESTE "t" (valor para variável)	$x_1: t = 13,05$ nível de significância α $\alpha < 0,05\%$	A variável x_1 está altamente correlacionada com y.
GRÁFICO DA EQUAÇÃO (4.5)	Fig. 81 $MRF_{14,1f}$ vs $E_{21,2f}$	Não revela tendência, modelo satisfatório. Não revela anomalia, modelo satisfatório. Pode-se considerar distribuição normal de resíduos.
ANÁLISE DE RESÍDUOS	Fig. 82 Resíduos vs Valores Preditos.	
	Fig. 83 Resíduos vs Variável x_1 .	
	Fig. 84 Gráfico Probabilístico. ($R^2 = 99\%$)	

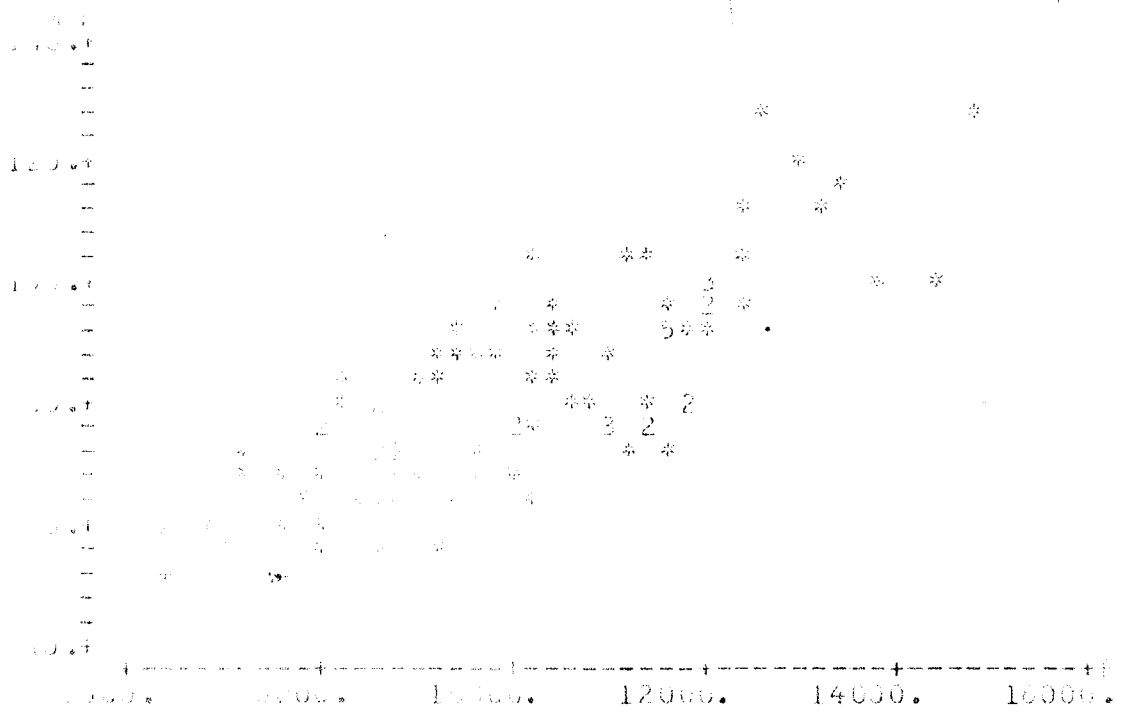


Fig. 81 MRF_{14,1f} vs E_{21,2f}

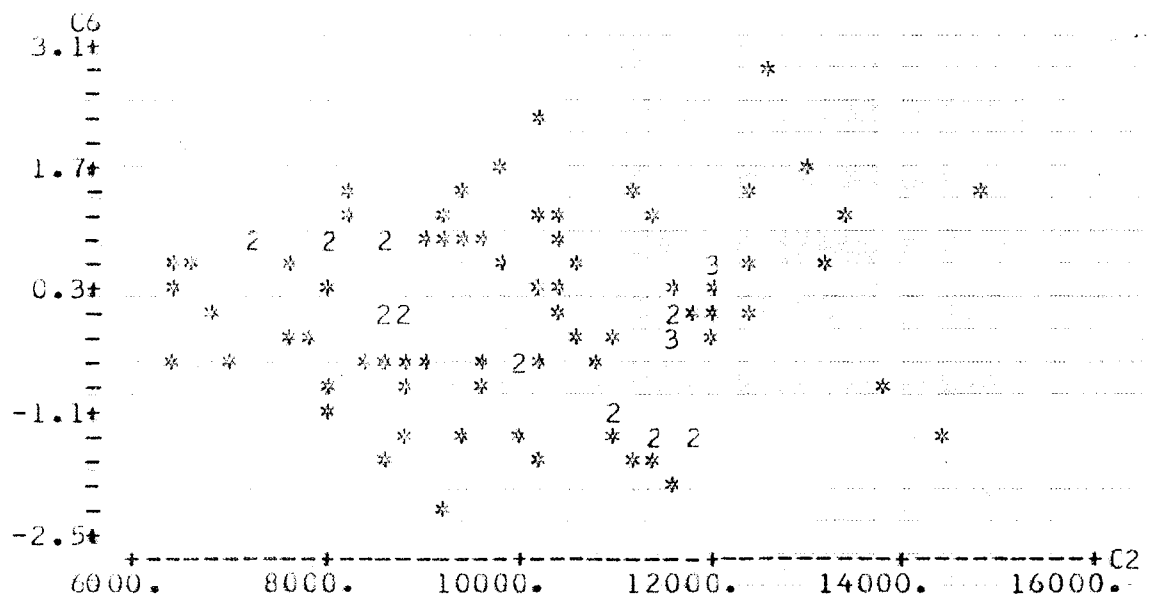


Fig. 82 Residuos vs Valores Preditos

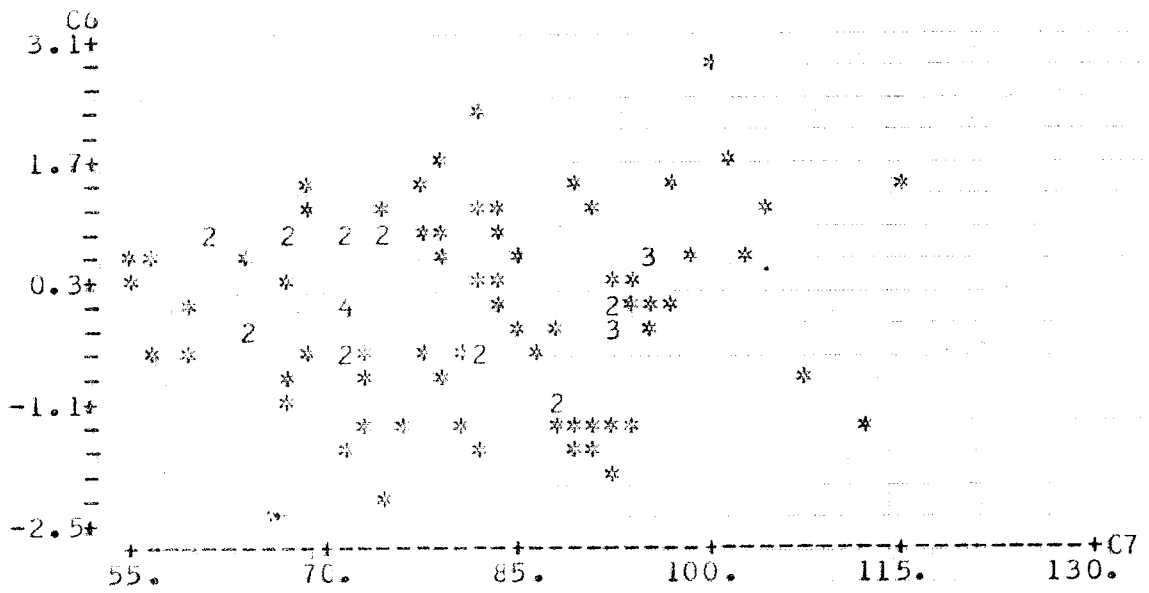


Fig. 83 Resíduos vs Variável x_1

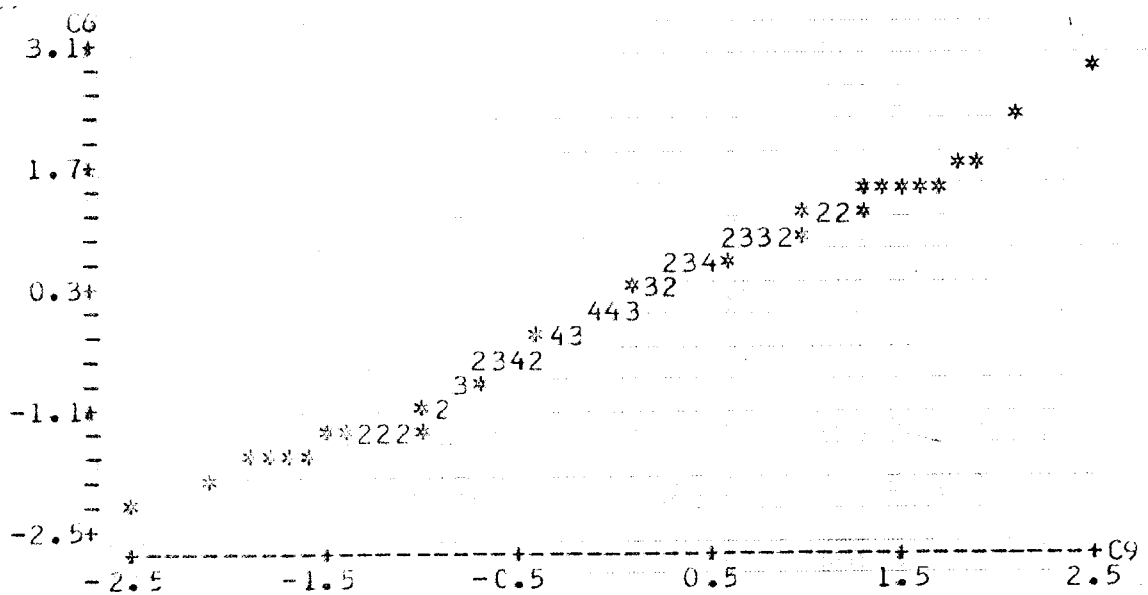


Fig. 84 Gráfico Probabilístico - ($R^2 = 99\%$)

TÍTULO: RELAÇÃO ENTRE $MRF_{14,1f} \times E_{21,1f}$

ESPÉCIE: PEROBA ROSA (utilização do QUADRO XIX)

QUADRO XXXI RESUMO DA ANÁLISE DE REGRESSÃO

ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO	OBSERVAÇÕES
MODELO	$y = a_0 + a_1 x_1$	Equação obtida pelo ajuste e pela teoria dos mínimos quadrados.
EQUAÇÃO (4.6)	$MRF_{14,1f} = 11,3 + 0,0065 E_{21,1f}$	
COEF. DE CORRELAÇÃO LINEAR	$R^2 = 71,5\%$	Possui bom grau de correlação linear.
TESTE "F"	$F(1,58) = 145,71$ nível de significância $\alpha < 0,1\%$	Regressão altamente significativa.
TESTE "t" (valor para variável)	$x_1: t = 12,07$ nível de significância $\alpha < 0,05\%$	A variável x_1 está altamente correlacionada com y .
GRÁFICO DA EQUAÇÃO (4.6)	Fig. 85 $MRF_{14,1f}$ vs $E_{21,1f}$	Não revela tendência, modelo satisfatório. Não revela anomalia, modelo satisfatório. Pode-se considerar distribuição normal de resíduos.
ANÁLISE DE RESÍDUOS	Fig. 86 Resíduos vs Valores Preditos.	
	Fig. 87 Resíduos vs Variável x_1 .	
	Fig. 88 Gráfico Probabilístico. ($R^2 = 95\%$)	

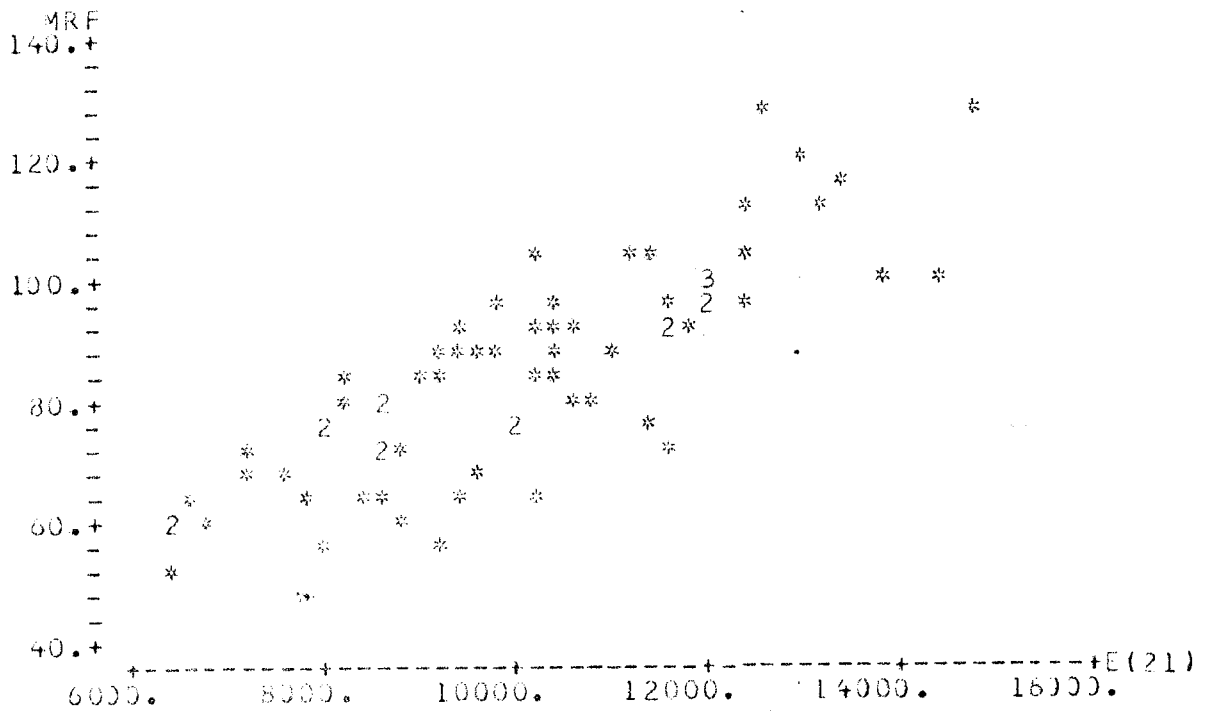


Fig. 85 MRF_{14,1f} vs E_{21,1f}

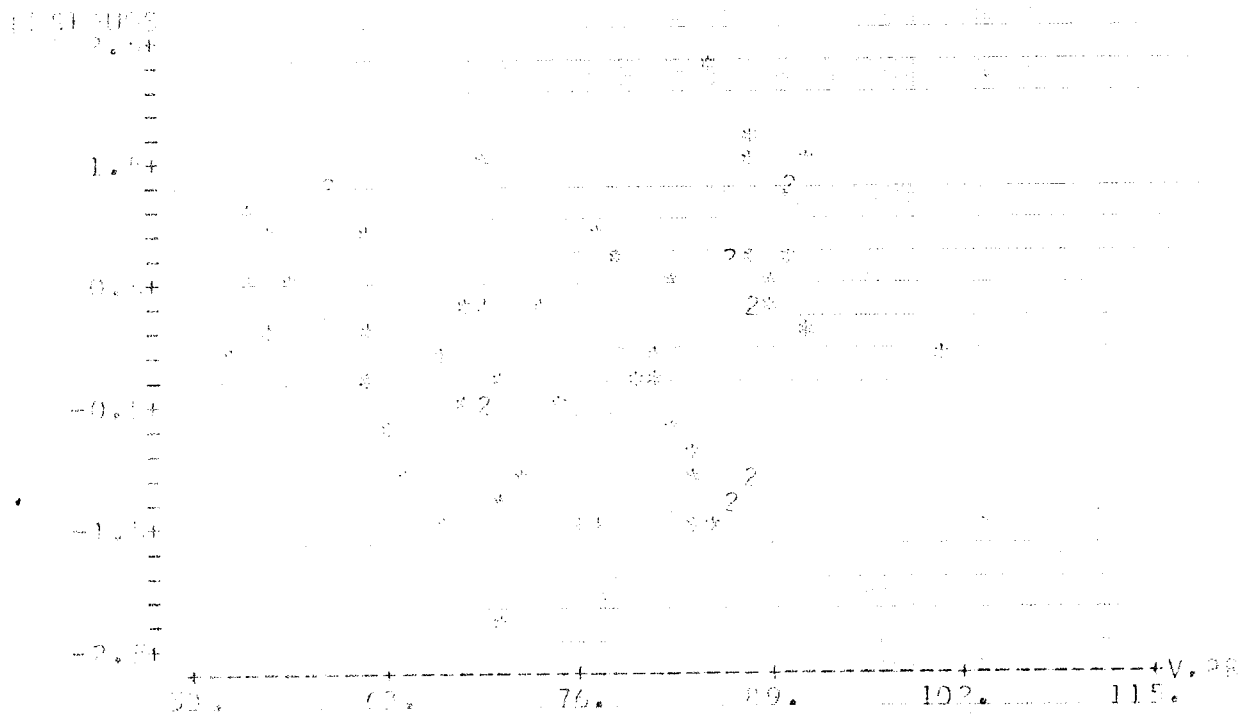


Fig. 86 Residuos vs Valores Preditos

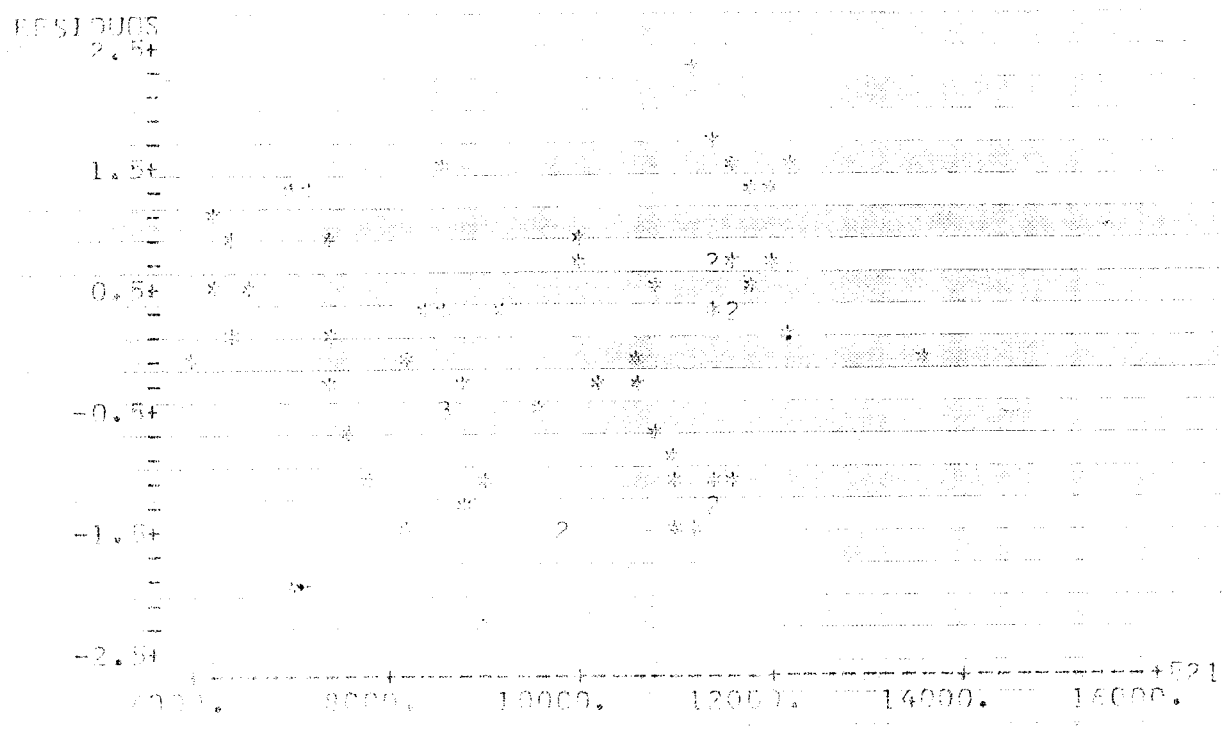


Fig. 87 Resíduos vs Variável x₁

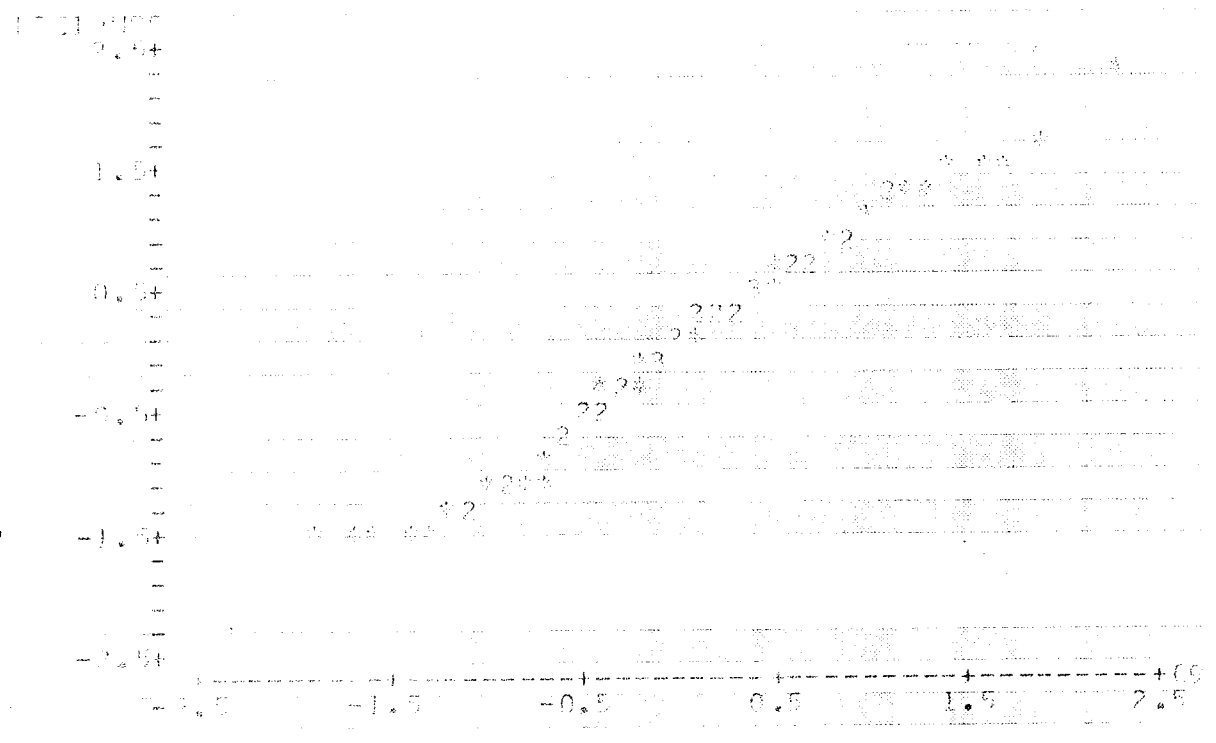


Fig. 88 Gráfico Probabilístico - ($R^2 = 95\%$)

TÍTULO: RELAÇÃO ENTRE $MRF_{14,1f} \times E_{14,1f}$

ESPÉCIE: PEROBA ROSA (utilização do QUADRO XVIII)

QUADRO XXXII RESUMO DA ANÁLISE DE REGRESSÃO

ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO	OBSERVAÇÕES
MODELO	$y = a_0 + a_1 x_1$	Equação obtida pelo ajuste e pela teoria dos mínimos quadrados.
EQUAÇÃO (4.7)	$MRF_{14,1f} = 8,12 + 0,0085 E_{14,1f}$	
COEF. DE CORRELAÇÃO LINEAR	$R^2 = 60,8\%$	Possui bom grau de correlação linear.
TESTE "F"	$F(1,92) = 142,57$ nível de significância $\alpha < 0,1\%$	Regressão altamente significativa.
TESTE "t" (valor para variável)	$x_1: t = 11,94$ nível de significância $\alpha < 0,05\%$	A variável x_1 está altamente correlacionada com y .
GRÁFICO DA EQUAÇÃO (4.7)	Fig. 89 $MRF_{14,1f}$ vs $E_{14,1f}$	
GRÁFICO DE RESÍDUOS	Fig. 90 Resíduos vs Valores	Não revela tendência, modelo satisfatório.
	Fig. 91 Resíduos vs Variável x_1 .	Não revela anomalia, modelo satisfatório.
	Fig. 92 Gráfico Probabilístico. ($R^2 = 99\%$)	Pode-se considerar distribuição normal de resíduos.

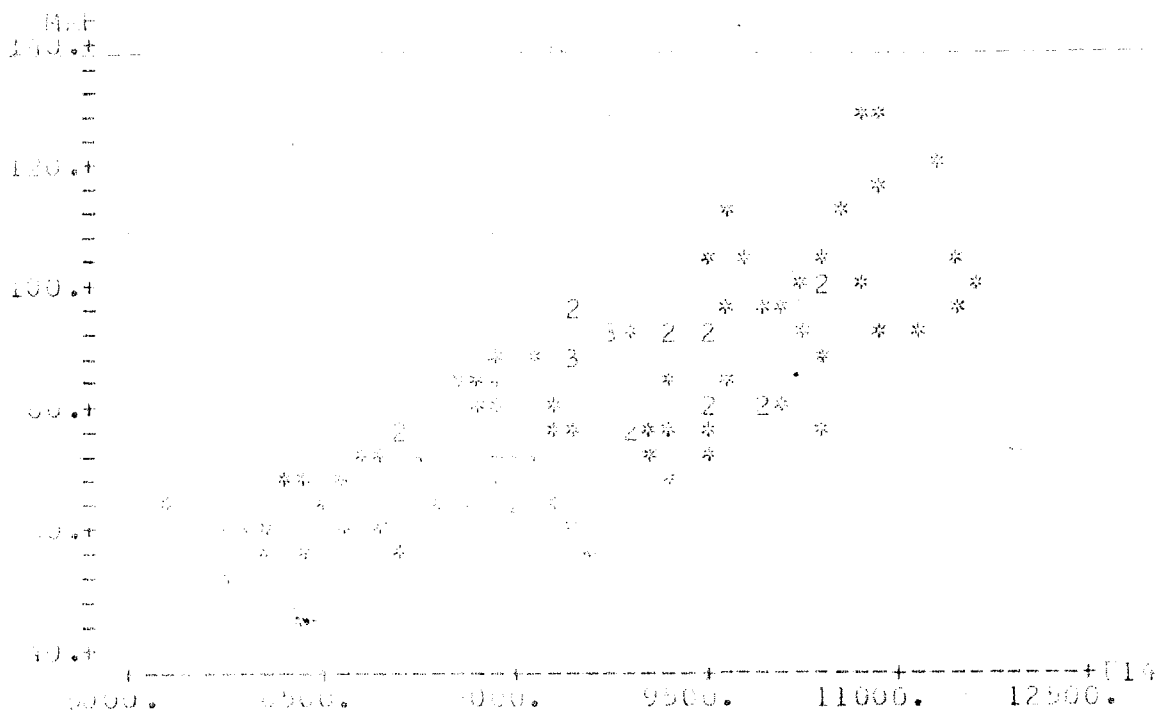


Fig. 89 MRF_{14,1f} vs E_{14,1f}

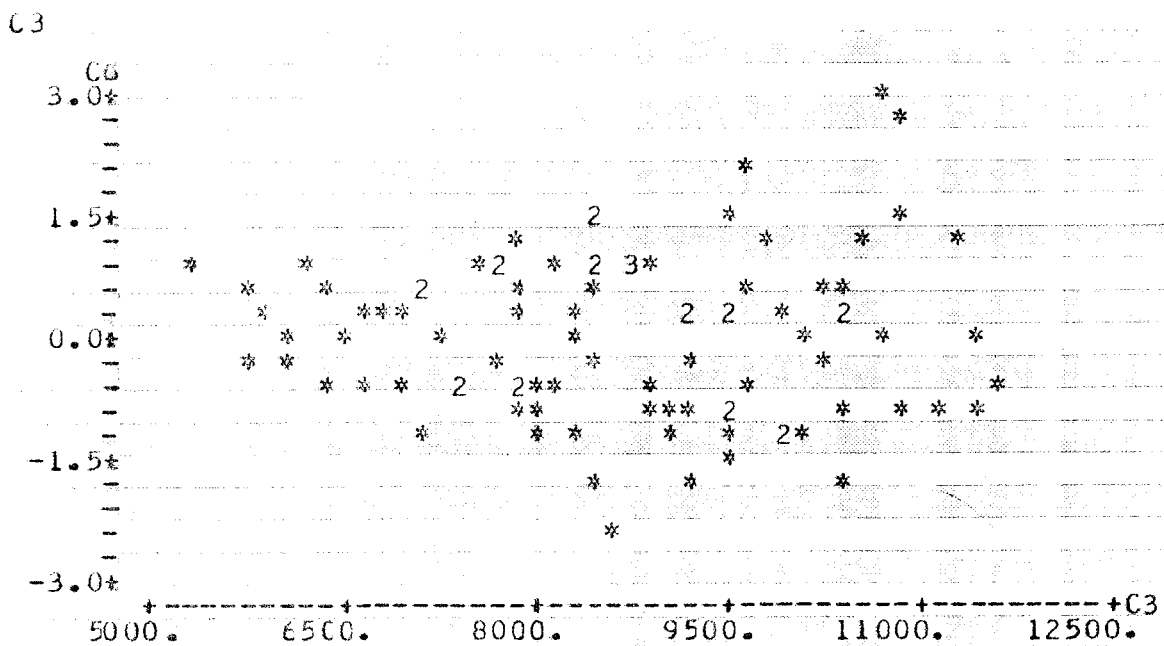


Fig. 90 Resíduos vs Valores Preditos

4.3.1.3. Análise dos resultados - EUC. TERETICORNIS

TÍTULO: RELAÇÃO ENTRE $MRF_{14,1f} \times E_{21,2f}$

ESPÉCIE: EUCALIPTO TERETICORNIS (Utilização do QUADRO XXIII)

QUADRO XXIII RESUMO DA ANÁLISE DE REGRESSÃO

ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO	OBSERVAÇÕES
MODELO	$y = a_0 + a_1 x_1$	Equação obtida pelo ajuste e pela teoria dos mínimos quadrados.
EQUAÇÃO (4.8)	$MRF_{14,1f} = 4,41 + 0,0086 E_{21,2f}$	
COEF. DE CORRELAÇÃO LINEAR	$R^2 = 96,2 \%$	Grau de correlação linear excelente
TESTE "F"	$F(1,31) = 774,39$ nível de significância α $\alpha < 0,1\%$	Regressão altamente significativa.
TESTE "t" (valor para variável)	$x_1: t = 27,83$ nível de significância α $\alpha < 0,05\%$	A variável x_1 está altamente correlacionada com y.
GRÁFICO DA EQUAÇÃO (4.8)	Fig. 93 $MRF_{14,1f}$ vs $E_{21,1f}$	Não revela tendência, modelo satisfatório. Não revela anomalia, modelo satisfatório. Pode-se considerar distribuição normal de resíduos.
ANÁLISE DE RESÍDUOS	Fig. 94 Resíduos vs Valores Preditos	
	Fig. 95 Resíduos vs Variável x_1 .	
	Fig. 96 Gráfico Probabilístico. ($R^2 = 98\%$)	

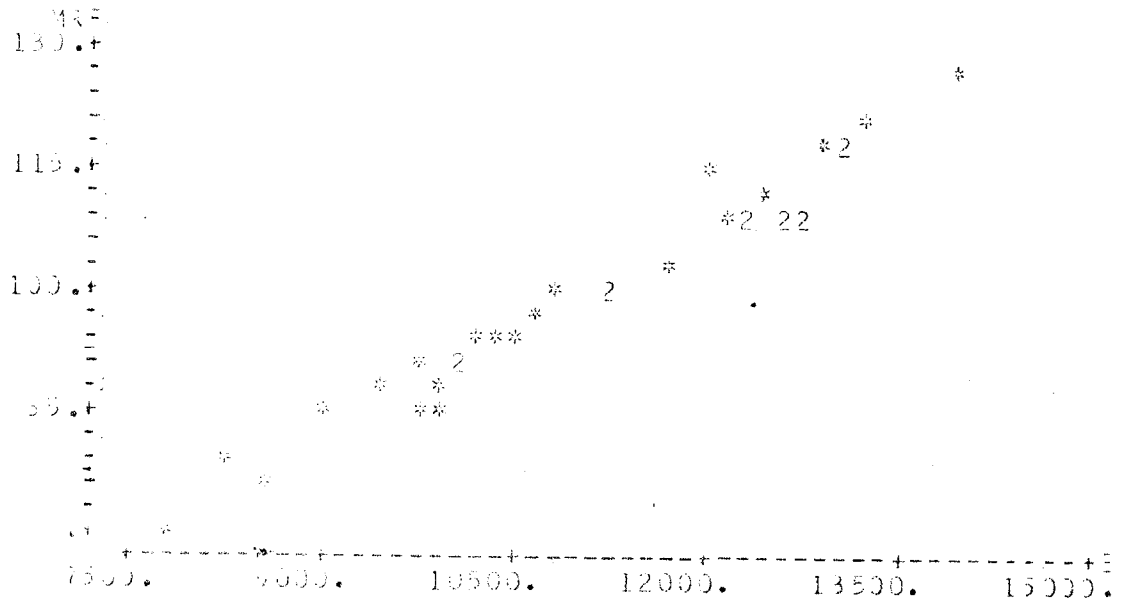


Fig. 93 MRF_{14,1f} vs E_{21,2f}

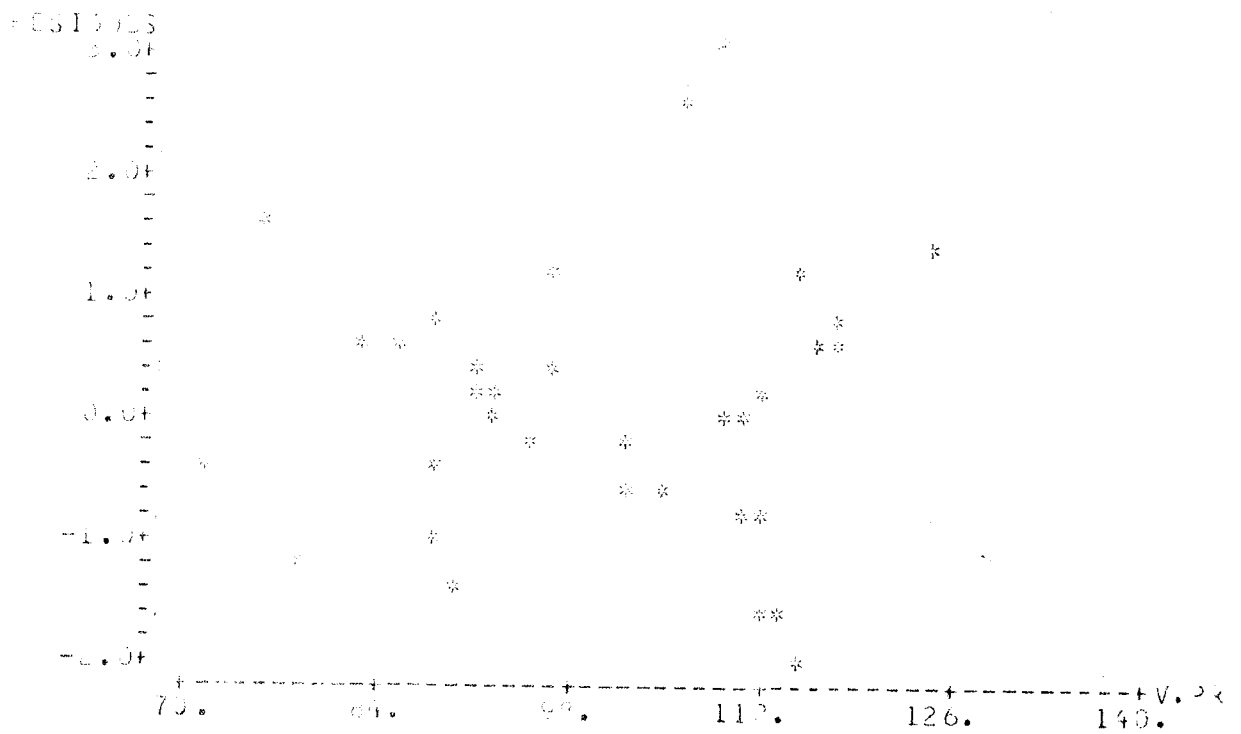


Fig. 94 Residuos vs Valores Preditos

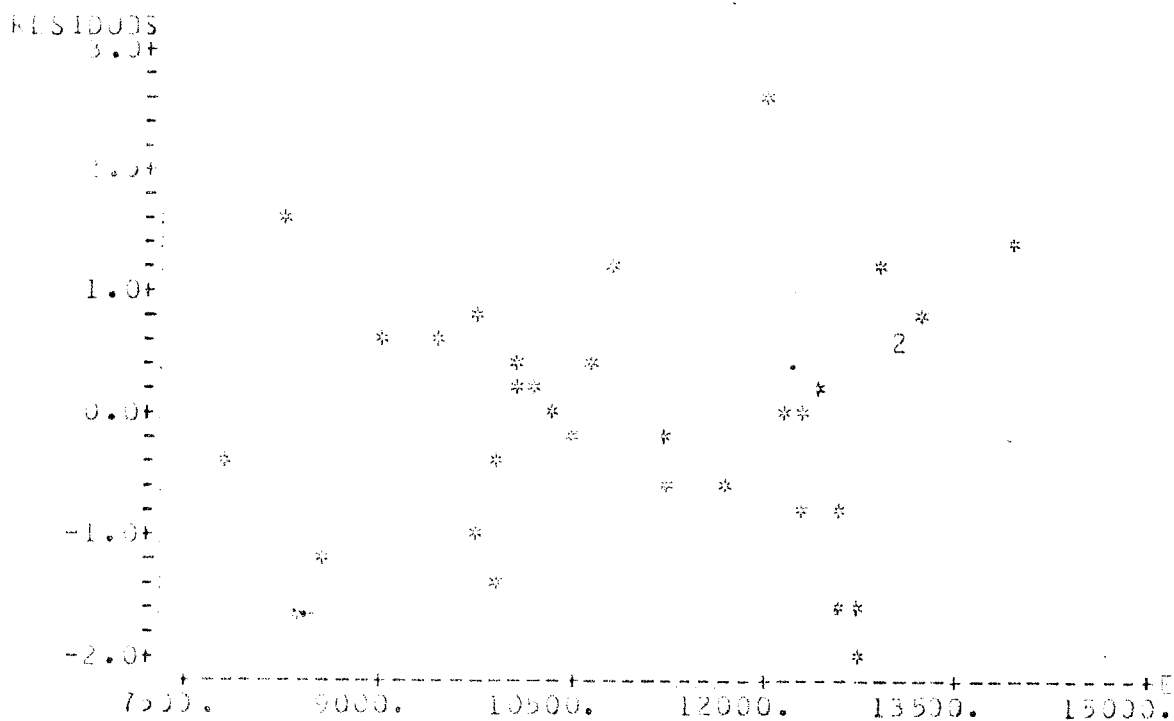


Fig. 95 Resíduos vs Variável x_1

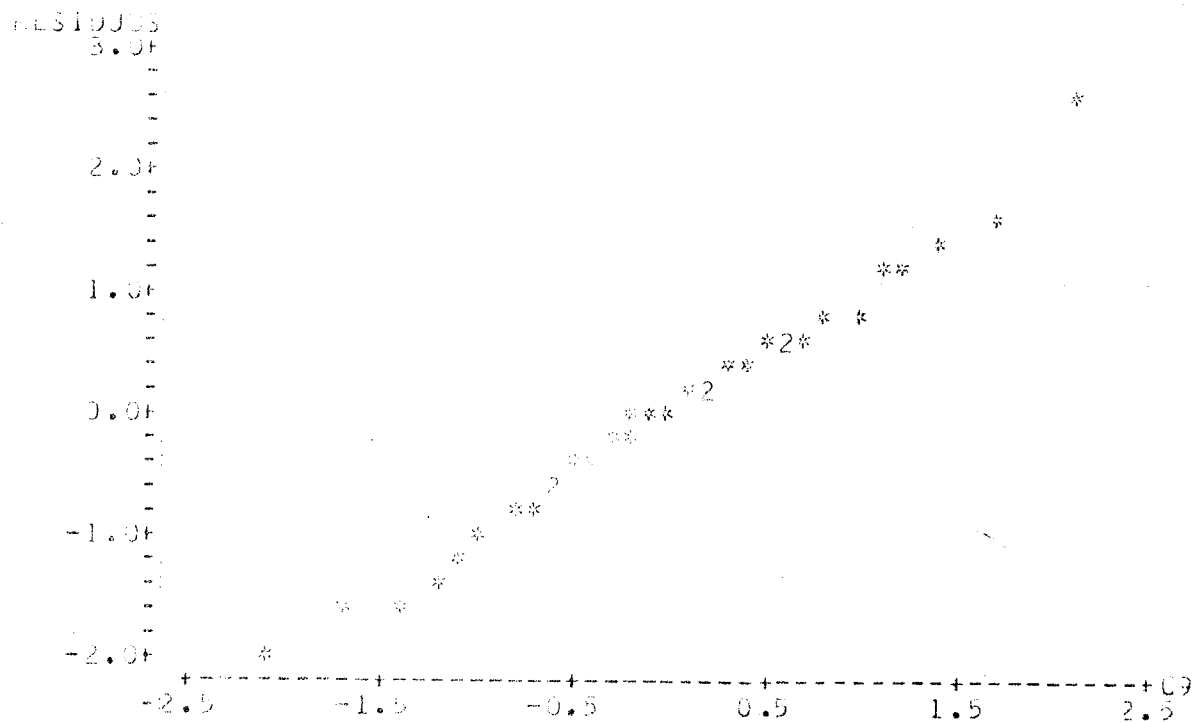


Fig. 96 Gráfico Probabilístico - ($R^2 = 98\%$)

TÍTULO: RELAÇÃO ENTRE $MRF_{14,1f} \times E_{14,1f}$

ESPÉCIE: EUCALIPTO TERETICORNIS (Utilização do QUADRO XXIII)

QUADRO XXXIV RESUMO DA ANÁLISE DE REGRESSÃO

ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO	OBSERVAÇÕES
MODELO	$y = a_0 + a_1 x_1$	Equação obtida pelo ajuste e pela teoria dos mínimos quadrados.
EQUAÇÃO (4.9)	$MRF_{14,1f} = 19,2 + 0,0083 E_{14,1f}$	
COEF. DE CORRELAÇÃO LINEAR	$R^2 = 61,9\%$	Possui bom grau de correlação linear.
TESTE "F"	$F(1,33) = 50,33$ nível de significância α $\alpha < 0,1\%$	Regressão altamente significativa.
TESTE "t" (valor para variável)	$x_1: t = 7,09$ nível de significância α $\alpha < 0,05\%$	A variável x_1 está altamente correlacionada com y .
GRÁFICO DA EQUAÇÃO (4.9)	Fig. 97 $MRF_{14,1f}$ vs $E_{14,1f}$	Não revela tendência, modelo satisfatório. Não revela anomalia, modelo satisfatório. Pode-se considerar distribuição normal de resíduos.
ANÁLISE DE RESÍDUOS	Fig. 98 Resíduos vs Valores Preditos.	
	Fig. 99 Resíduos vs Variável x_1 .	
	Fig. 100 Gráfico Probabilístico. ($R^2 = 95\%$)	

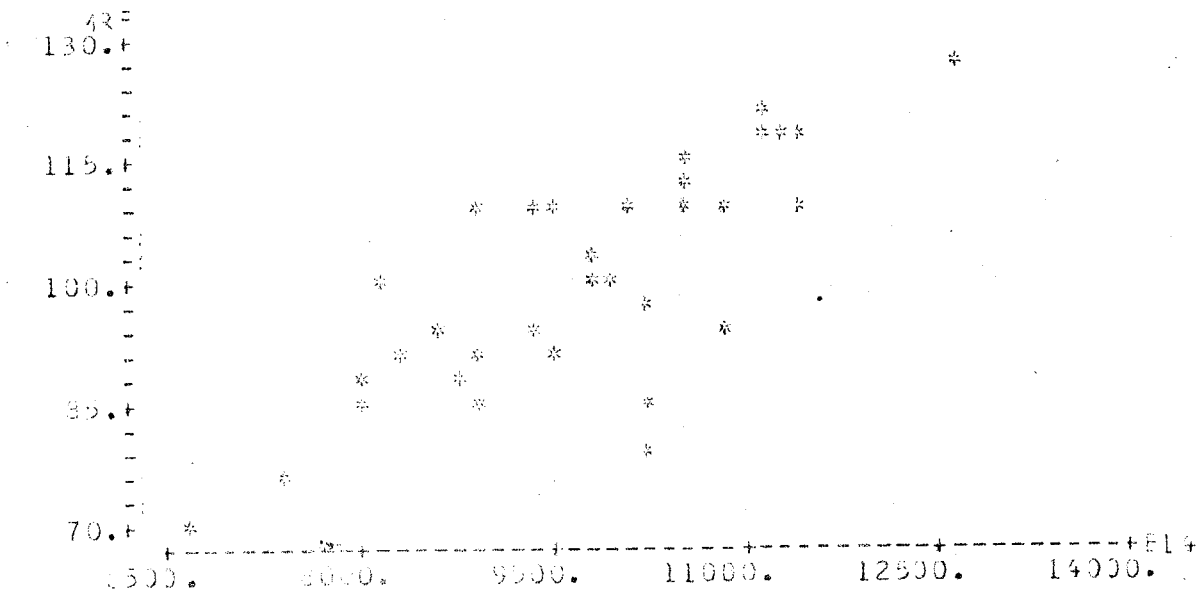


Fig. 97 MRF_{14,1f} vs E_{14,1f}

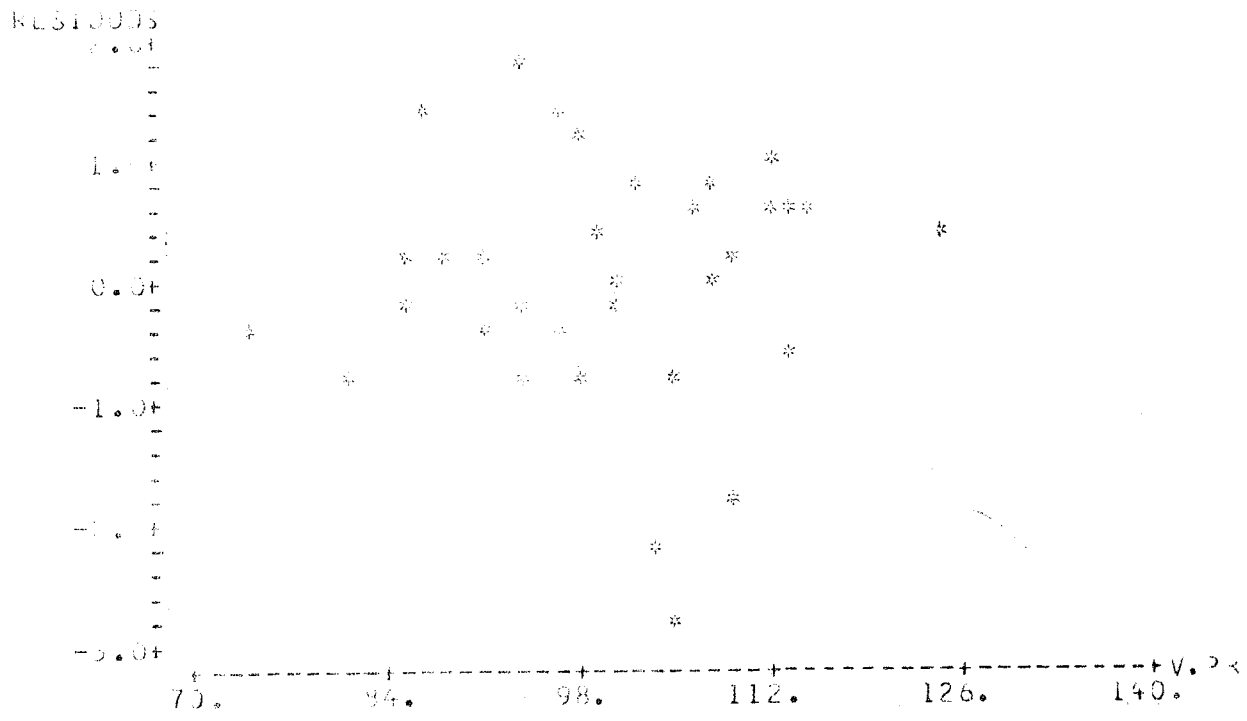


Fig. 98 Resíduos vs Valores Preditos

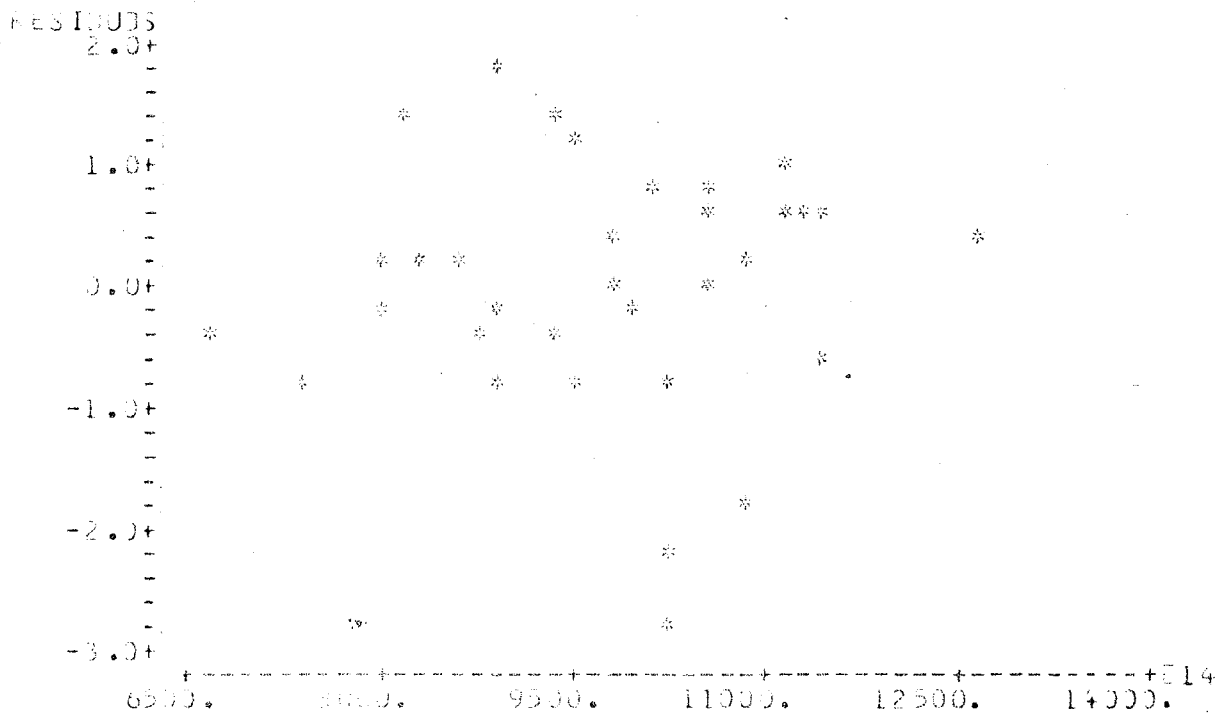


Fig. 99 Resíduos vs Variável x_1

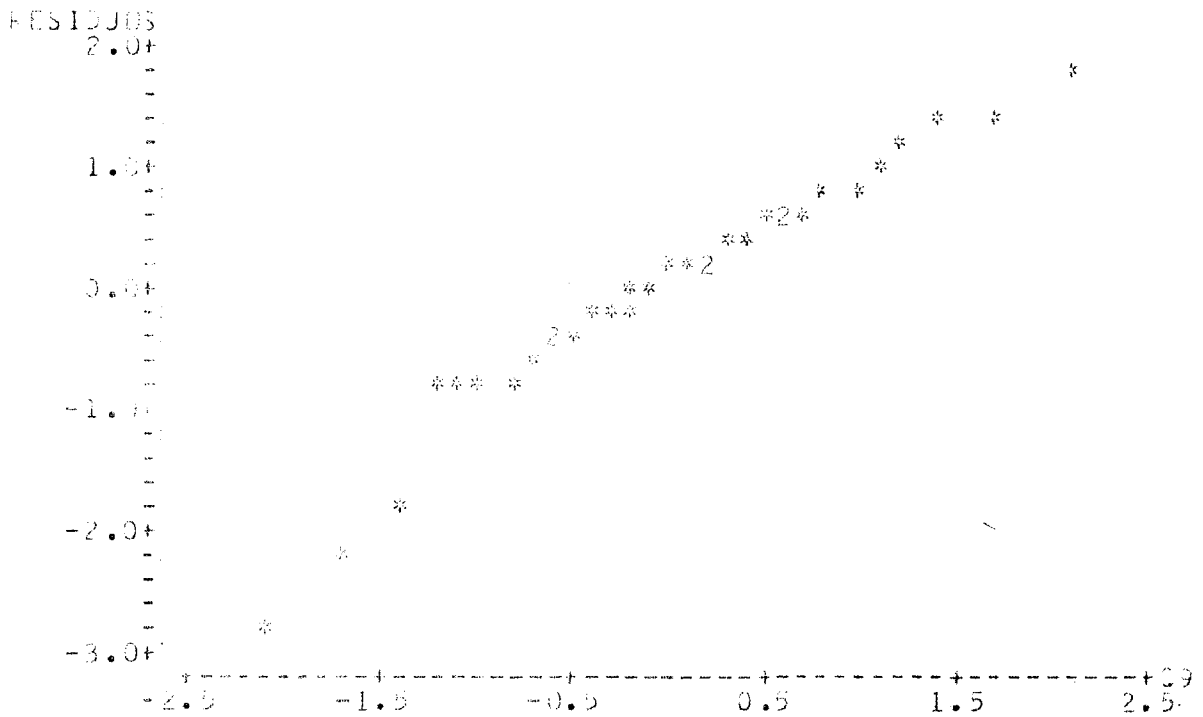


Fig. 100 Gráfico Probabilístico - ($R^2 = 95\%$)

4.3.2. Estimativa do número mínimo de corpos de prova para avaliar os parâmetros MRF e E no ensaio de flexão estática

HELLMEISTER (1972), fez referência a necessidade de se estabelecer um número mínimo de corpos de prova, com o intuito de se alcançar validade estatística para os resultados de ensaios.

Propõe-se aqui sugestão no que se refere ao número de corpos de prova, para avaliação dos parâmetros de ruptura e de elasticidade de uma amostra.

Com base na experimentação, constatou-se que os parâmetros de elasticidade e de ruptura estudados, seguem a distribuição normal (ver capítulo 10 e 11). Para pequenas amostras pode-se utilizar a distribuição de Student e aplicar a expressão para se estimar o número mínimo de corpos de prova:

$$n \geq \frac{t_{0,5}^2 s^2}{\delta^2} \quad (4.10)$$

$s = \alpha \bar{x}$, sendo α o valor da relação s/\bar{x} , tabelado para as espécies ensaiadas e associado a outros ensaios de flexão executados no LAMEM.

\bar{x} = média aritmética dos dados

δ = coeficiente de variação, estimado para madeira, igual a $0,20\bar{x}$.

No QUADRO XXXIV são apresentados os valores da razão s/\bar{x} para os parâmetros de ruptura e de elasticidade, para espécies de madeiras estudadas.

QUADRO XXXIV Valores de s/\bar{x} para Parâmetros de Ruptura e de Elasticidade

ESPÉCIE	MRF s/\bar{x}	$E_{21,2f}$ s/\bar{x}	$E_{21,1f}$ s/\bar{x}	$E_{14,1f}$ s/\bar{x}
Jatobá	0,140	0,148	0,147	0,130
Peroba Rosa	0,204	0,188	0,199	0,176
Eucalipto Tereticornis	0,141	0,144	-	0,137
Média	0,162	0,160	0,173	0,148

Se adotado $s = 0,175\bar{x}$, todas as situações do QUADRO XXXIV estão satisfeitas. Acrescenta-se o fato que ROCCO LAHR (1983), estudando este assunto estimou s em $0,18\bar{x}$. Desta maneira:

$$n \geq 6$$

Diante deste fato optou-se por adotar o valor de n igual a 6. Portanto, 6 corpos de prova são considerados estatisticamente suficientes para obter resultados confiáveis e significantes para o ensaio de flexão estática.

Foram utilizados 6 corpos de prova de Gonçalo Alves e 6 corpos de prova de Peroba do Norte (ver item 3.2.2.).

4.3.2.1. Análise dos resultados - GONÇALO ALVES

TÍTULO: RELAÇÃO ENTRE $MRF_{14,1f} \times E_{21,2f}$

ESPÉCIE: GONÇALO ALVES (Utilização do QUADRO XXII)

QUADRO: XXXV RESUMO DA ANÁLISE DE REGRESSÃO

ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO	OBSERVAÇÕES
MODELO	$y = a_0 + a_1 x_1$	Equação obtida pelo ajuste e pela teoria dos mínimos quadrados.
EQUAÇÃO (4.11)	$MRF_{14,1f} = 0,664 + 0,0059 E_{21,2f}$	
COEF. DE CORRELAÇÃO LINEAR	$R^2 = 60,8\%$	Possui bom grau de correlação linear
TESTE "F"	$F(1,4) = 6,15$ nível de significância α $\alpha < 7,42\%$	Pode-se considerar a regressão aceitável.
TESTE "t" (valor para variável)	$x_1: t = 2,48$ nível de significância α $\alpha = 2,90\%$	A variável x_1 está bem correlacionada com y .
GRÁFICO DA EQUAÇÃO (4.11)	Fig.101 $MRF_{14,1f} \text{ vs } E_{21,2f}$	Não revela tendência, modelo satisfatório. Não revela anomalia, modelo satisfatório. Pode-se considerar distribuição normal de resíduos.
ANÁLISE DE RESÍDUOS	Fig.102 Resíduos vs Valores Preditos.	
	Fig.103 Resíduos vs Variável x_1 .	
	Fig.104 Gráfico Probabilístico. ($R^2 = 97\%$)	

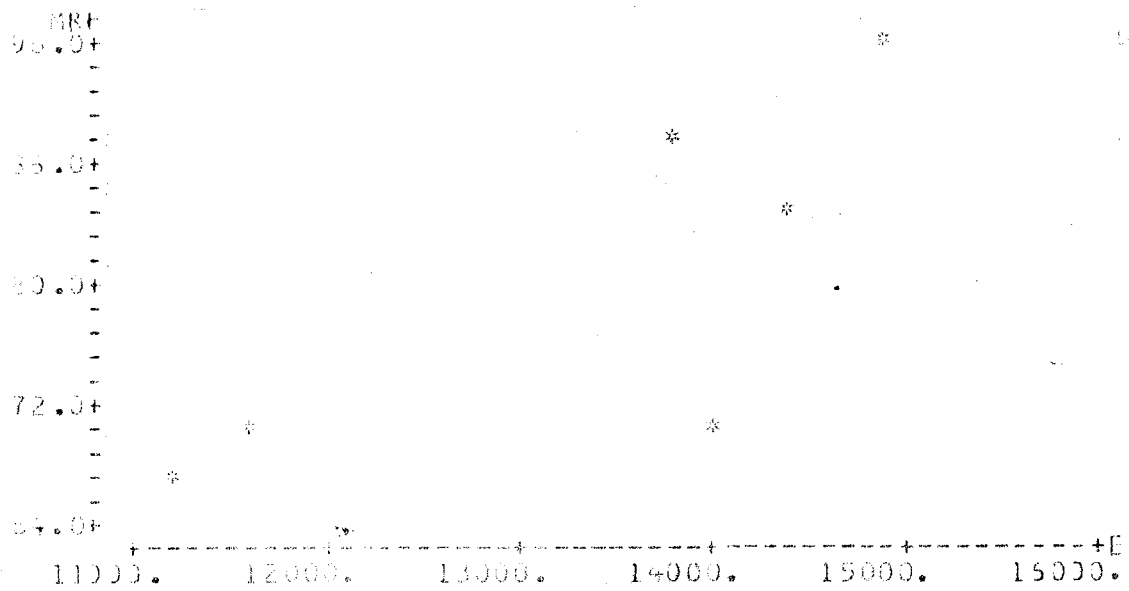


Fig. 101 MRF_{14,1f} vs E_{21,2f}

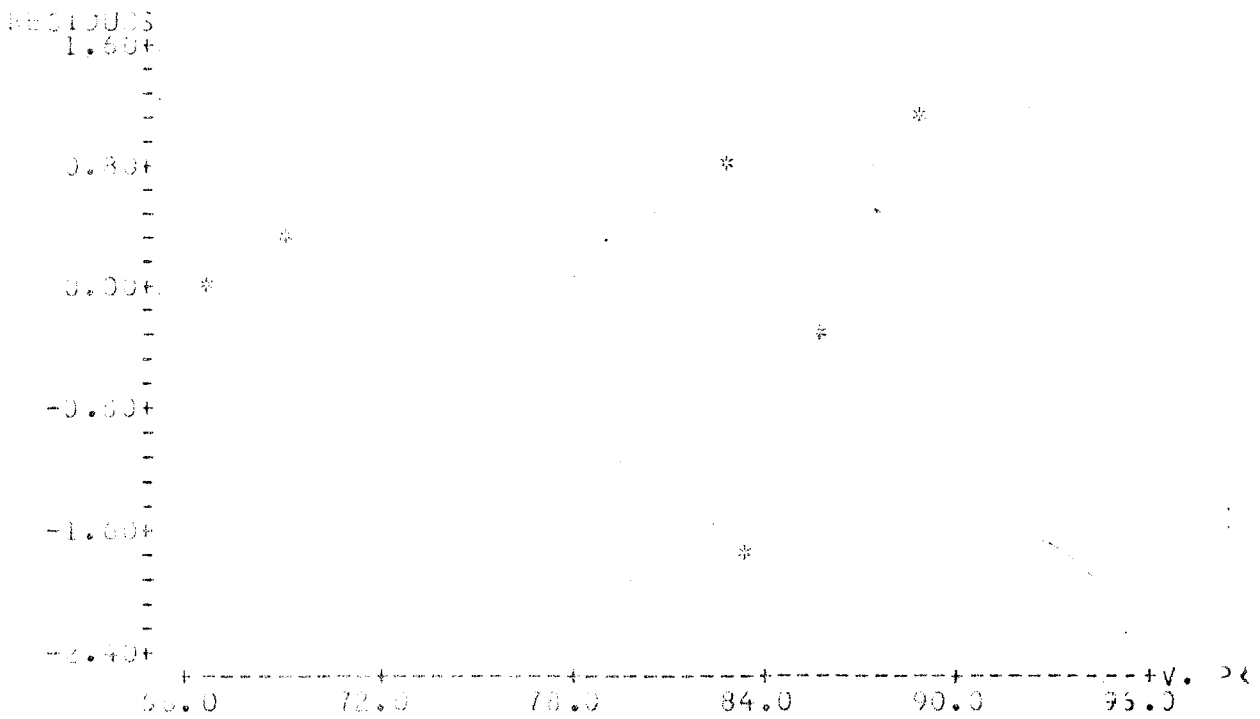


Fig. 102 Resíduos vs Valores Preditos

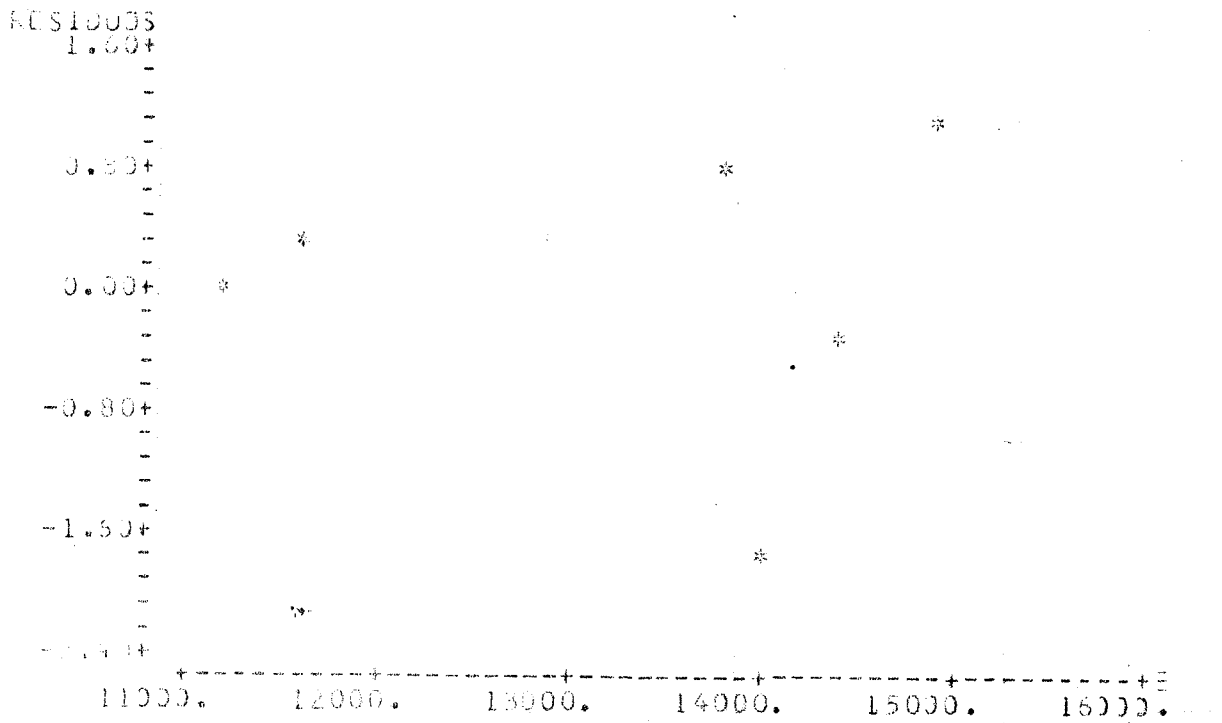


Fig. 103 Resíduos vs Variável x_1

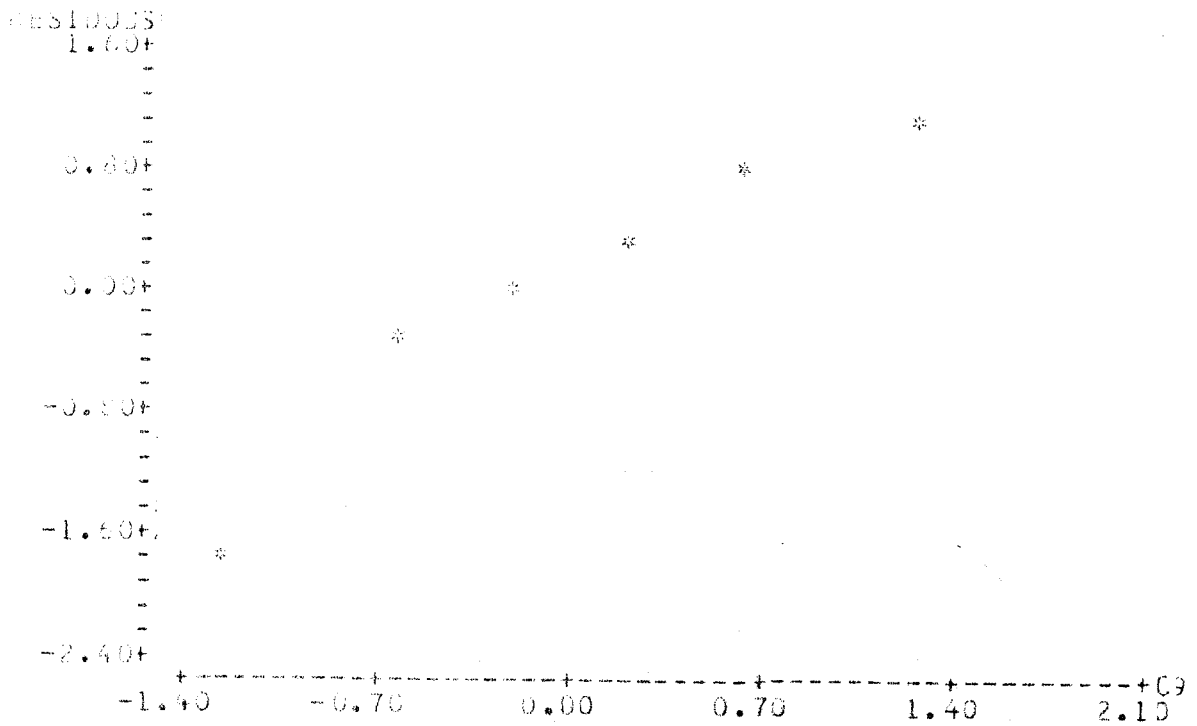


Fig. 104 Gráfico Probabilístico - ($R^2 = 97\%$)

TÍTULO: RELAÇÃO ENTRE $MRF_{14,1f} \times E_{21,1f}$

ESPÉCIE: GONÇALO ALVES (Utilização do QUADRO XXII)

QUADRO XXXVI RESUMO DA ANÁLISE DE REGRESSÃO

ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO	OBSERVAÇÕES
MODELO	$y = a_0 + a_1 x_1$	Equação obtida pelo ajuste e pela teoria dos mínimos quadrados.
EQUAÇÃO (4.12)	$MRF_{14,1f} = 3,52 + 0,0058 E_{21,1f}$	
COEF. DE CORRELAÇÃO LINEAR	$R^2 = 56,4\%$	Possui bom grau de correlação linear.
TESTE "F"	$F(1,4) = 5,16$ nível de significância α $\alpha = 8,99\%$	Pode-se considerar a regressão aceitável.
TESTE "t" (valor para variável)	$x_1: t = 2,27$ nível de significância α $\alpha = 2,70\%$	A variável x_1 está bem correlacionada com y .
GRÁFICO DA EQUAÇÃO (4.12)	Fig.105 $MRF_{14,1f}$ vs $E_{21,1f}$	<p>Não revela tendência, modelo satisfatório.</p> <p>Não revela anomalia, modelo satisfatório.</p> <p>Pode-se considerar distribuição normal de resíduos.</p>
ANÁLISE DE RESÍDUOS	Fig.106 Resíduos vs Valores Preditos.	
	Fig.107 Resíduos vs Variável x_1 .	
	Fig.108 Gráfico Probabilístico. ($R^2 = 74\%$)	

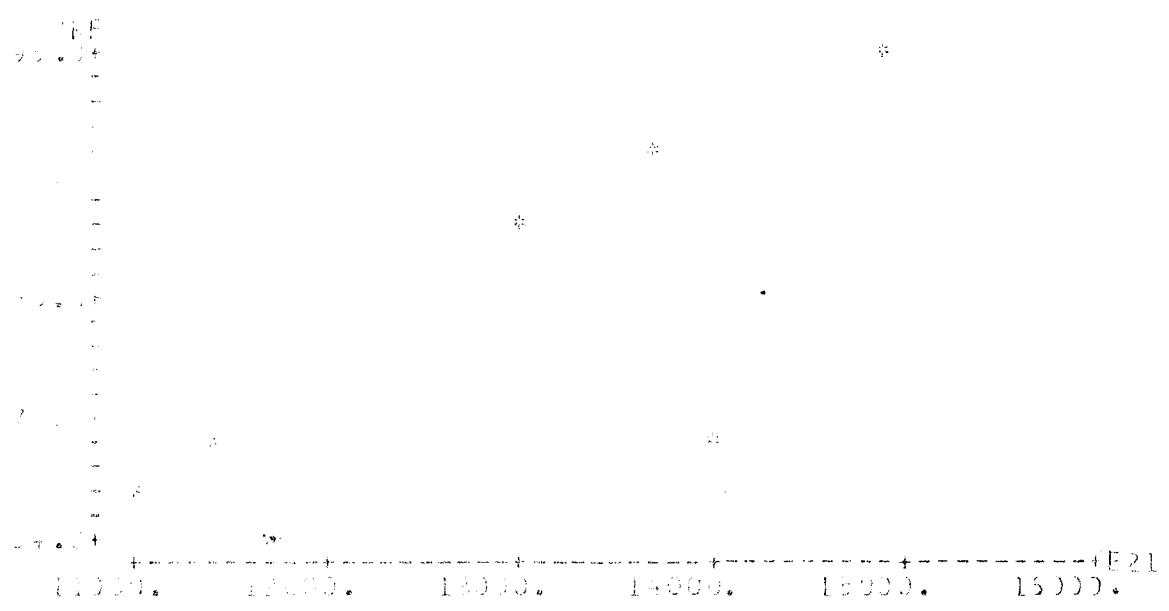


Fig. 105 MRF_{14,1f} vs E_{21,1f}

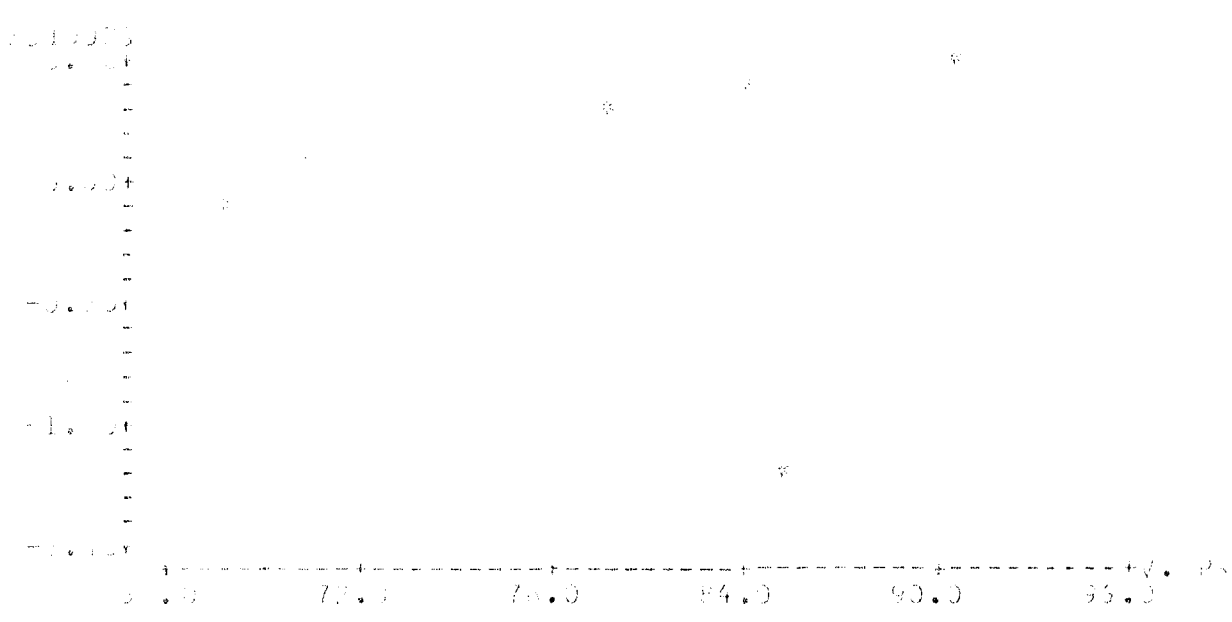


Fig. 106 Residuos vs Valores Preditos

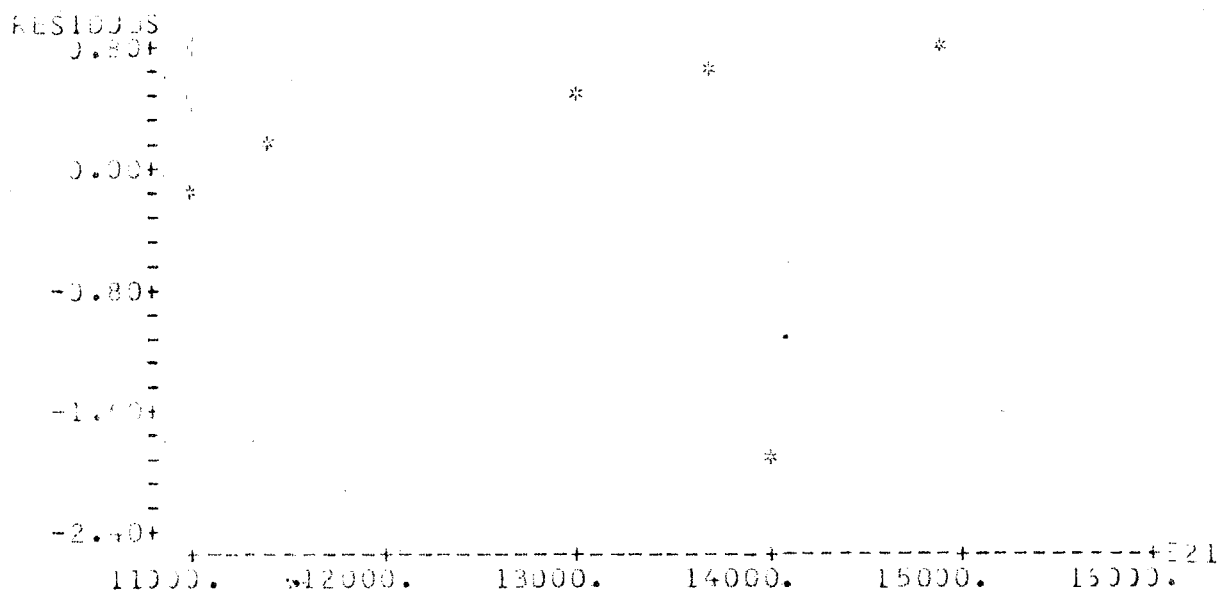


Fig. 107 Resíduos vs Variável x_1

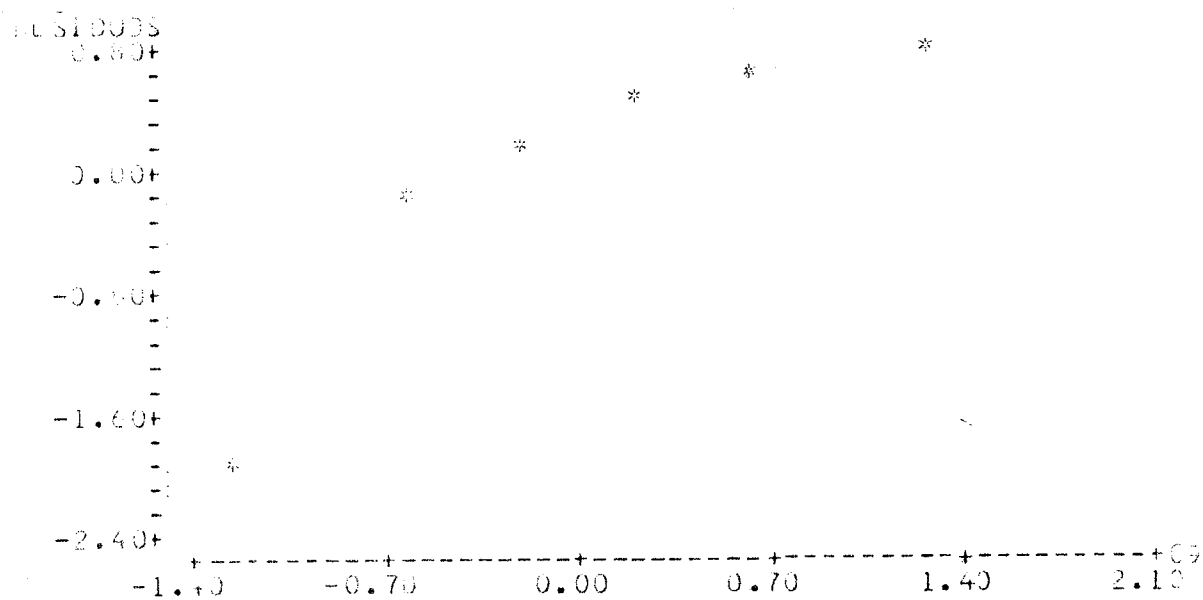


Fig. 108 Gráfico Probabilístico - ($R^2 = 74\%$)

TÍTULO: RELAÇÃO ENTRE $MRF_{14,1f} \times E_{14,1f}$

ESPÉCIE: GONÇALO ALVES (Utilização do QUADRO XXII)

QUADRO XXXVII RESUMO DA ANÁLISE DE REGRESSÃO

ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO	OBSERVAÇÕES
MODELO	$y = a_0 + a_1 x_1$	Equação obtida pelo ajuste e pela teoria dos mínimos quadrados.
EQUAÇÃO (4.13)	$MRF_{14,1f} = 8,14 + 0,0075 E_{14,1f}$	
COEF. DE CORRELAÇÃO LINEAR	$R^2 = 84,2\%$	Possui bom grau de correlação linear.
TESTE "F"	$F(1,4) = 21,38$ nível de significância α $\alpha = 0,99\%$	Regressão altamente significativa.
TESTE "t" (valor para variável)	$x_1: t = 4,62$ nível de significância α $\alpha = 0,30\%$	A variável x_1 está bem correlacionada com y .
GRÁFICO DA EQUAÇÃO (4.13)	Fig. 109 $MRF_{14,1f} \text{ vs } E_{14,1f}$	Não revela tendência, modelo satisfatório. Não revela anomalia, modelo satisfatório. Pode-se considerar distribuição normal de resíduos.
ANÁLISE DE RESÍDUOS	Fig. 110 Resíduos vs Valores Preditos.	
	Fig. 111 Resíduos vs Variável x_1 .	
	Fig. 112 Gráfico Probabilístico. ($R^2 = 93\%$)	

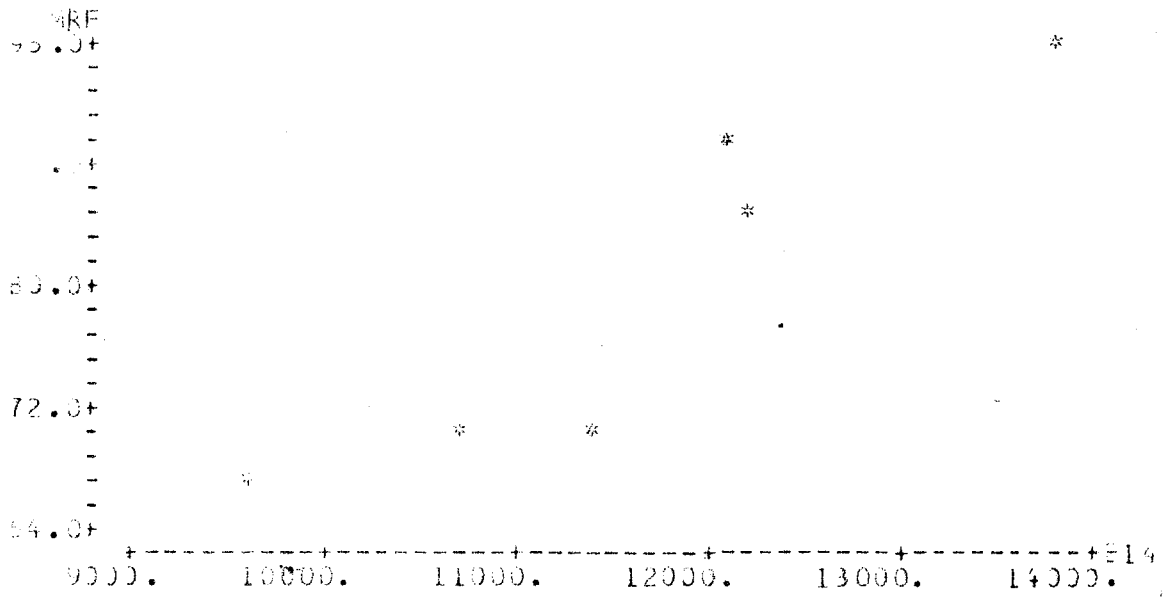


Fig. 109 MRF_{14,1f} vs E_{14,1f}

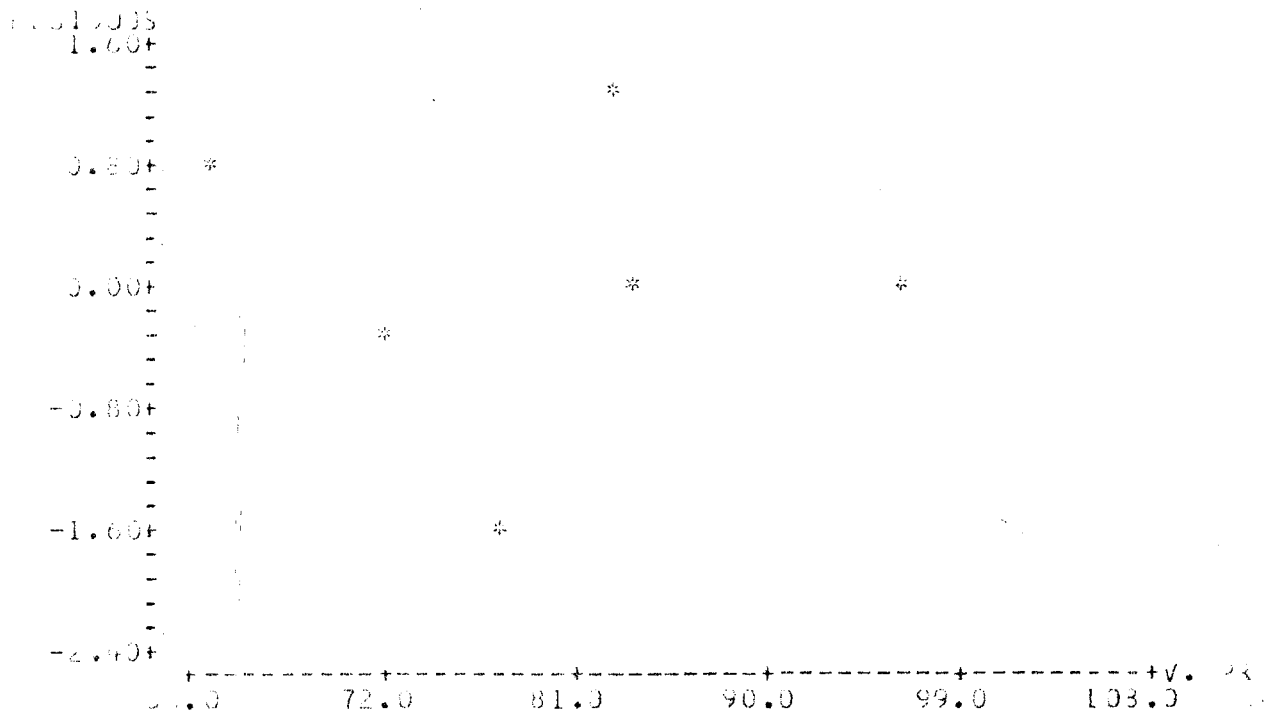


Fig. 110 Resíduos vs Valores Preditos

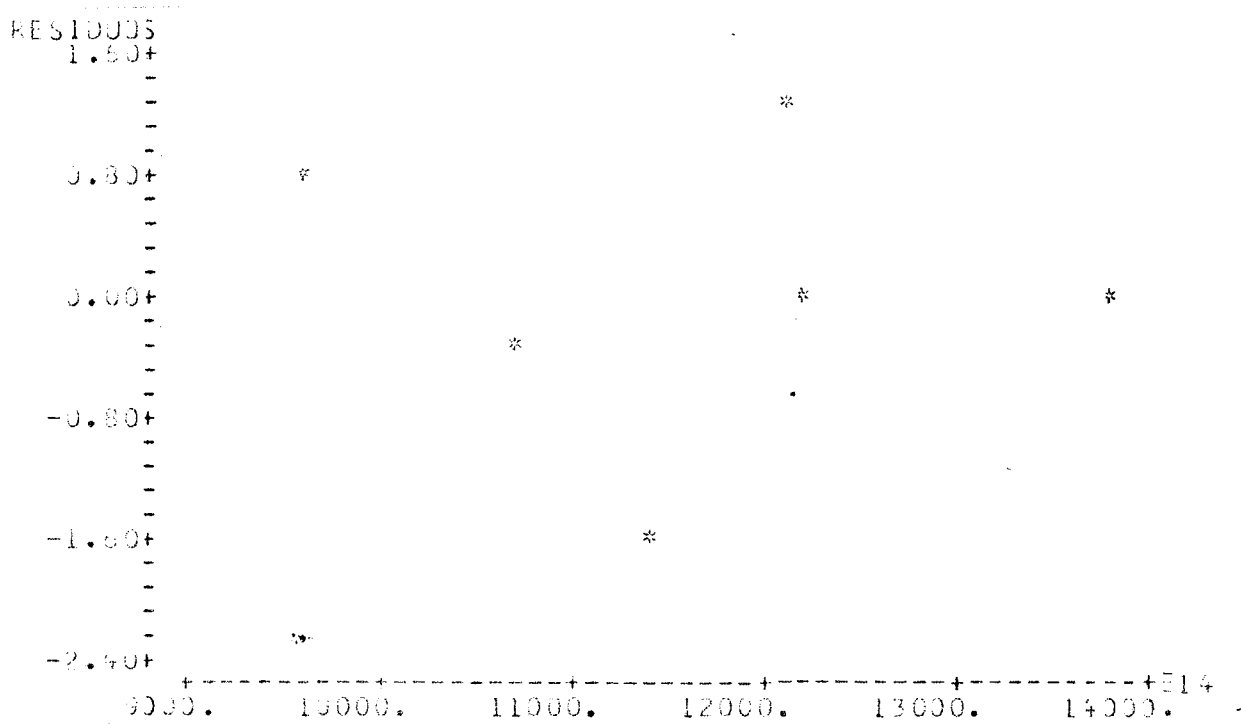


Fig. 111 Resíduos vs Variável x_1

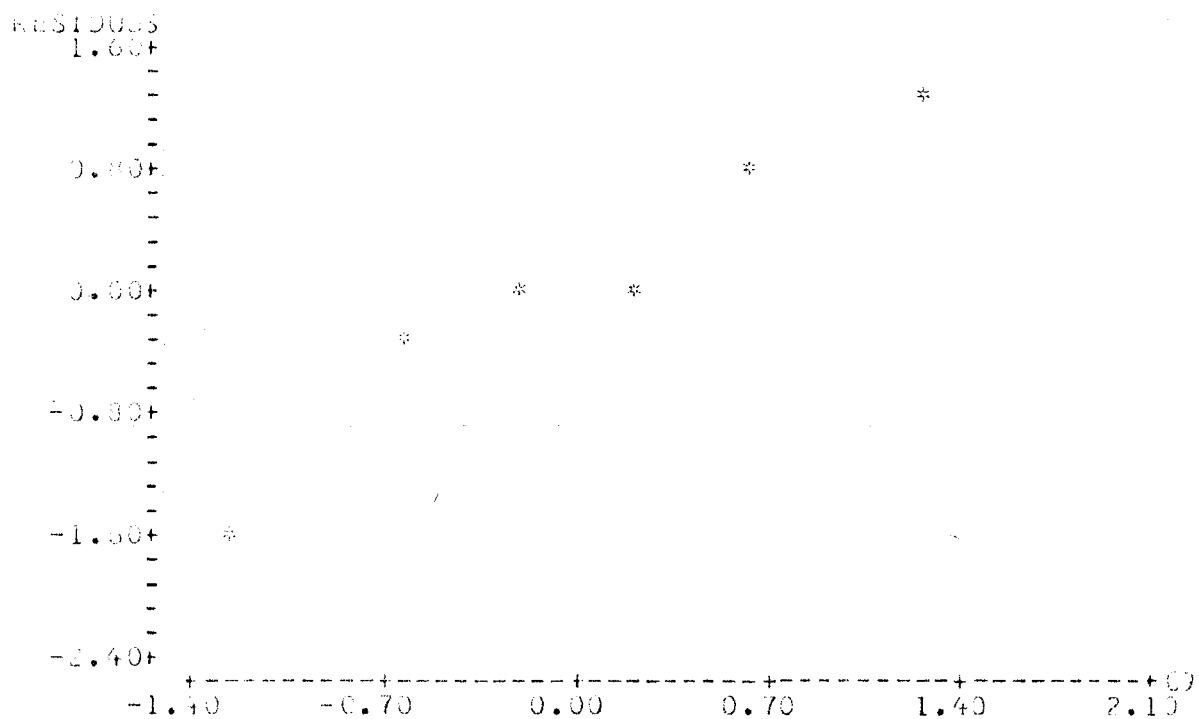


Fig. 112 Gráfico Probabilístico - ($R^2 = 93\%$)

4.3.2.2. Análise dos resultados - PEROBA DO NORTE

TÍTULO: RELAÇÃO ENTRE $MRF_{14,1f} \times E_{21,2f}$

ESPÉCIE: PEROBA DO NORTE (Utilização do QUADRO XVI)

QUADRO XXXVIII RESUMO DA ANÁLISE DE REGRESSÃO

ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO	OBSERVAÇÕES
MODELO	$y = a_0 + a_1 x_1$	Equação obtida pelo ajuste e pela teoria dos mínimos quadrados.
EQUAÇÃO (4.14)	$MRF_{14,1f} = 32,1 + 0,0045 E_{21,2f}$	
COEF. DE CORRELAÇÃO LINEAR	$R^2 = 69,0\%$	Possui bom grau de correlação linear.
TESTE "F"	$F(1,4) = 8,88\%$ nível de significância α $\alpha = 4,56\%$	Regressão altamente significativa.
TESTE "t" (valor para variável)	$x_1: t = 2,98$ nível de significância α $\alpha = 1,72\%$	A variável x_1 está bem relacionada com y .
GRÁFICO DA EQUAÇÃO (4.14)	Fig.113 $MRF_{14,1f}$ vs $E_{21,2f}$	<p>Fig.114 Resíduos vs Valores Preditos. Não revela tendência, modelo satisfatório.</p> <p>Fig.115 Resíduos vs Variável x_1. Não revela anomalia, modelo satisfatório.</p> <p>Fig.116 Gráfico Probabilístico. (R² = 95%) Pode-se considerar distribuição normal de resíduos.</p>
	Fig.114 Resíduos vs Valores Preditos.	
	Fig.115 Resíduos vs Variável x_1 .	

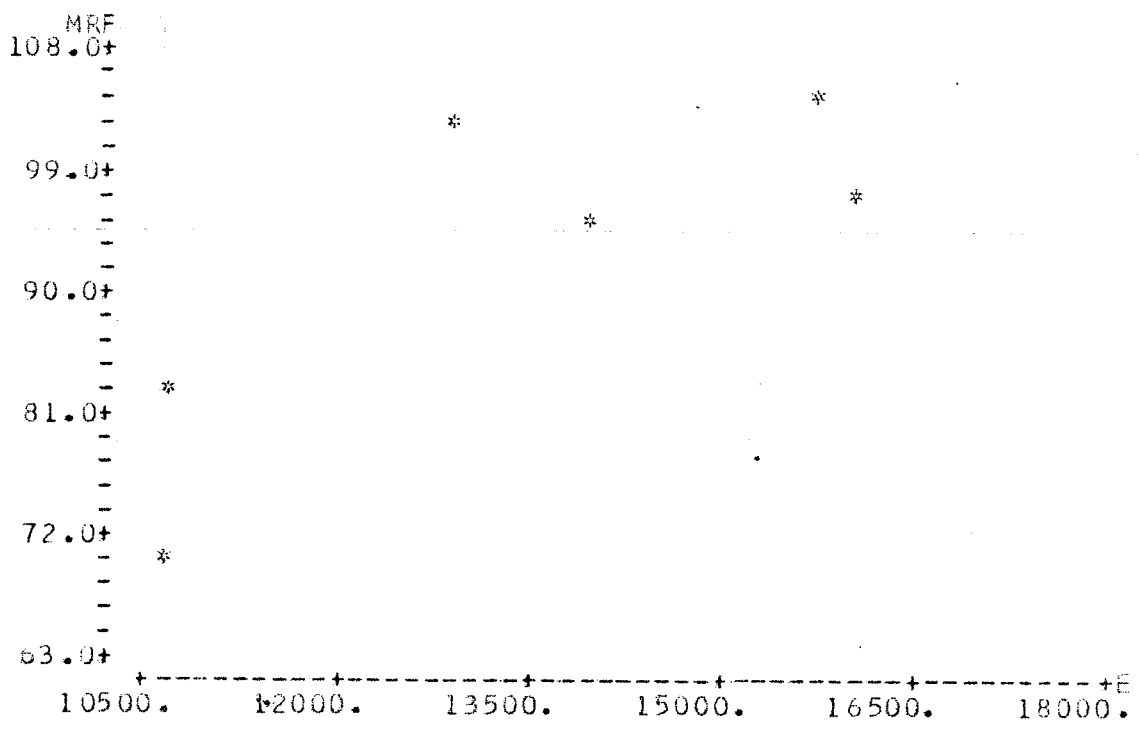


Fig. 113 MRF_{14,1f} vs E_{21,2f}

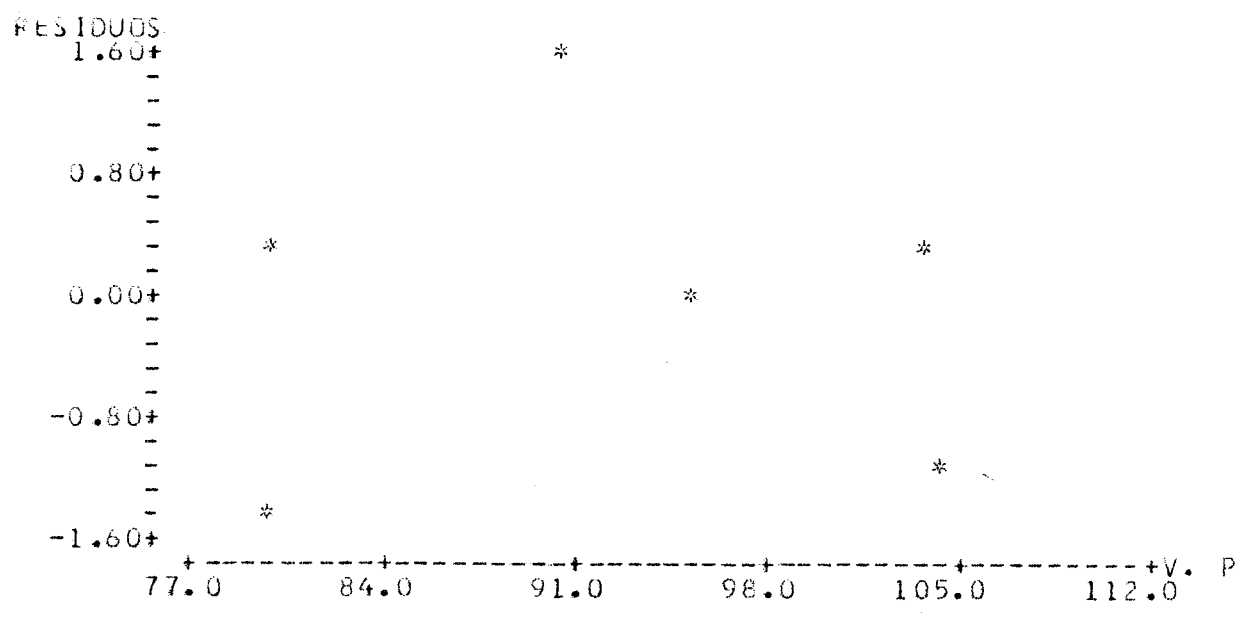


Fig. 114 Residuos vs Valores Preditos

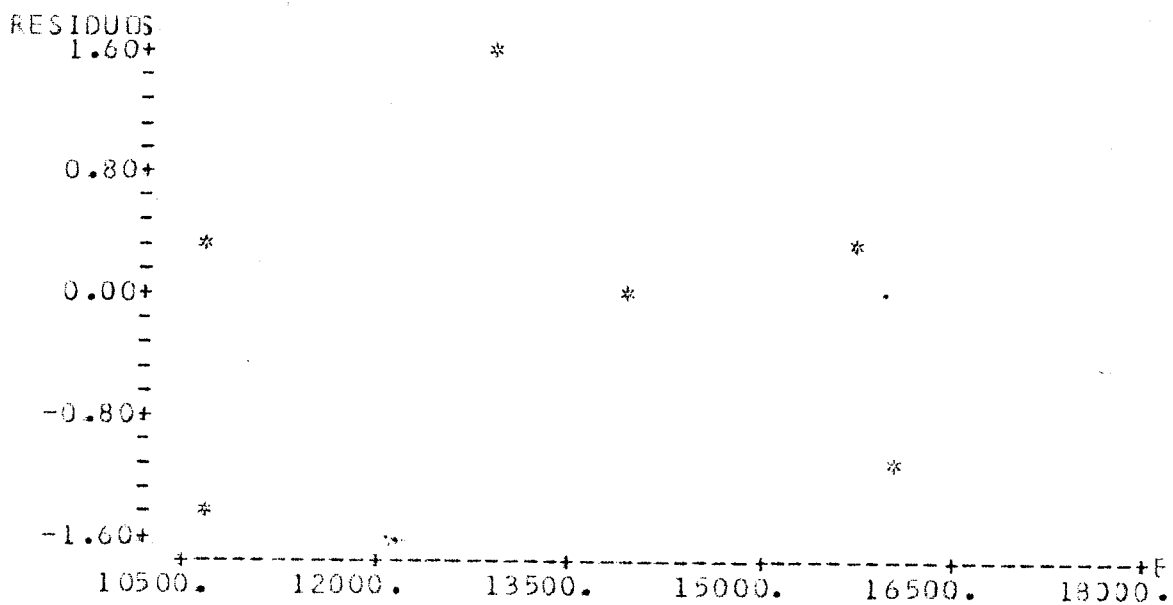


Fig. 115 Resíduos vs Variável x

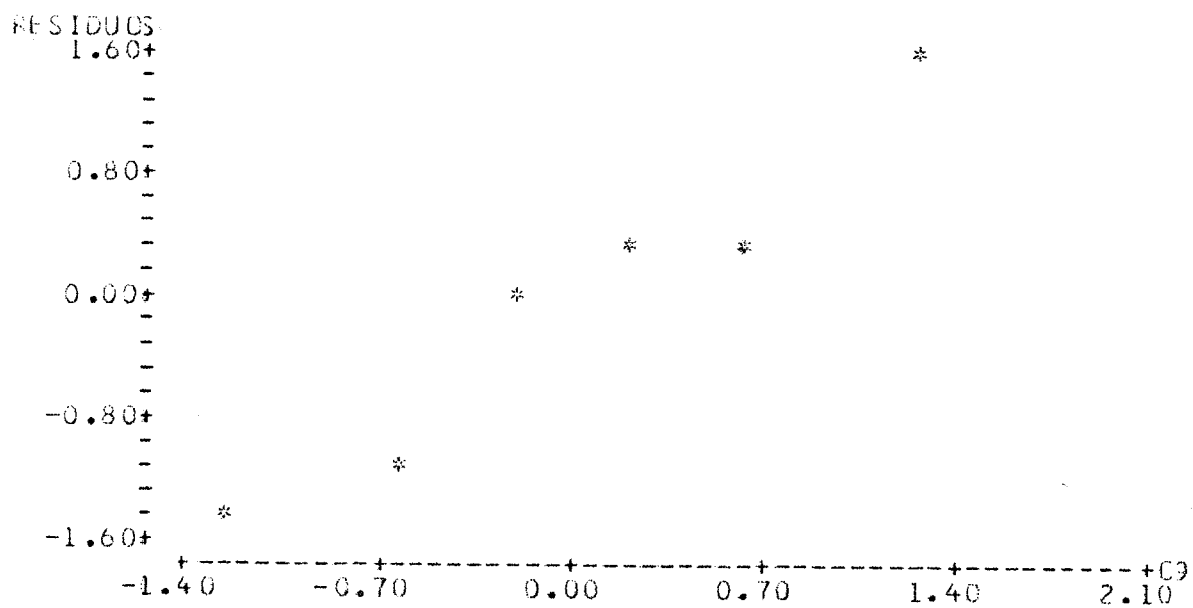


Fig. 116 Gráfico Probabilístico - ($R^2 = 95\%$)

TÍTULO: RELAÇÃO ENTRE $MRF_{14,1f} \times E_{21,1f}$

ESPÉCIE: PEROBA DO NORTE (Utilização do QUADRO XVI)

QUADRO XXXIX RESUMO DA ANÁLISE DE REGRESSÃO

ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO	OBSERVAÇÕES
MODELO	$y = a_0 + a_1 x_1$	Equação obtida pelo ajuste e pela teoria dos mínimos quadrados.
EQUAÇÃO (4.15)	$MRF_{14,1f} = 31,8 + 0,0046 E_{21,1f}$	
COEF. DE CORRELAÇÃO LINEAR	$R^2 = 68,8\%$	Possui bom grau de correlação linear.
TESTE "F"	$F(1,4) = 8,81$ nível de significância $\alpha = 4,67\%$	Regressão altamente significativa.
TESTE "t" (valor para variável)	$x_1: t = 2,97$ nível de significância $\alpha = 1,74\%$	A variável x_1 está bem relacionada com y .
GRÁFICO DA EQUAÇÃO (4.15)	Fig.117 $MRF_{14,1f}$ vs $E_{21,1f}$	<p>Não revela tendência, modelo satisfatório.</p> <p>Não revela anomalia, modelo satisfatório.</p> <p>Pode-se considerar distribuição normal de resíduos.</p>
ANÁLISE DE RESÍDUOS	Fig.118 Resíduos vs Valores Preditos.	
	Fig.119 Resíduos vs Variável x_1 .	
	Fig.120 Gráfico Probabilístico. ($R^2 = 94\%$)	

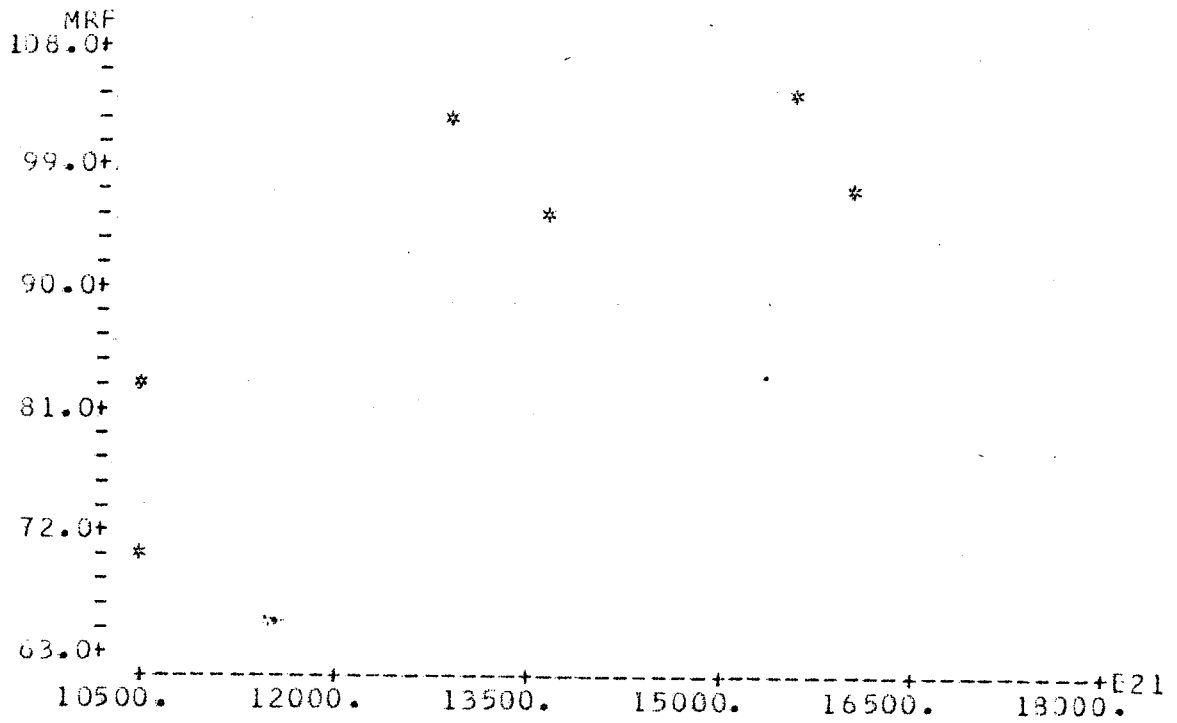


Fig. 117 MRF_{14,1f} vs E_{21,1f}

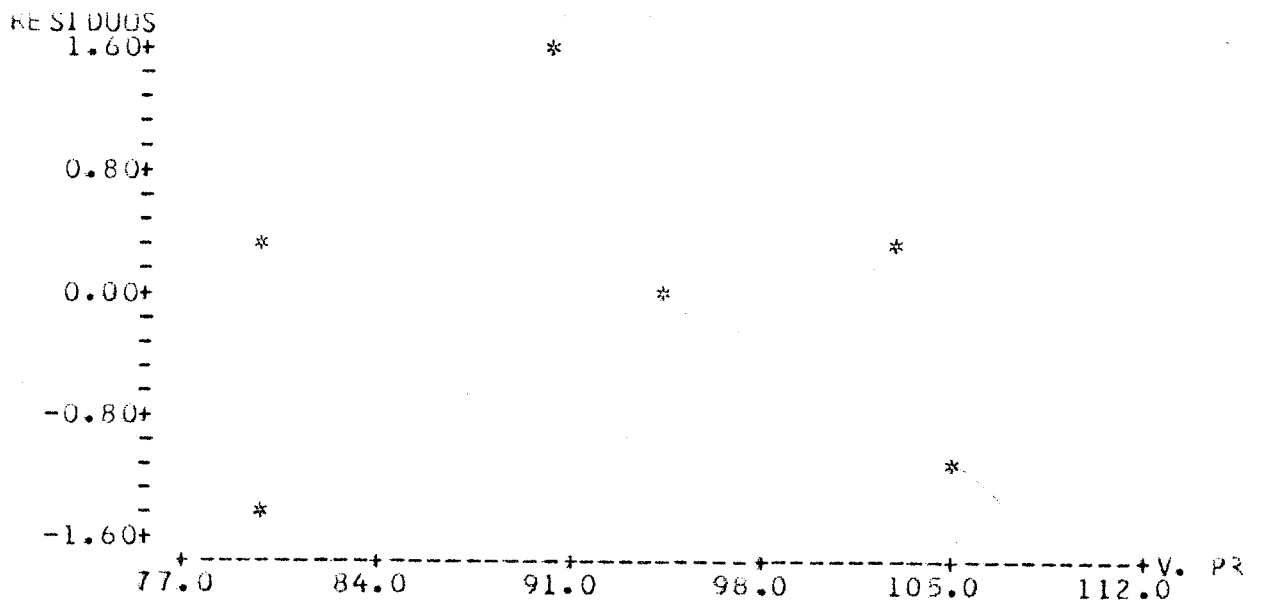


Fig 118 Resíduos vs Valores Preditos

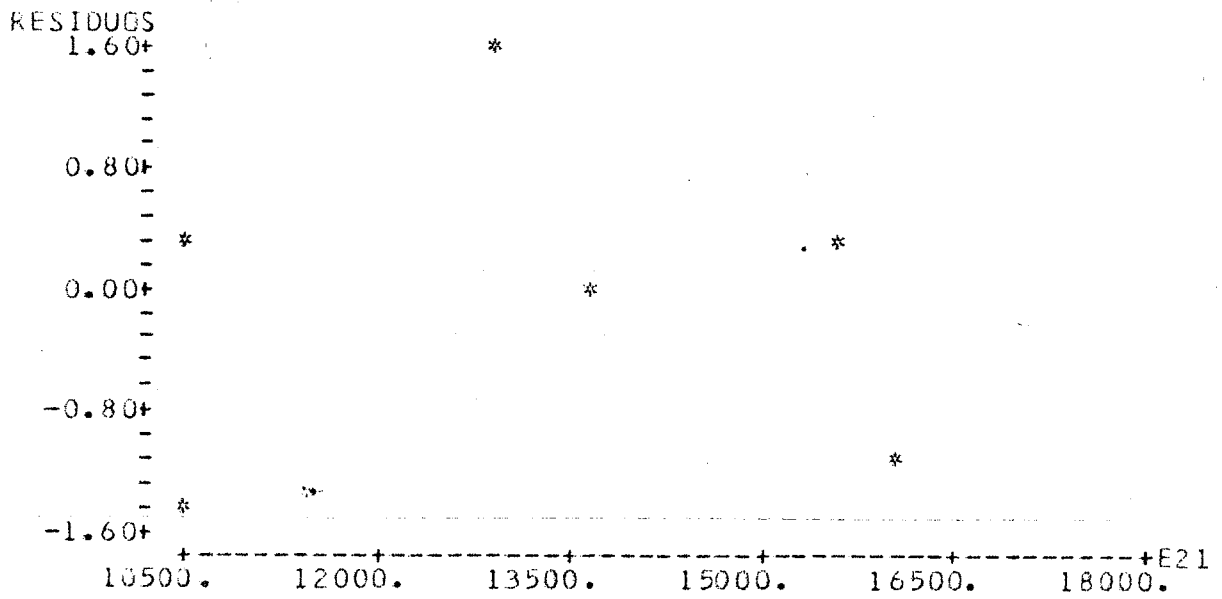


Fig. 119 Resíduos vs Variável x1

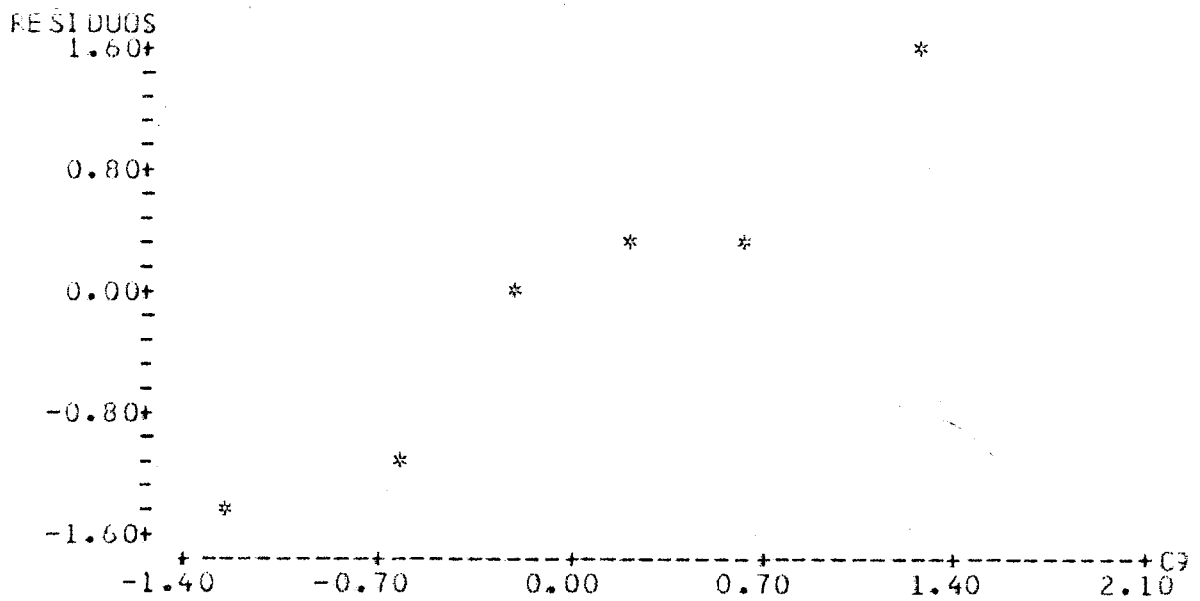


Fig. 120 Gráfico Probabilístico - ($R^2 = 94\%$)

TÍTULO: RELAÇÃO ENTRE $MRF_{14,1f} \times E_{14,1f}$

ESPÉCIE: PEROBA DO NORTE (Utilização do QUADRO XVI)

QUADRO XL RESUMO DA ANÁLISE DE REGRESSÃO

ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO	OBSERVAÇÕES
MODELO	$y = a_0 + a_1 x_1$	Equação obtida pelo ajuste e pela teoria dos mínimos quadrados.
EQUAÇÃO (4.16)	$MRF_{14,1f} = 37,7 + 0,0045 E_{14,1f}$	
COEF. DE CORRELAÇÃO LINEAR	$R^2 = 62,7\%$	Possui bom grau de correlação linear.
TESTE "F"	$F(1,4) = 6,74$ nível de significância $\alpha = 6,52\%$	Pode-se considerar a regressão aceitável.
TESTE "t" (valor para variável)	$x_1: t = 2,60$ nível de significância $\alpha = 6,52\%$	Admite-se que a variável x_1 está relacionada com y .
GRÁFICO DA EQUAÇÃO (4.16)	Fig.121 $MRF_{14,1f}$ vs $E_{14,1f}$	Não revela tendência, modelo satisfatório. Não revela anomalia, modelo satisfatório. Pode-se considerar distribuição normal de resíduos.
ANÁLISE DE RESÍDUOS	Fig.122 Resíduos vs Valores Preditos.	
	Fig.123 Resíduos vs Variável x_1 .	
	Fig.124 Gráfico Probabilístico. ($R^2 = 93\%$)	

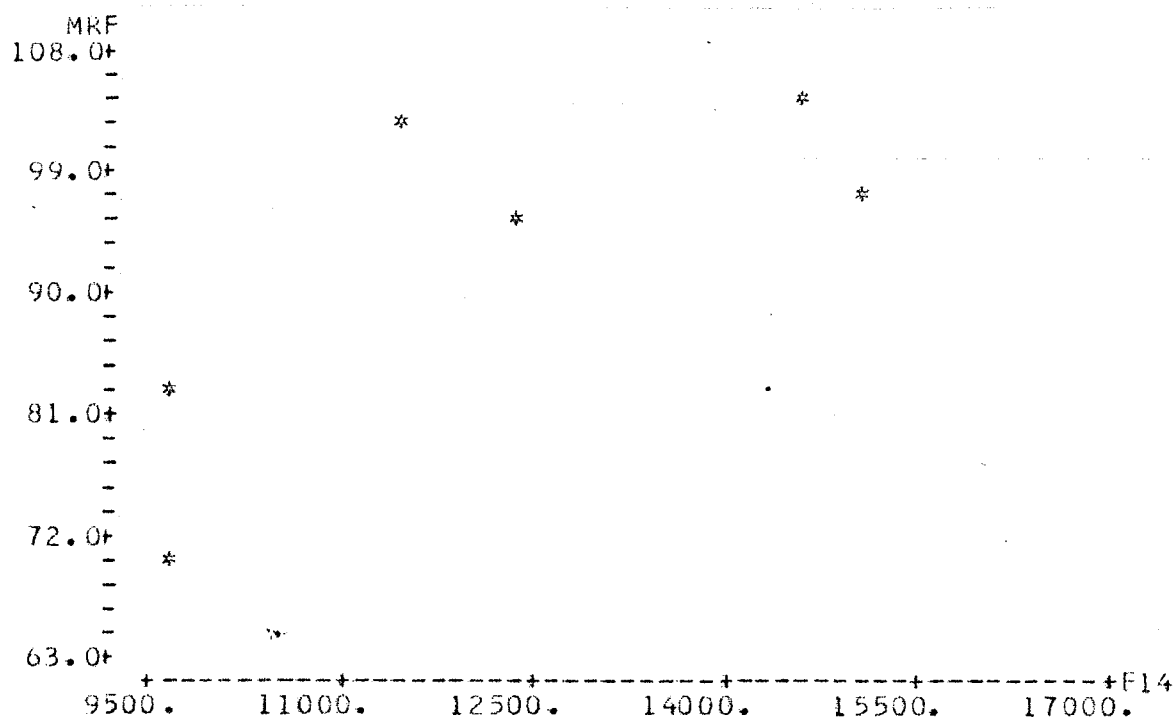


Fig. 121 MRF_{14,1f} vs E_{14,1f}

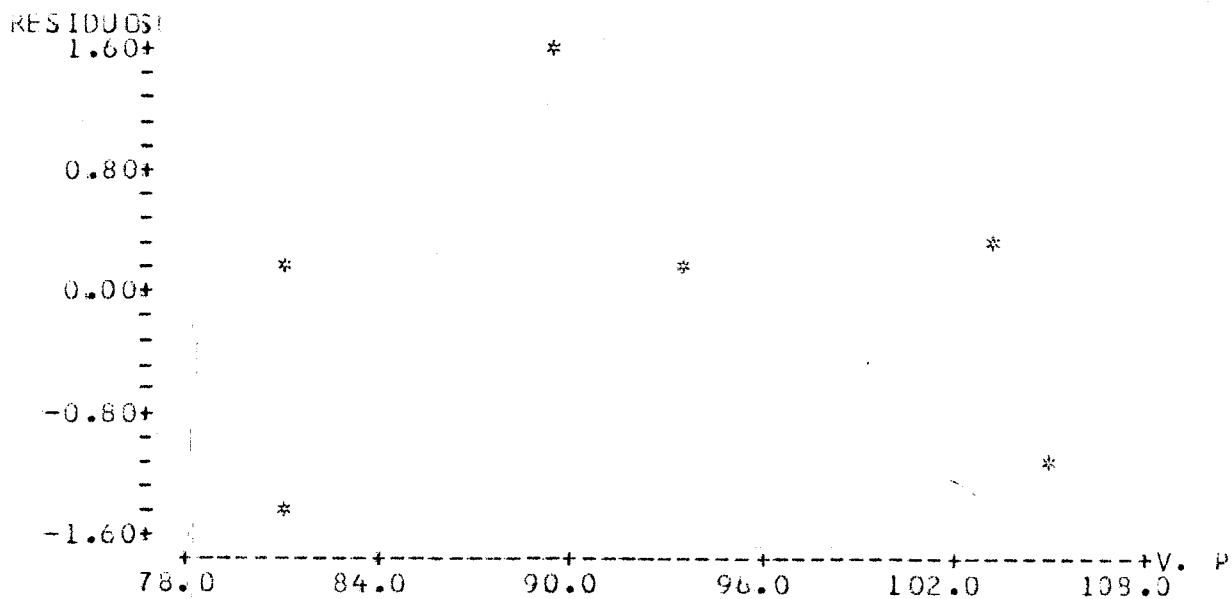


Fig. 122 Resíduos vs Valores Preditos

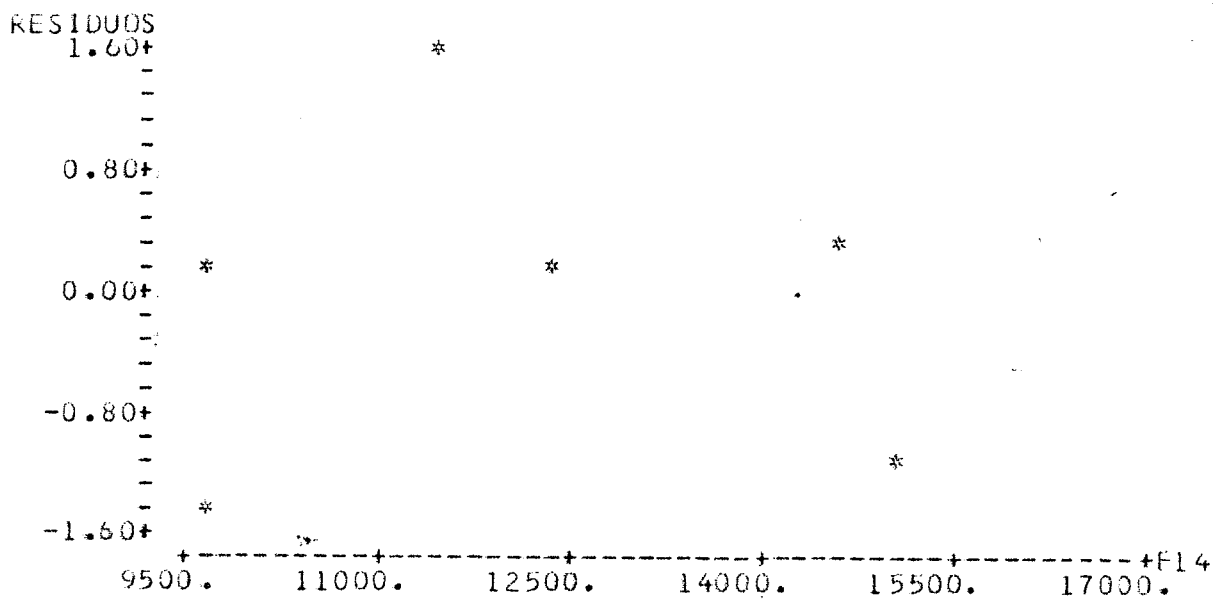


Fig. 123 Resíduos vs Variável x_1

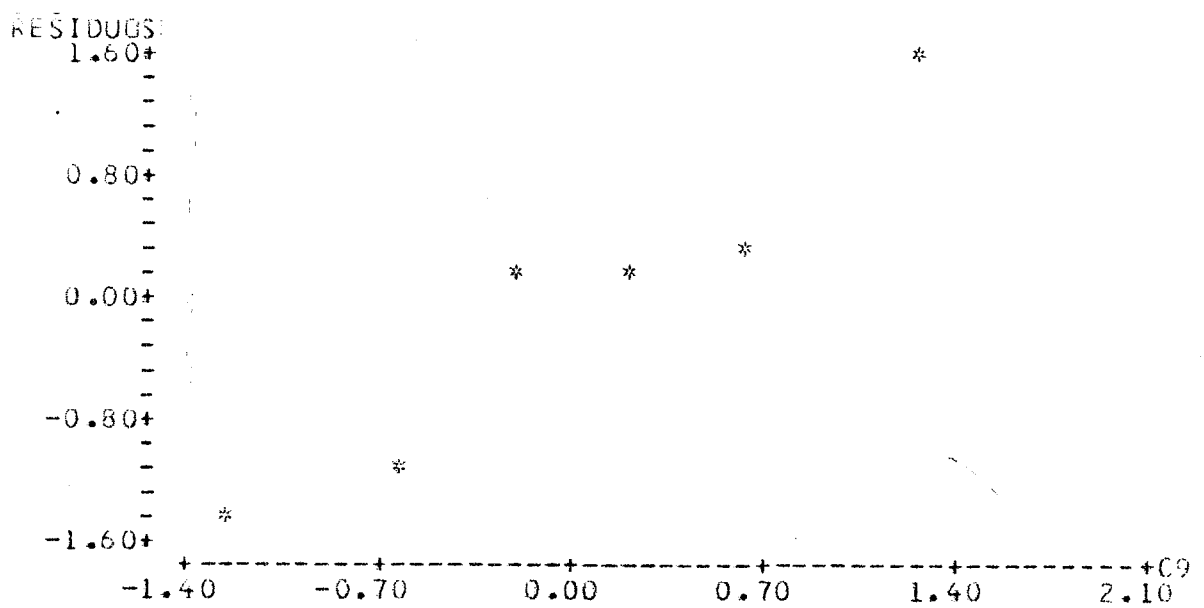


Fig. 124 Gráfico Probabilístico - ($R^2 = 93\%$)

4.3.3. Análise global

4.3.3.1. Análise dos resultados totais

TÍTULO: RELAÇÃO ENTRE $M_{14,1f} \times E_{21,2f}$

ESPÉCIE: TODAS UTILIZADAS NESTE TRABALHO

QUADRO: XLI RESUMO DA ANÁLISE DE REGRESSÃO

ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO	OBSERVAÇÕES
MODELO	$y = a_0 + a_1 x_1$	Equação obtida pelo ajuste e pela teoria dos mínimos quadrados.
EQUAÇÃO (4.17)	$MRF_{14,1f} = 27,5 + 0,0055 E_{21,2f}$	
COEF. DE CORRELAÇÃO LINEAR	$R^2 = 81,9\%$	Possui excelente grau de correlação linear.
TESTE "F"	$F(1,170) = 767,15$ nível de significância $\alpha < 0,1\%$	Regressão altamente significativa.
TESTE "t" (valor para variável)	$x_1: t = 27,69$ nível de significância $\alpha < 0,1\%$	A variável x_1 está altamente correlacionada com y.
GRÁFICO DA EQUAÇÃO (4.17)	Fig.125 $MRF_{14,1f} \text{ vs } E_{21,2f}$	Não revela tendência, modelo satisfatório. Não revela anomalia, modelo satisfatório. Pode-se considerar distribuição normal de resíduos.
ANÁLISE DE RESÍDUOS	Fig.126 Resíduos vs Valores Preditos.	
	Fig.127 Resíduos vs Variável x_1 .	
	Fig.128 Gráfico Probabilístico. ($R^2 = 99\%$)	

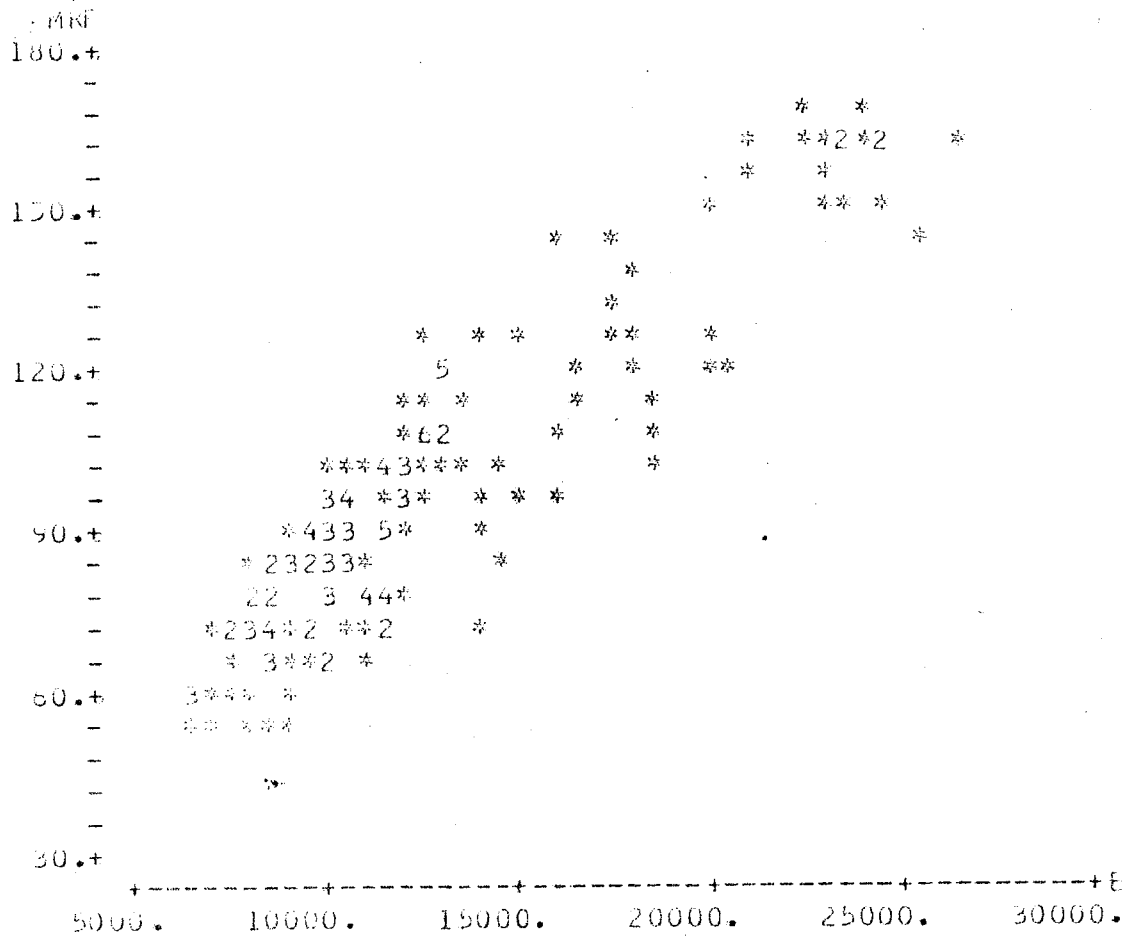


Fig. 125 MRF_{14,1f} vs E_{21,2f}

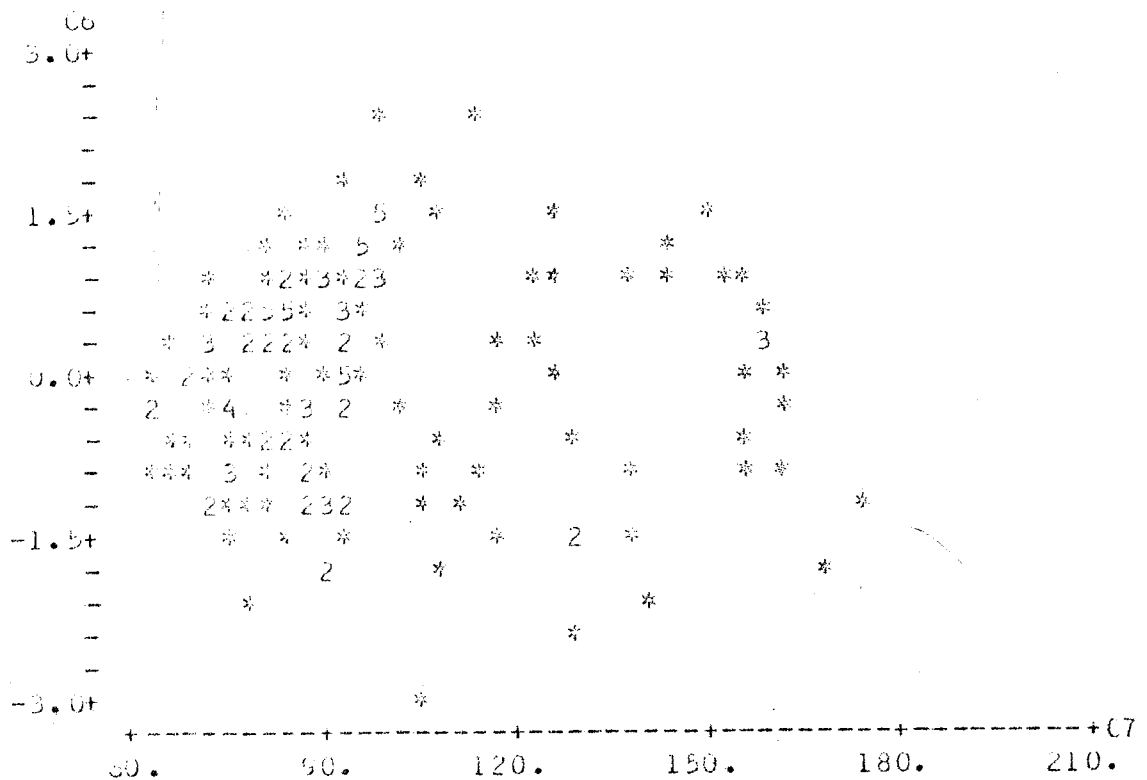


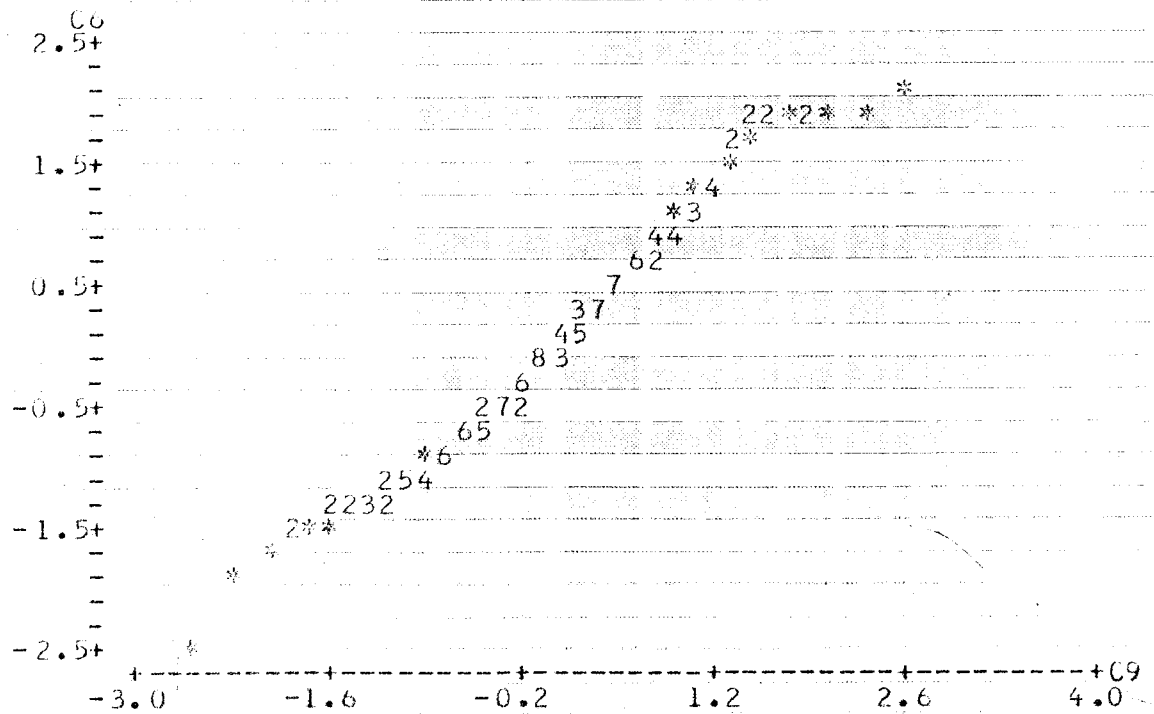
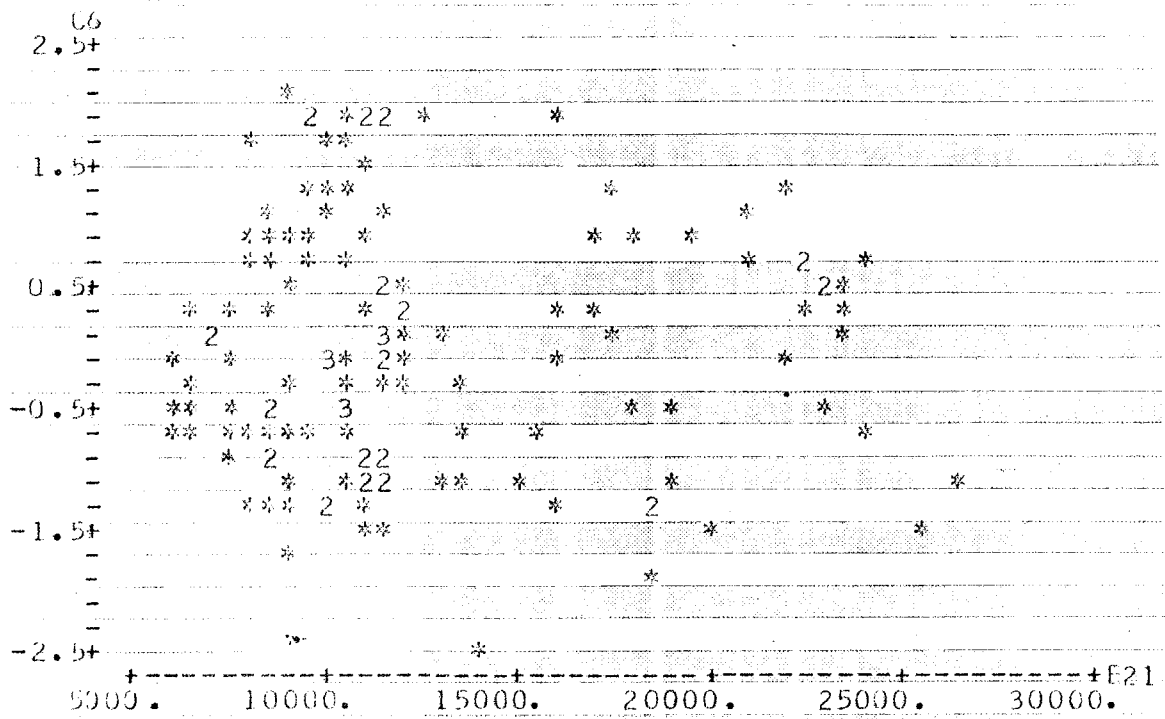
Fig. 126 Residuos vs Valores Preditos

TÍTULO: RELAÇÃO ENTRE $MRF_{14,1f}$ x $E_{21,1f}$

ESPECIE: TODAS UTILIZADAS NESTE TRABALHO

QUADRO XLII RESUMO DA ANÁLISE DE REGRESSÃO

ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO	OBSERVAÇÕES
MODELO	$y = a_0 + a_1 x_1$	Equação obtida pelo ajuste e pela teoria dos mínimos quadrados.
EQUAÇÃO (4.18)	$MRF_{14,1f} = 17,0 + 0,0060 E_{21,1f}$	
COEF. DE CORRELAÇÃO LINEAR	$R^2 = 77,6\%$	Possui excelente grau de correlação linear.
TESTE "F"	$F(1,103) = 922,05$ nível de significância α $\alpha < 0,1\%$	Regressão altamente significativa.
TESTE "t" (valor para variável)	$x_1: t = 30,36$ nível de significância α $\alpha < 0,1\%$	A variável x_1 está altamente correlacionada com y .
GRÁFICO DA EQUAÇÃO (4.18)	Fig.129 $MRF_{14,1f}$ vs $E_{21,1f}$	<p>Não revela tendência, modelo satisfatório.</p> <p>Não revela anomalia, modelo satisfatório.</p> <p>Pode-se considerar distribuição normal de resíduos.</p>
ANÁLISE DE RESÍDUOS	Fig.130 Resíduos vs Valores Preditos.	
	Fig.131 Resíduos vs Variável x_1 .	
	Fig.132 Gráfico Probabilístico. ($R^2 = 98\%$)	

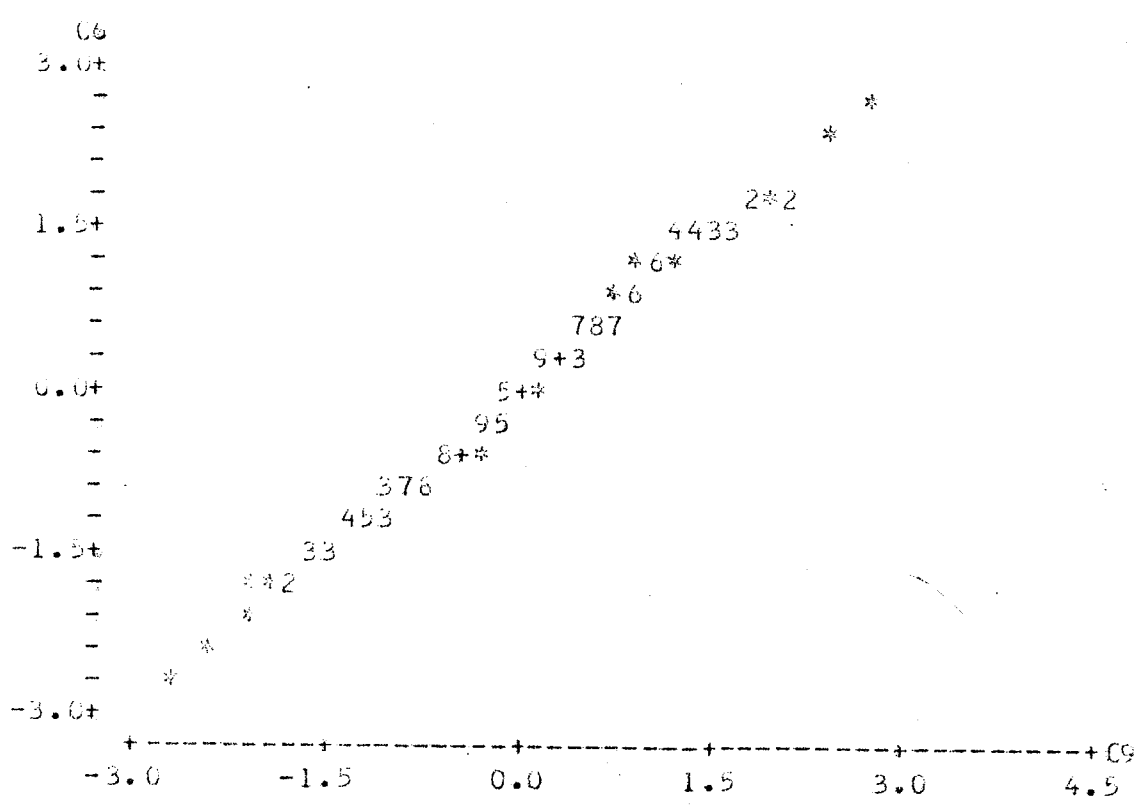
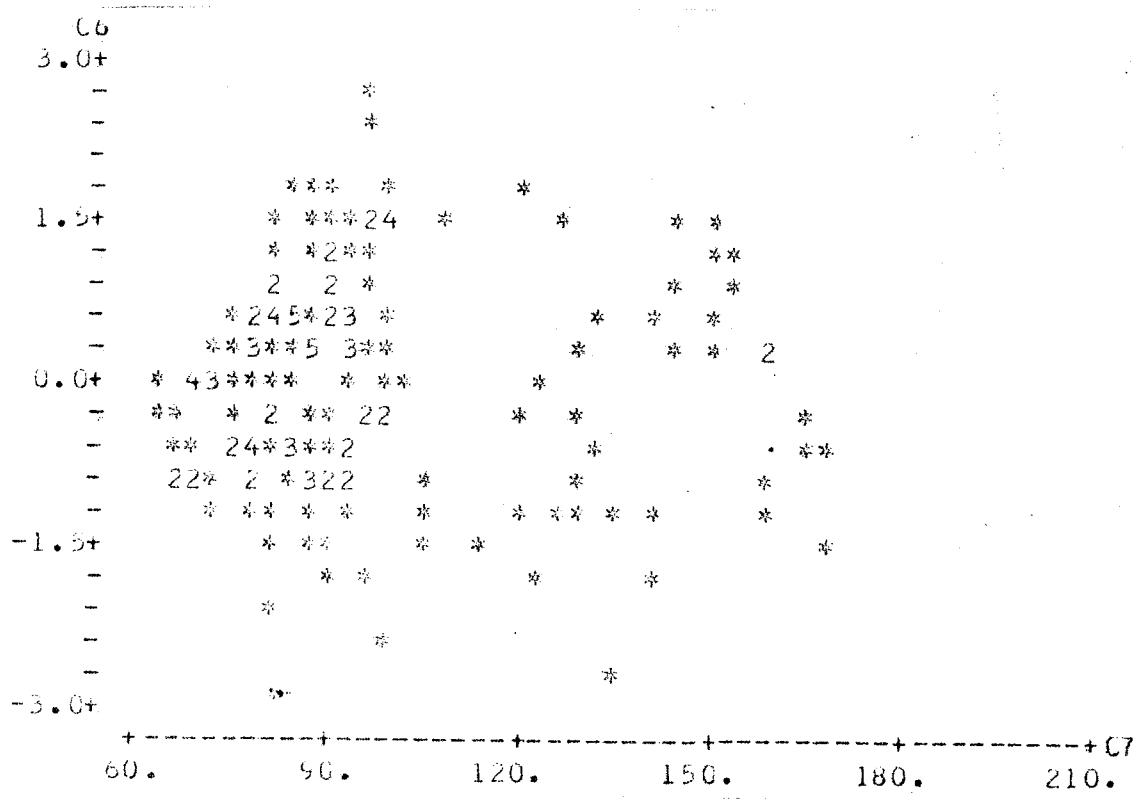


TÍTULO: RELAÇÃO ENTRE $MRF_{14,1f} \times E_{14,1f}$

ESPÉCIE: TODAS UTILIZADAS NESTE TRABALHO

QUADRO XLIII RESUMO DA ANÁLISE DE REGRESSÃO

ESPECIFICAÇÃO		OBSERVAÇÕES
MODELO	$y = a_0 + a_1 x_1$	Equação obtida pelo ajuste e pela teoria dos mínimos quadrados.
EQUAÇÃO (4.19)	$MRF_{14,1f} = 29,1 + 0,0062 E_{14,1f}$	
COEF. DE CORRELAÇÃO LINEAR	$R^2 = 79,8\%$	Possui excelente grau de correlação linear.
TESTE "F"	$F(1,190) = 670,05$ nível de significância α $\alpha < 0,1\%$	Regressão altamente significativa.
TESTE "t" (valor para variável)	$x_1: t = 25,89$ nível de significância α $\alpha < 0,1\%$	A variável x_1 está altamente correlacionada com y .
GRÁFICO DA EQUAÇÃO (4.19)	Fig. 133 $MRF_{14,1f}$ vs $E_{14,1f}$	<p>Fig. 134 Resíduos vs Valores Preditos</p> <p>Fig. 135 Resíduos vs Variável x_1.</p> <p>Fig. 136 Gráfico Probabilístico. ($R^2 = 99\%$)</p>
ANÁLISE DE RESÍDUOS		
		<p>Não revela tendência, modelo satisfatório.</p> <p>Não revela anomalia, modelo satisfatório.</p> <p>Pode-se considerar distribuição normal de resíduos.</p>



4.4. Conclusões

Em vista da análise estatística realizada, pode-se concluir que, apesar da grande variabilidade de resultados experimentais inerente à madeira, os parâmetros de elasticidade $E_{21,1f}$, $E_{21,1f}$ e $E_{14,1f}$ são bons estimadores do Módulo de Ruptura à Flexão ($MRF_{14,1f}$).

O modelo linear revelou-se o mais adequado na análise de regressão efetuada para relacionar os parâmetros de ruptura e elasticidade. Além disto, é o mais simples.

Sobre a análise de regressão deve ser ressaltado que valores de R^2 acima de 60% já são considerados satisfatórios e acima de 80% excelentes, uma vez não manifestada nenhuma tendência na análise de resíduos.

A análise estatística, reunindo todos os resultados experimentais, apresentou-se bem ajustada ao modelo de regressão linear adotado. Esta conclusão é de suma importância para o conhecimento do comportamento intrínseco da madeira, pois, observa-se que a abordagem geral da madeira engloba uma soma-tória de estudos de várias espécies componentes do campo amostral, ou seja, cada espécie forma um bloco que ocupa os diversos intervalos numéricos, estendendo-se do menor até o maior. Isto explica o fato de R^2 , encontrado na análise global ser numericamente maior que os R^2 individuais, por espécies.

Por fim, mostrou-se satisfatória a adoção de seis corpos de prova para estabelecer uma função estimadora dos valores médios de resistência através do parâmetro de elasticidade $E(E_{21,2f}, E_{21,1f} \text{ e } E_{14,1f})$.

5. RELAÇÕES ENTRE OS PARÂMETROS DE ELASTICIDADE E e G.

5.1. Generalidades

Como foi abordado na revisão da literatura, particularmente no item 2.1.3.1.4. BODIG e GOODMAN (1982) propõem uma função do tipo:

$$G = \alpha E^\beta \quad (5.1)$$

para relacionar os parâmetros de elasticidade E e G, sendo os de α e β constantes para as dicotiledôneas.

Substituindo-se a equação (5.1) na equação completa da flecha de uma peça fletida com carga concentrada no ponto médio do vão, obtém-se:

$$a = \frac{F\ell^3}{48 EI} + \frac{3F\ell}{10A \alpha E^\beta} \quad (5.2)$$

Consequentemente, é alcançada uma relação entre a flecha total (a) e o parâmetro de elasticidade (E), independente do parâmetro G.

5.2. Objetivos

Com base nas considerações expostas em 5.1., o estudo de relações entre os parâmetros de elasticidade E e G, torna-se relevante para um melhor conhecimento das características intrínsecas da madeira, em especial o seu comportamento ortotrópico. Por outro lado, este mesmo estudo pode conduzir à possibilidade de viabilizar, ou não, a aplicação de expressões do tipo (5.2).

É oportuno destacar que este estudo se restringe às amostras utilizadas neste trabalho.

5.3. Tratamento estatístico dos resultados

A partir dos resultados indicados nos QUADROS: XIV, XVI, XVIII, XIX, XXII, XXIII, foram realizadas duas

análises estatísticas: a primeira delas englobando todos os resultados obtidos e, a segunda, envolvendo cada espécie de madeira utilizada na experimentação.

Com o conjunto de 172 resultados obtidos na experimentação foram testados vários modelos de regressão linear, sem se encontrar um modelo adequado. Diante disto e com base nos gráficos de resíduos e de correlação entre G e E, foram retirados sucessivamente alguns resultados, chegando-se a uma amostra com 162 resultados.

Seguindo este procedimento, obteve-se um modelo satisfatório de regressão linear. De posse do modelo, testou-se novamente a amostra de 172 dados e as amostras por espécies.

5.4. Análise dos resultados

Com o intuito de sintetizar a apresentação da análise dos resultados, optou-se pela condensação de resultados em quadros de "Resumo de Análise Estatística".

5.4.1. Análise global dos resultados

5.4.1.1. Análise global com 162 resultados

5.4.1.1. Análise global com amostra de 162 resultados

TÍTULO: RELAÇÃO ENTRE $G \times E_{21,2f}$

ESPÉCIE: TODAS UTILIZADAS NESTE TRABALHO

QUADRO XLIV RESUMO DA ANÁLISE DE REGRESSÃO

ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO	OBSERVAÇÕES
MODELO	$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3$	Equação obtida pelo ajuste e pela teoria dos mínimos quadrados.
EQUAÇÃO (5.3)	$G = 1443 - 0,282 E_{21,2f} + 2 \cdot 10^{-6} E_{21,1f}^2 - 4 \cdot 10^{-10} E_{21,2f}^3$	
COEF. DE CORRELAÇÃO LINEAR	$R^2 = 57,2\%$	Grau de correlação linear aceitável.
TESTE "F"	$F(3,158) = 70,45$ nível de significância α $\alpha < 0,1\%$	Regressão altamente significativa.
TESTE "t" (para cada variável)	$x_1: t = -4,90 \rightarrow \alpha < 0,05\%$ $x_2: t = 5,33 \rightarrow \alpha < 0,05\%$ $x_3: t = -5,18 \rightarrow \alpha < 0,05\%$	As variáveis x_1, x_2 e x_3 estão altamente correlacionadas com y .
GRÁFICO DA EQUAÇÃO (5.3)	Fig.137 G vs $E_{21,2f}$	
ANÁLISE DE RESÍDUOS	Fig.138 Resíduos vs Valores Preditos. Fig.139 Resíduos vs Variável x_1 . Fig.140 Resíduos vs Variável x_2 . Fig.141 Resíduos vs Variável x_3 . Fig.142 Gráfico Probabilístico. ($R^2 = 97\%$)	Estes gráficos não revelam tendências, modelo satisfatório. Pode-se considerar distribuição normal de resíduos.

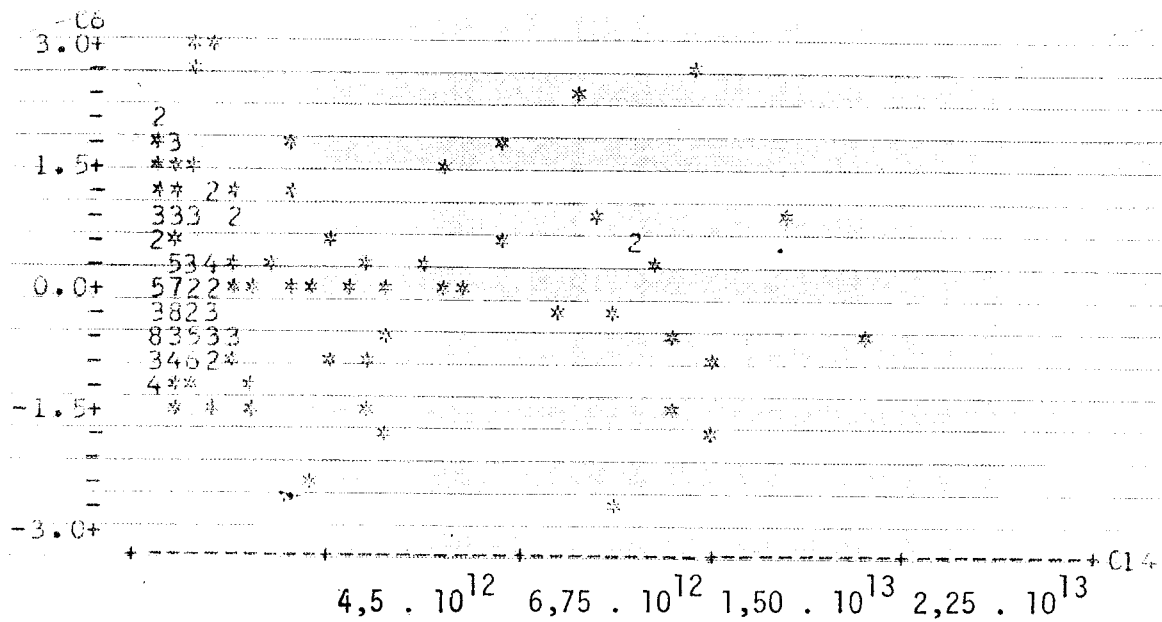


Fig. 141 Resíduos vs Variável x_3

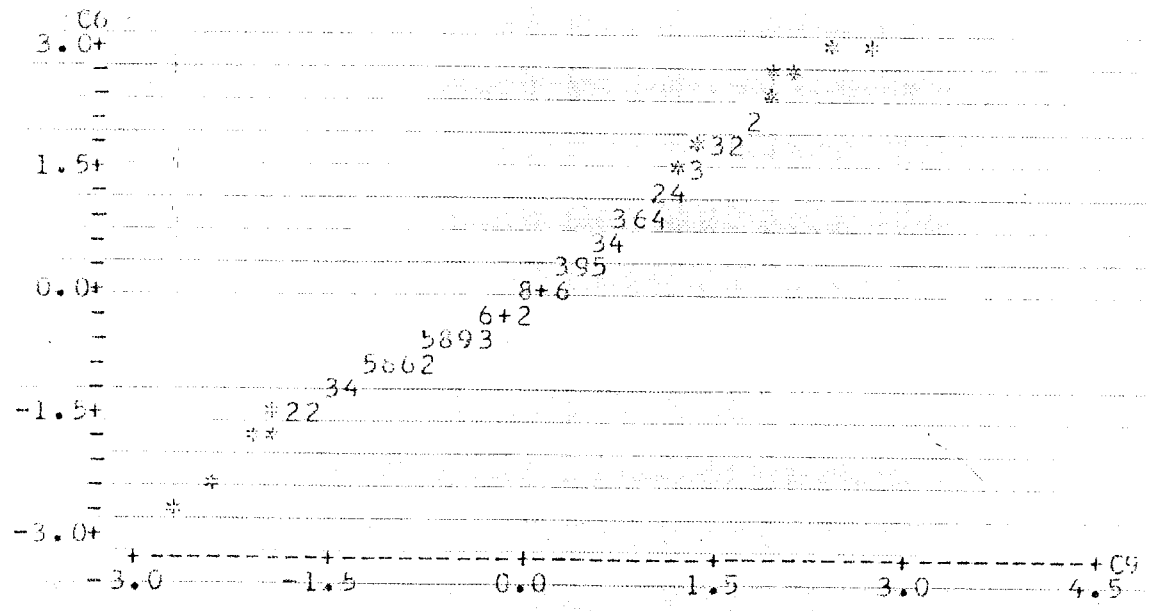


Fig. 142 Gráfico Probabilístico - ($R^2 = 97\%$)

5.4.1.2. Análise global com 172 resultados

TÍTULO: RELAÇÃO ENTRE $G \times E_{21,2f}$

ESPÉCIE: TODAS UTILIZADAS NESTE TRABALHO

QUADRO: XLV RESUMO DA ANÁLISE DE REGRESSÃO

ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO	OBSERVAÇÕES
MODELO	$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3$	Equação obtida pelo ajuste e pela teoria dos mínimos quadrados.
EQUAÇÃO (5.4)	$G = 1153 - 0,205 E_{21,2f} + 1 \cdot 10^{-5} \cdot E_{21,2f} - 3 \cdot 10^{-10} E_{21,2f}^3$	
COEF. DE CORRELAÇÃO LINEAR	$R^2 = 37,4\%$	Possui um baixo grau de correlação linear.
TESTE "F"	$F(3,168) = 23,90$ nível de significância $\alpha < 0,1\%$	Regressão altamente significativa.
TESTE "t" (para cada variável)	$x_1: t = -2,41 \rightarrow \alpha = 8,40\%$ $x_2: t = 2,67 \rightarrow \alpha = 3,98\%$ $x_3: t = -2,58 \rightarrow \alpha = 4,95\%$	As variáveis x_2 e x_3 estão bem relacionadas com y , mas x_1 não.
GRÁFICO DA EQUAÇÃO (5.4)	Fig.143 G vs $E_{21,2f}$	Estes gráficos revelam tendências, modelo não satisfatório. Pelo valor $R^2 = 83\%$ aceita-se distribuição normal de resíduos.
ANÁLISE DE RESÍDUOS	Fig.144 Resíduos vs Valores Preditos	
	Fig.145 Resíduos vs Variável x_1 .	
	Fig.146 Resíduos vs Variável x_2 .	
	Fig.147 Resíduos vs Variável x_3 .	
	Fig.148 Gráfico Probabilístico. ($R^2 = 83\%$)	

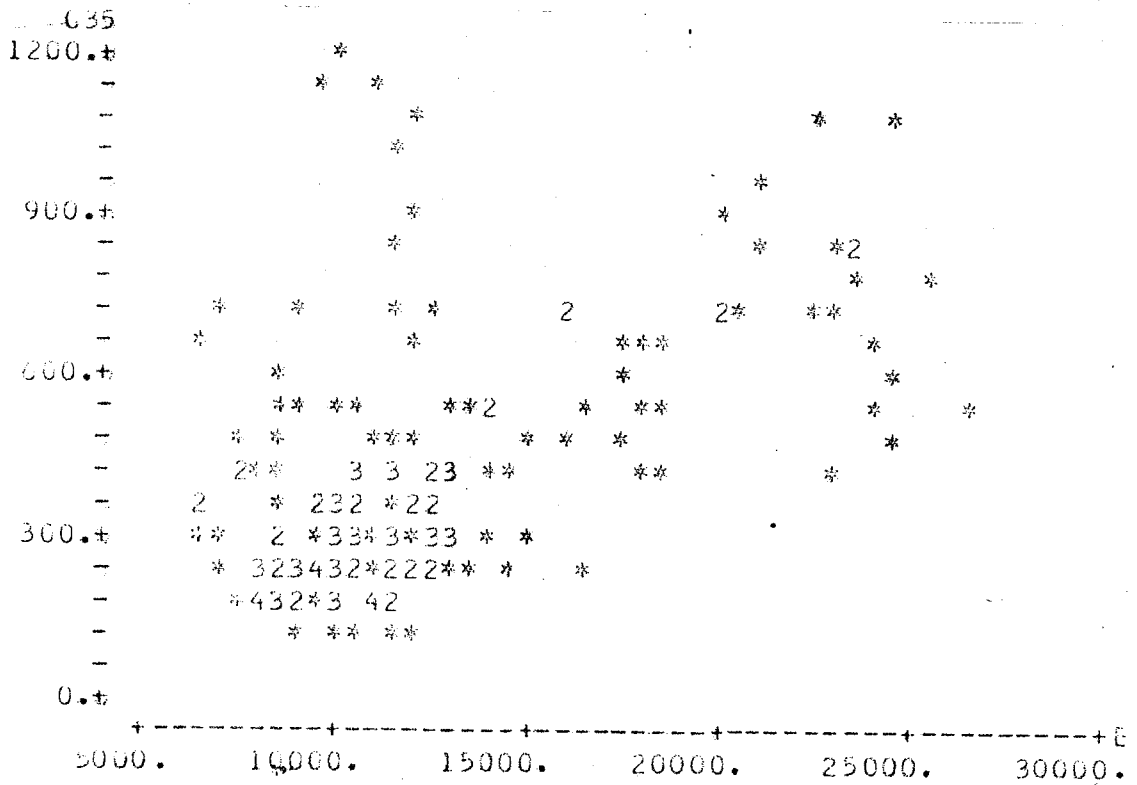


Fig. 143 G vs E_{21,2f}

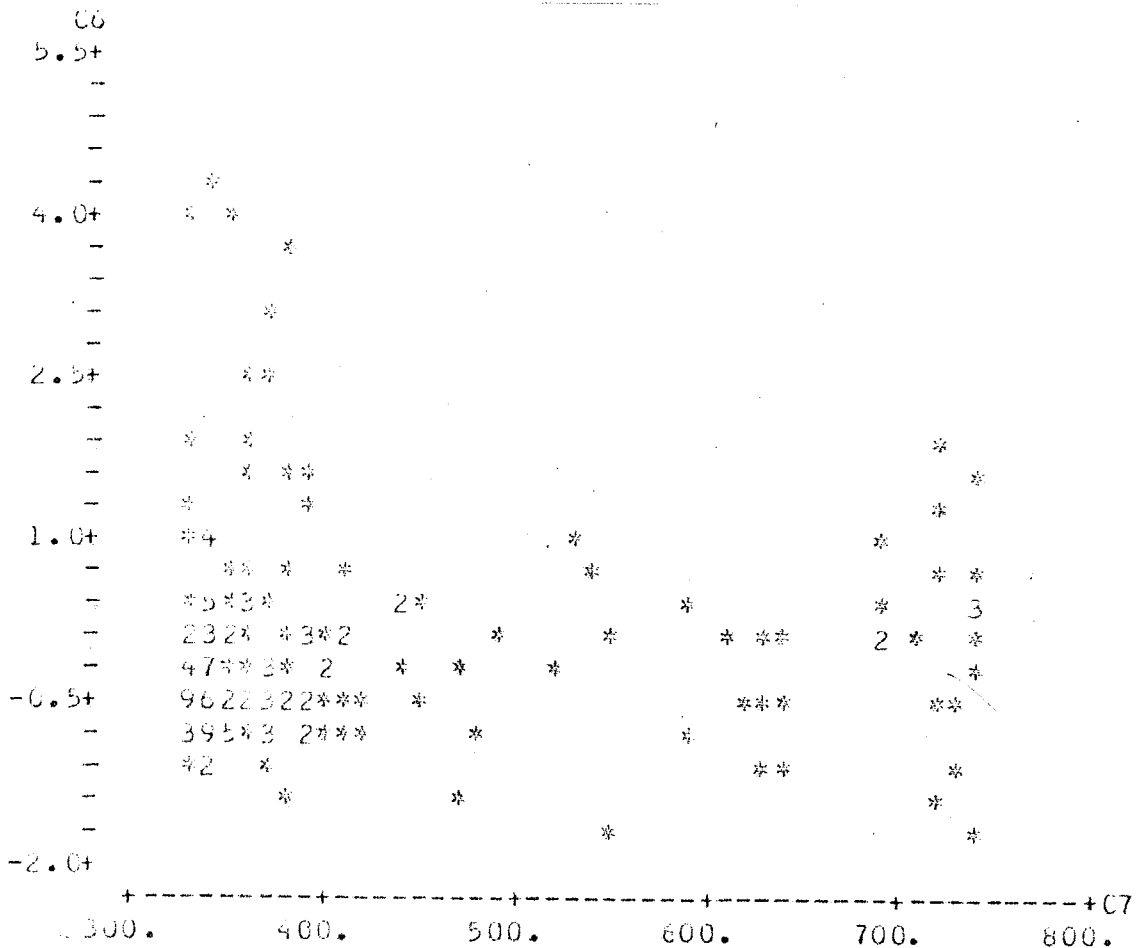


Fig. 144 Residuos vs Valores Preditos

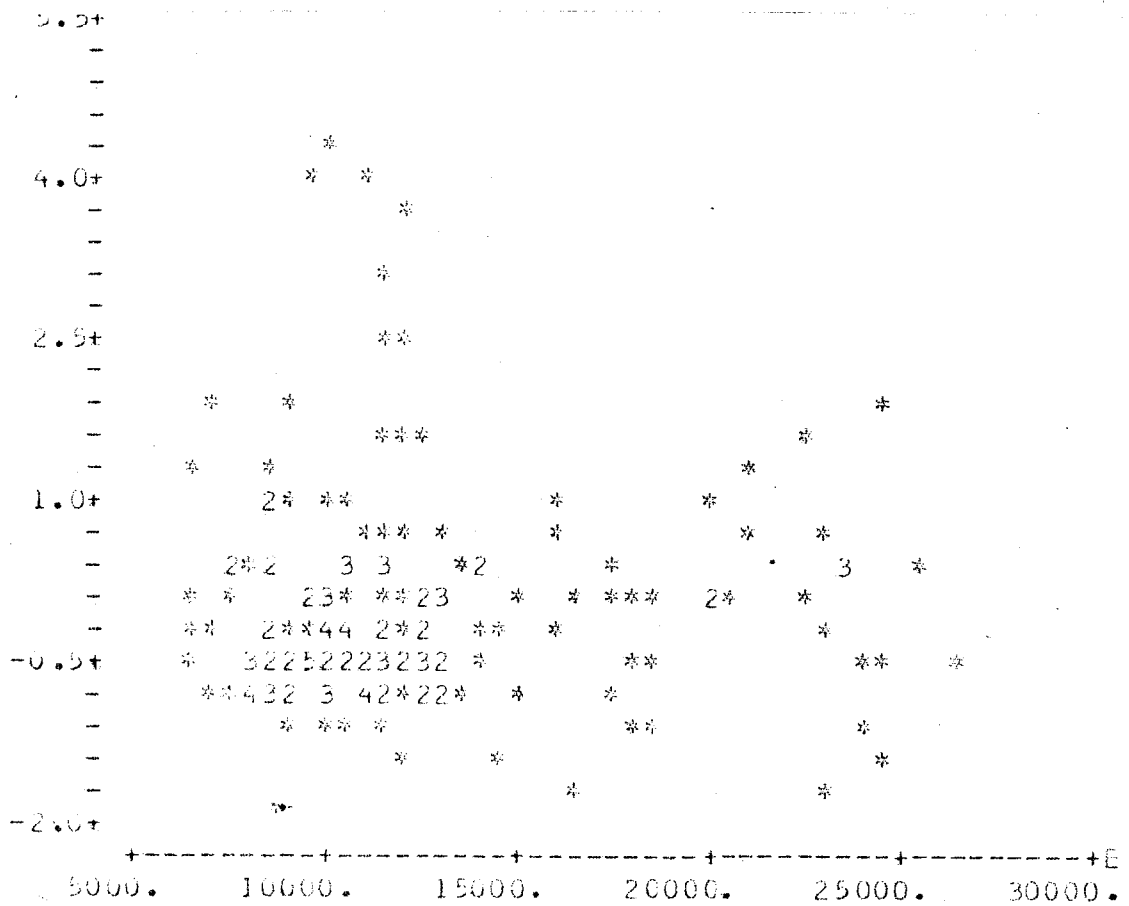


Fig. 145 Resíduos vs Variável x_1

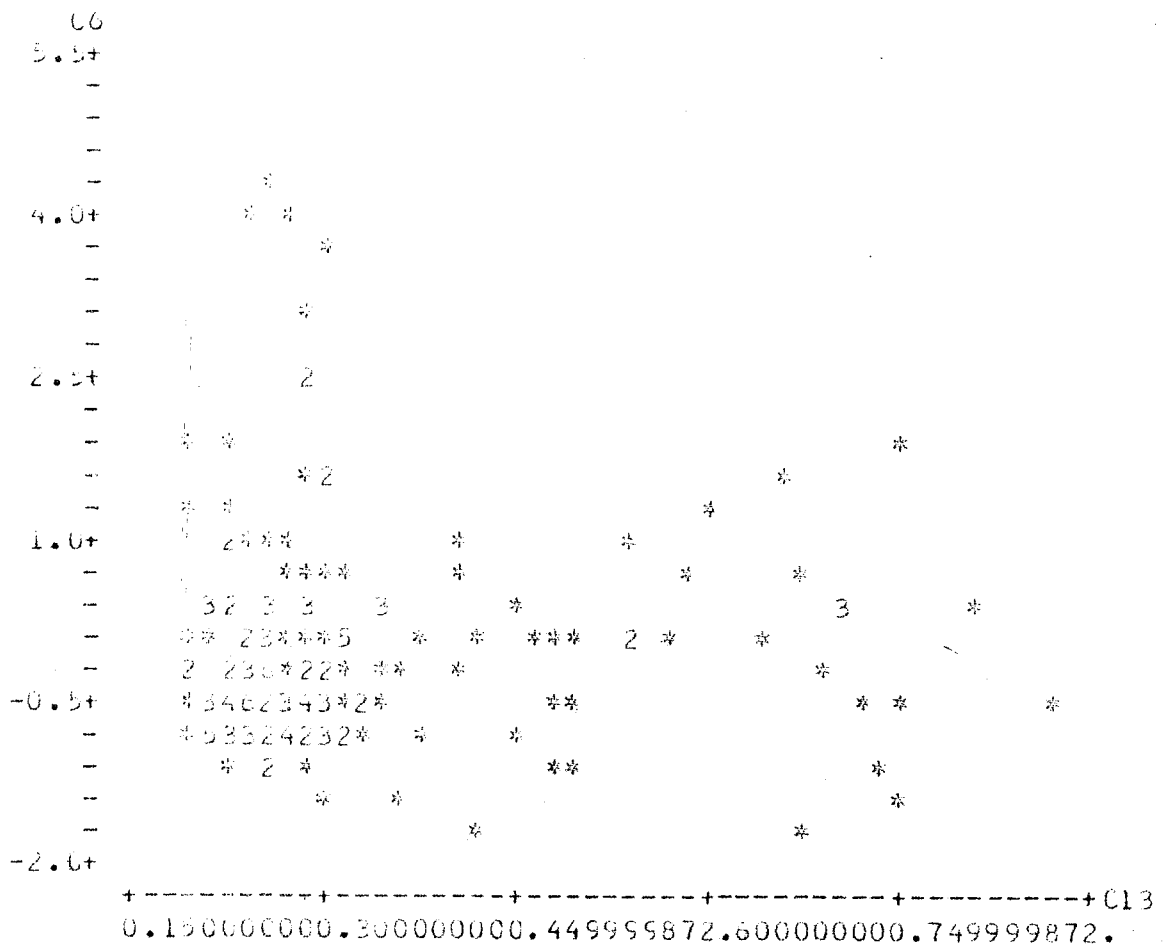


Fig. 146 Resíduos vs Variável x_2

5.4.2.1. Análise dos resultados - PEROBA ROSA

TÍTULO: RELAÇÃO ENTRE G x E_{21,2f}

ESPÉCIE: PEROBA ROSA

QUADRO XLVI RESUMO DA ANÁLISE DE REGRESSÃO

ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO	OBSERVAÇÕES
MODELO	$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3$	Equação obtida pelo ajuste e pela teoria dos mínimos quadrados.
EQUAÇÃO (5.5)	$G = 4097 - 1,17 E_{21,2f} + 1 \cdot 10^{-4} \cdot E_{21,2f}^2 - 4 \times 10^{-9} E_{21,2f}^3$	
COEF. DE CORRELAÇÃO LINEAR	$R^2 = 3,4\%$	Possui um baixo grau de correlação linear.
TESTE "F"	$F(3,90) = 1,05$ nível de significância $\alpha > 25\%$	Regressão não significativa.
TESTE "t" (para cada variável)	$x_1: t = 1,57 \rightarrow \alpha = 6,34\%$ $x_2: t = 1,60 \rightarrow \alpha = 5,94\%$ $x_3: t = 1,60 \rightarrow \alpha = 5,94\%$	As variáveis x_1, x_2 e x_3 se relacionam satisfatoriamente com y.
GRÁFICO DA EQUAÇÃO (5.5)	Fig. 149 G vs E _{21,2f}	Estes gráficos revelam tendências, modelo não satisfatório. Pelo valor $R^2 = 81\%$ aceita-se distribuição normal de resíduos.
ANÁLISE DE RESÍDUOS	Fig. 150 Resíduos vs Valores Preditos.	
	Fig. 151 Resíduos vs Variável x_1 .	
	Fig. 152 Resíduos vs Variável x_2 .	
	Fig. 153 Resíduos vs Variável x_3 .	
	Fig. 154 Gráfico Probabilístico. ($R^2 = 81\%$)	

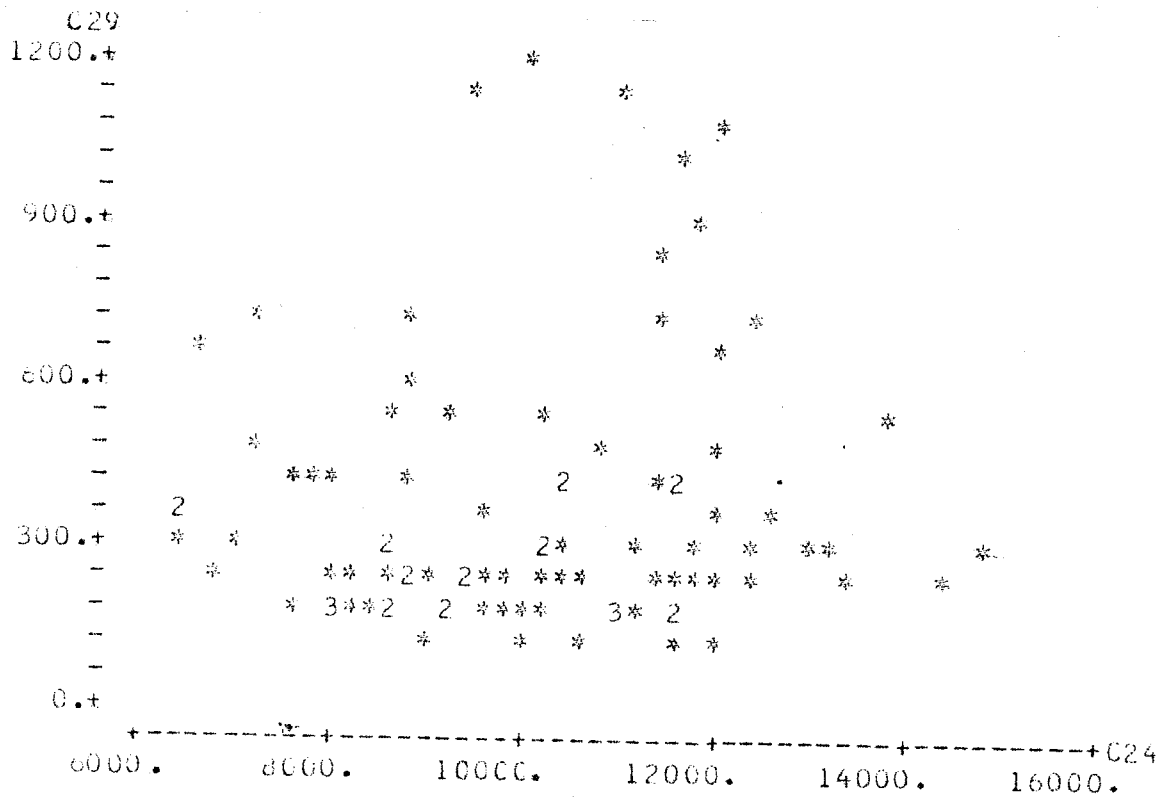


Fig. 149 G vs E_{21,2f}

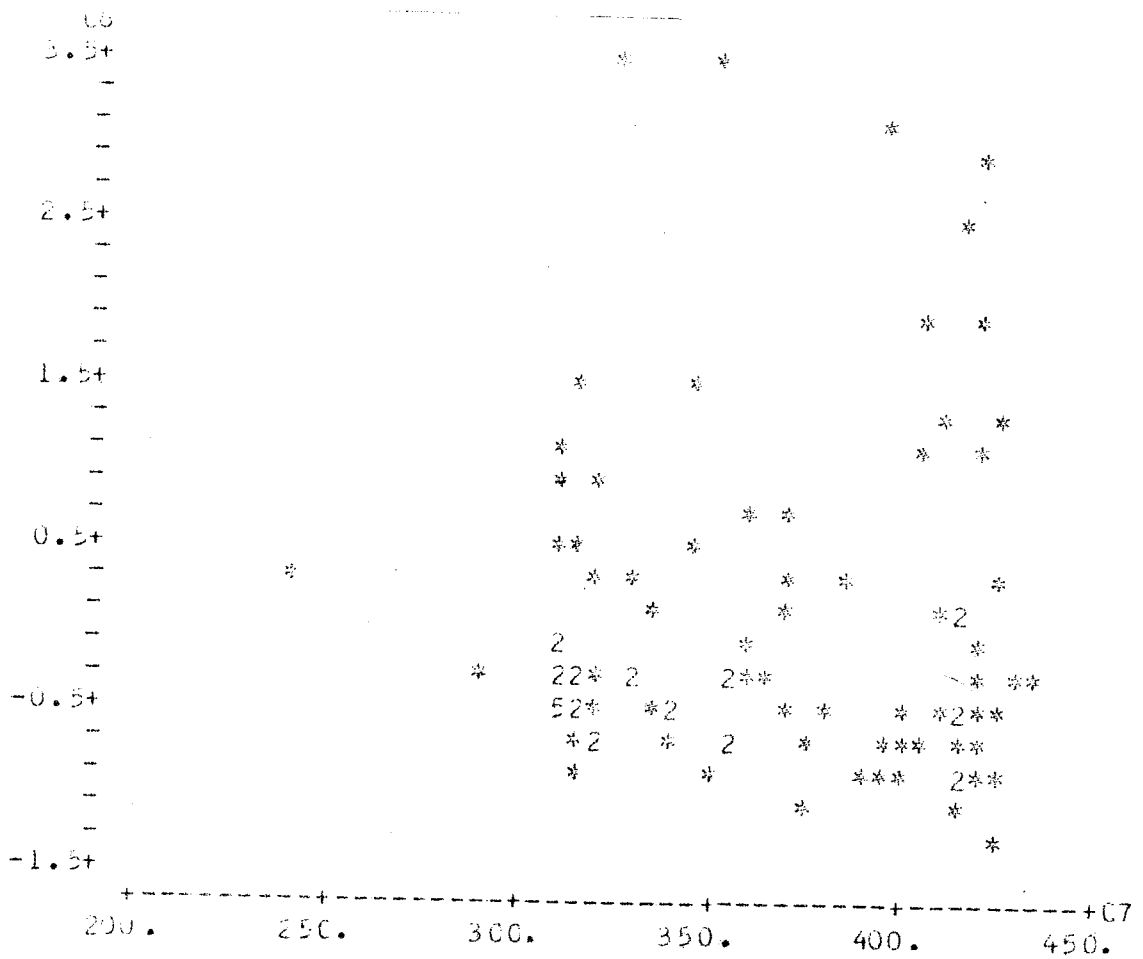


Fig. 150 Residuos vs Valores Preditos

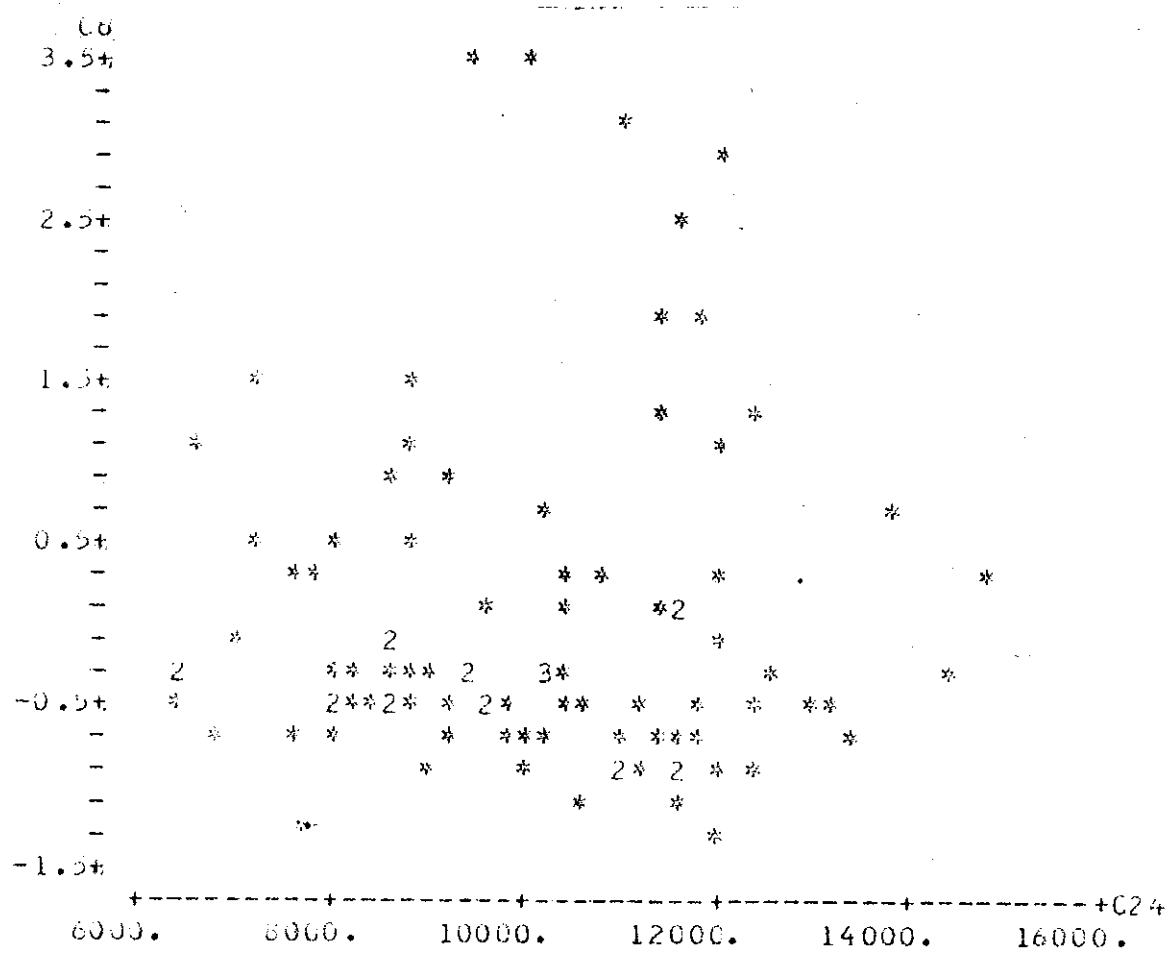


Fig. 151 Resíduos vs Variável x_1

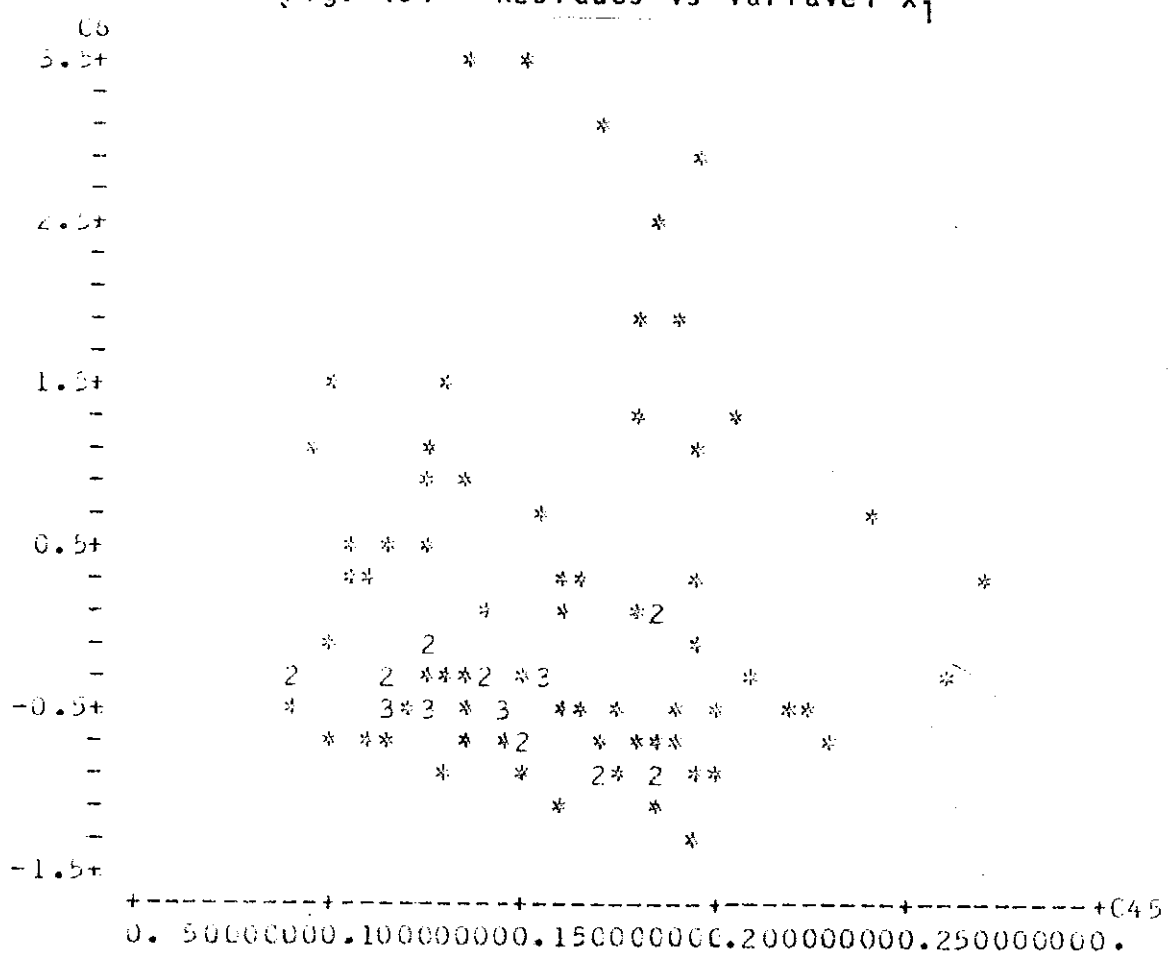


Fig. 152 Resíduos vs Variável x_2

5.4.2.2. Análise dos resultados - JATOBÁ

TÍTULO: RELAÇÃO ENTRE $G \times E_{21,2f}$

ESPÉCIE: JATOBÁ

QUADRO XLVII RESUMO DA ANÁLISE DE REGRESSÃO

ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO	OBSERVAÇÕES
MODELO	$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3$	A variável x_3 é altamente correlacionada com x_2 , não aparecendo no modelo.
EQUAÇÃO (5.6)	$G = 1172 - 0,165 E_{21,2f} + 7 \cdot 10^{-6} E_{21,2f}^2$	
COEF. DE CORRELAÇÃO LINEAR	$R^2 = 10,2\%$	Possui um baixo grau de correlação linear.
TESTE "F"	$F(2,30) = 1,70$ nível de significância α $\alpha = 21,39\%$	Regressão não significativa.
TESTE "t" (para cada variável)	$x_1: t = 1,39 \rightarrow \alpha = 8,96\%$ $x_2: t = 1,47 \rightarrow \alpha = 7,93\%$	As variáveis x_1 e x_2 não se apresentam bem relacionadas com y .
GRÁFICO DA EQUAÇÃO (5.6)	Fig.155 G vs $E_{21,2f}$	Estes gráficos revelam tendências, modelo não satisfatório. Pode-se considerar distribuição normal de resíduos.
ANÁLISE DE RESÍDUOS	Fig.156 Resíduos vs Valores Preditos	
	Fig.157 Resíduos vs Variável x_1 .	
	Fig.158 Resíduos vs Variável x_2 .	
	Fig.159 Resíduos vs Variável x_3 .	
	Fig.160 Gráfico Probabilístico ($R^2 = 96\%$)	

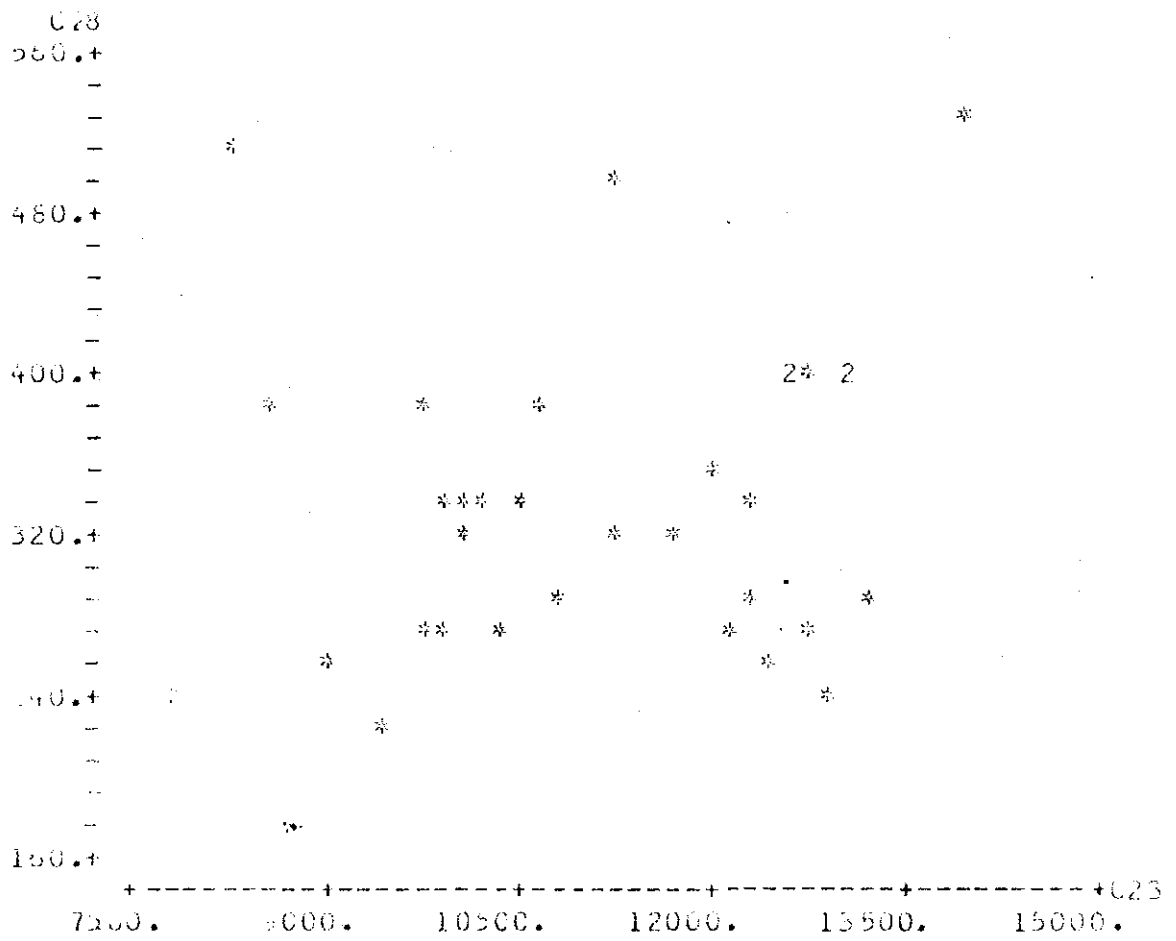


Fig. 155 G vs E_{21,2f}

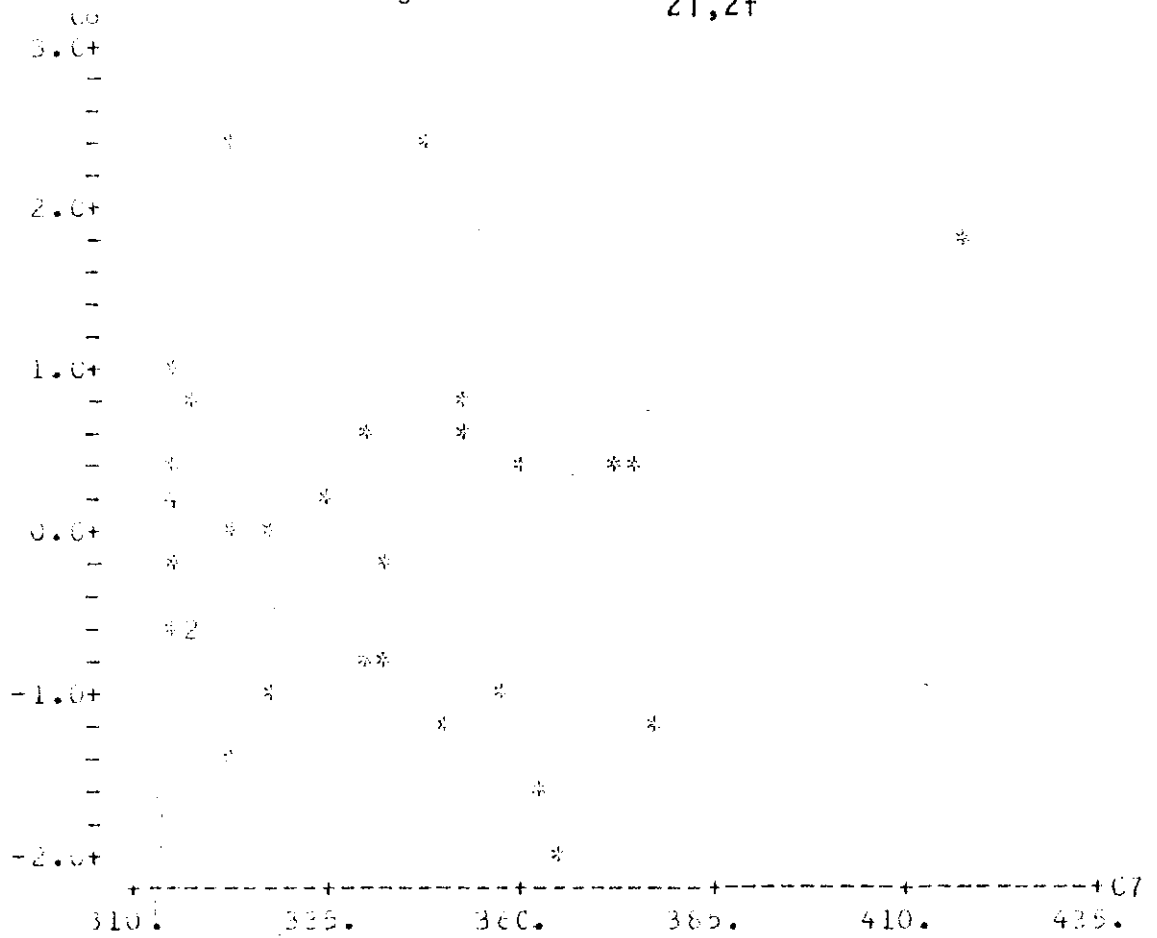


Fig. 156 Residuos vs Valores Preditos

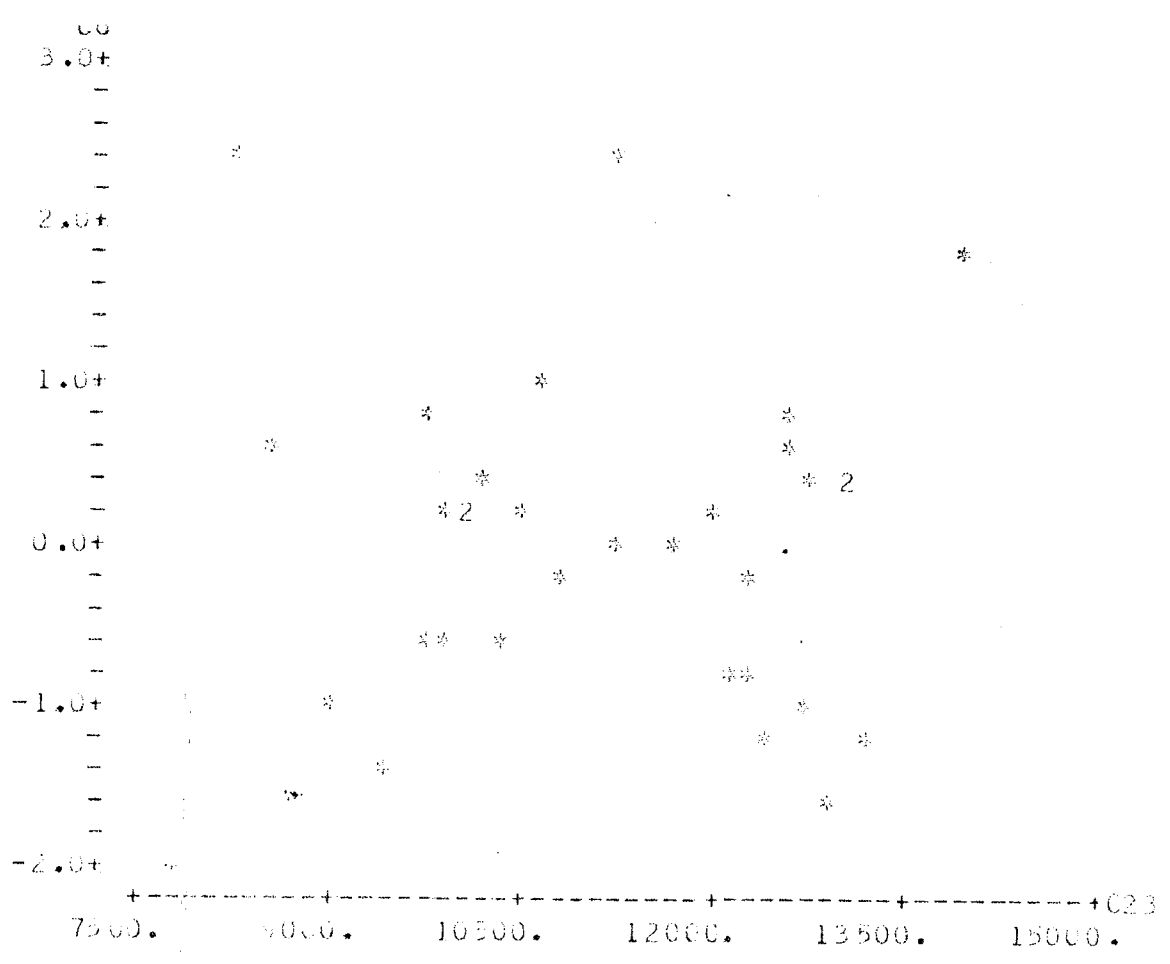


Fig. 157 Resíduos vs Variável x_1

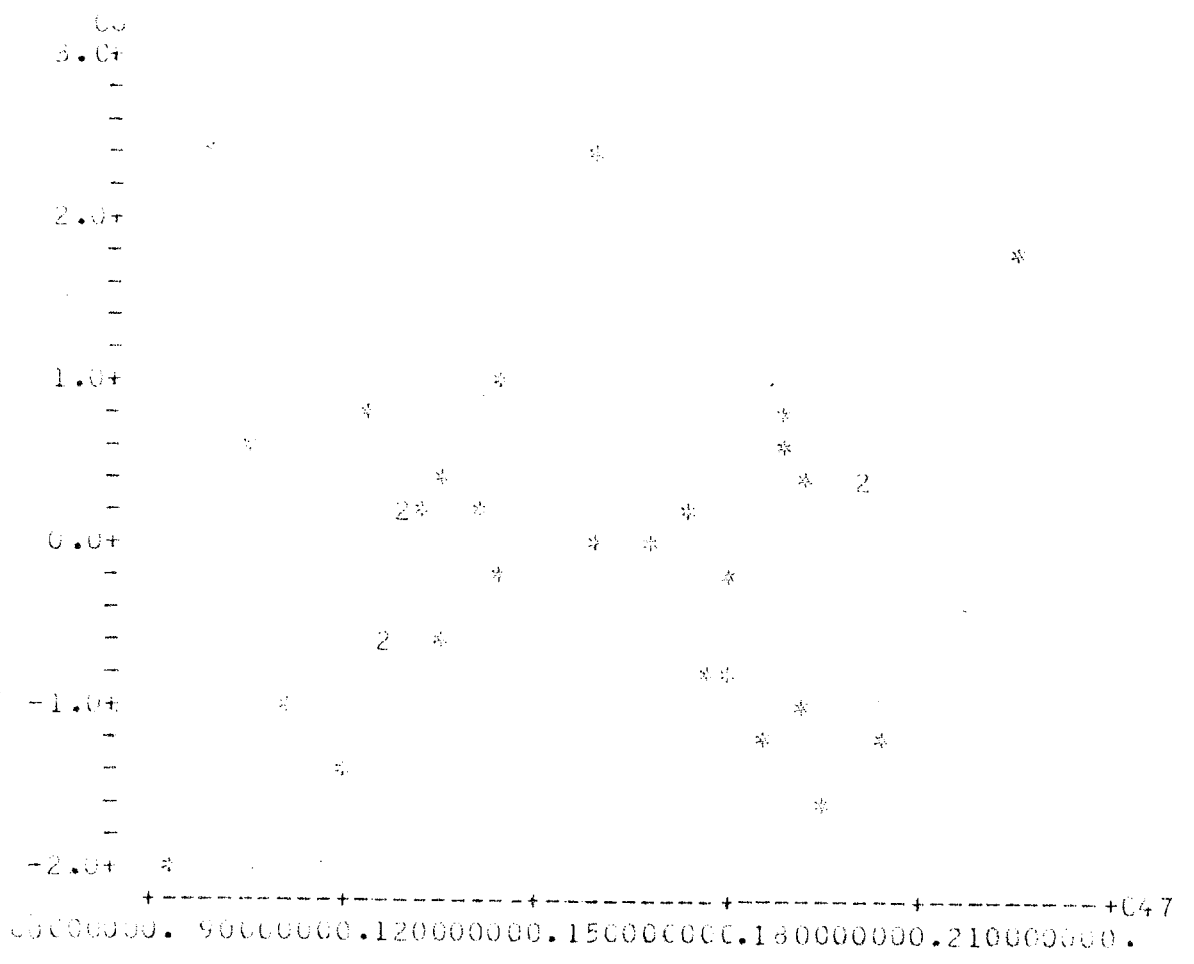
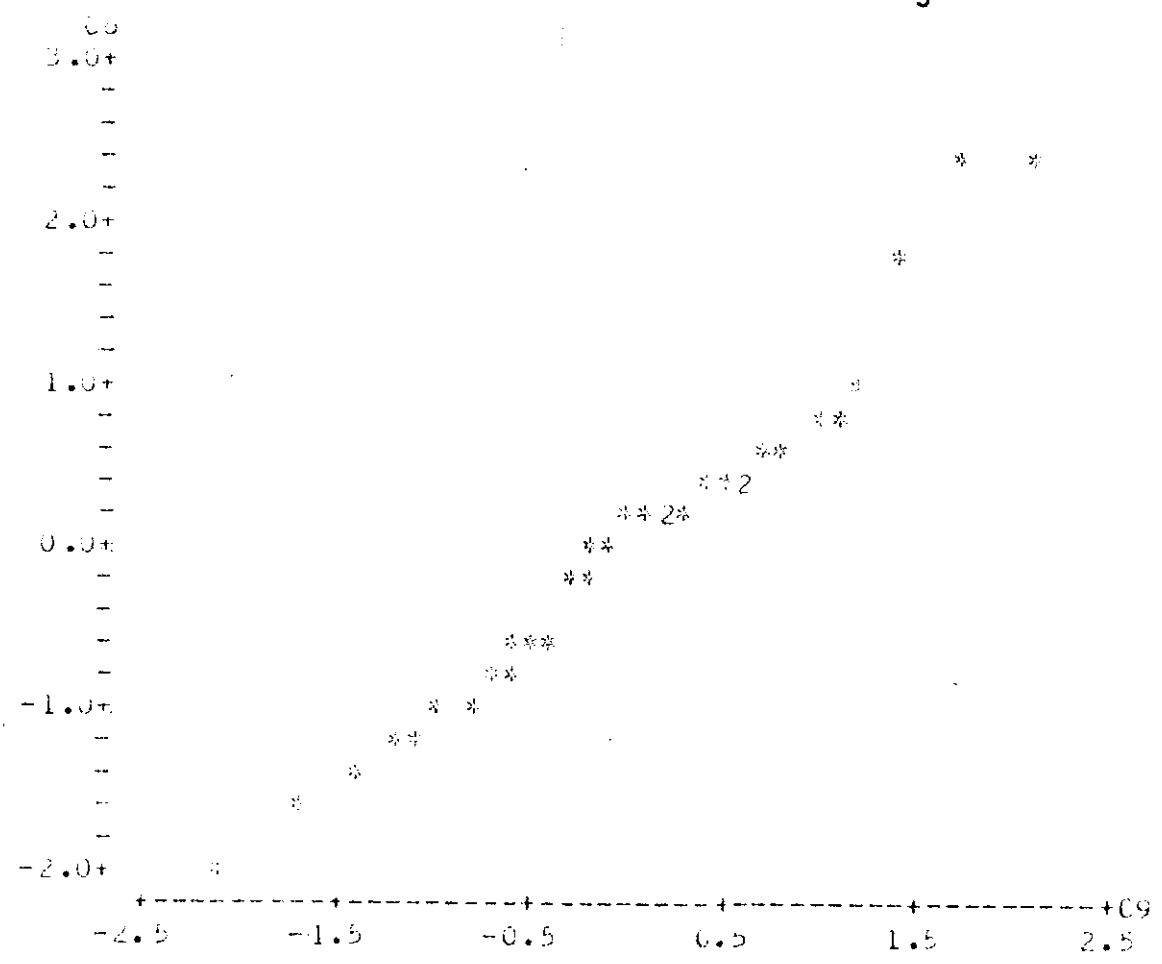
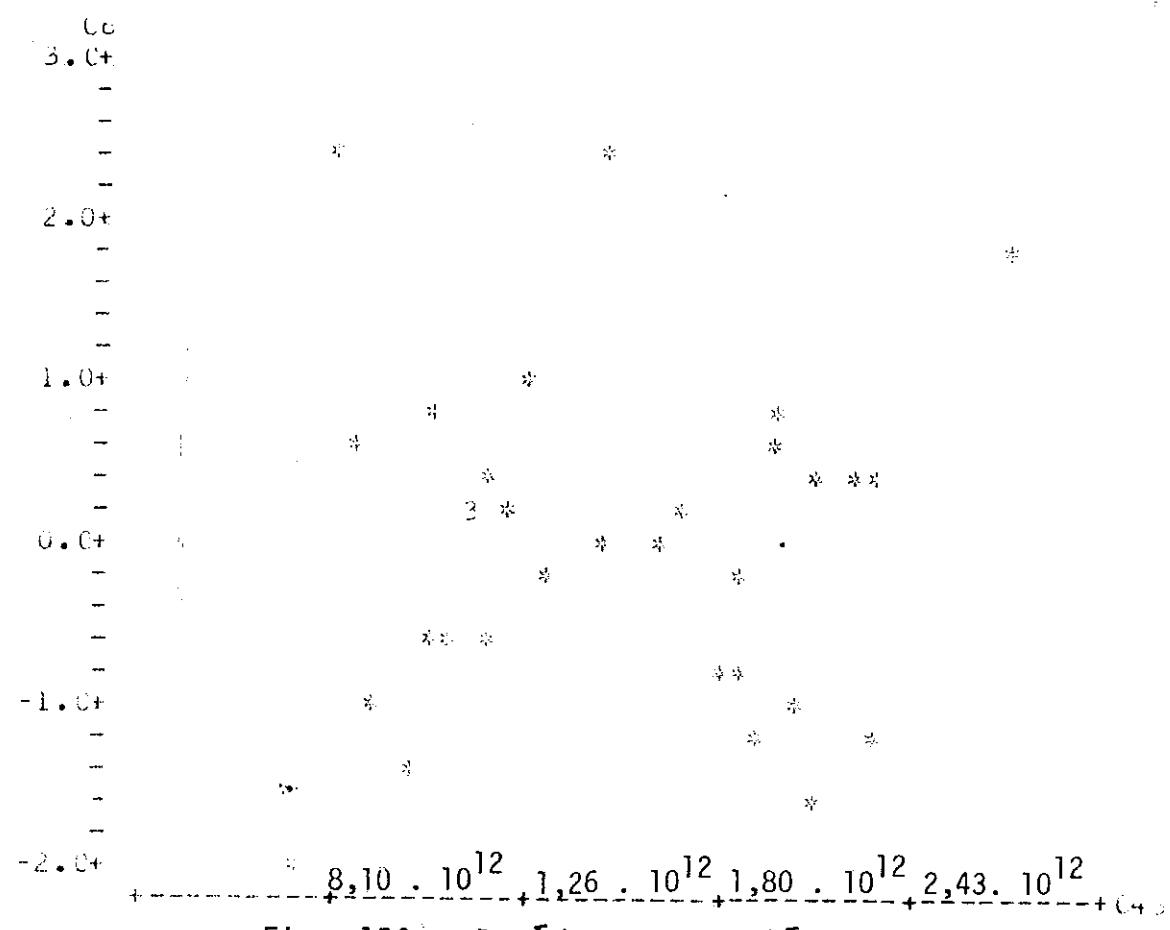


Fig. 158 Resíduos vs Variável x_2



5.4.2.3. Análise dos resultados - EUC. TERETICORNIS

TÍTULO: RELAÇÃO ENTRE $G \times E_{21,2f}$

ESPÉCIE: EUCALIPTO TERETICORNIS

QUADRO XLVIII RESUMO DA ANÁLISE DE REGRESSÃO

ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO	OBSERVAÇÕES
MODELO	$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3$	A variável x_3 é altamente correlacionada com x_2 , não aparecendo no modelo.
EQUAÇÃO (5.7)	$G = - 4538 + 0,481 E_{21,2f} - 1 \cdot 10^{-5} E_{21,2f}^2$	
COEF. DE CORRELAÇÃO LINEAR	$R^2 = 37,4\%$	Possui um baixo grau de correlação linear.
TESTE "F"	$F(2,30) = 8,94$ nível de significância $\alpha < 0,1\%$	Regressão altamente significativa.
TESTE "t" (para cada variável)	$x_1: t = 3,31 \rightarrow \alpha = 0,13\%$ $x_2: t = 3,15 \rightarrow \alpha = 0,18\%$	As variáveis x_1 e x_2 estão altamente correlacionados com y .
GRÁFICO DA EQUAÇÃO (5.7)	Fig. 161 G vs $E_{21,2f}$	Estes gráficos revelam tendências, modelo não satisfatório. Pode-se considerar distribuição normal de resíduos.
ANÁLISE DE RESÍDUOS	Fig. 162 Resíduos vs Valores Preditos	
	Fig. 163 Resíduos vs Variável x_1 .	
	Fig. 164 Resíduos vs Variável x_2 .	
	Fig. 165 Gráfico Probabilístico. ($R^2 = 98\%$)	

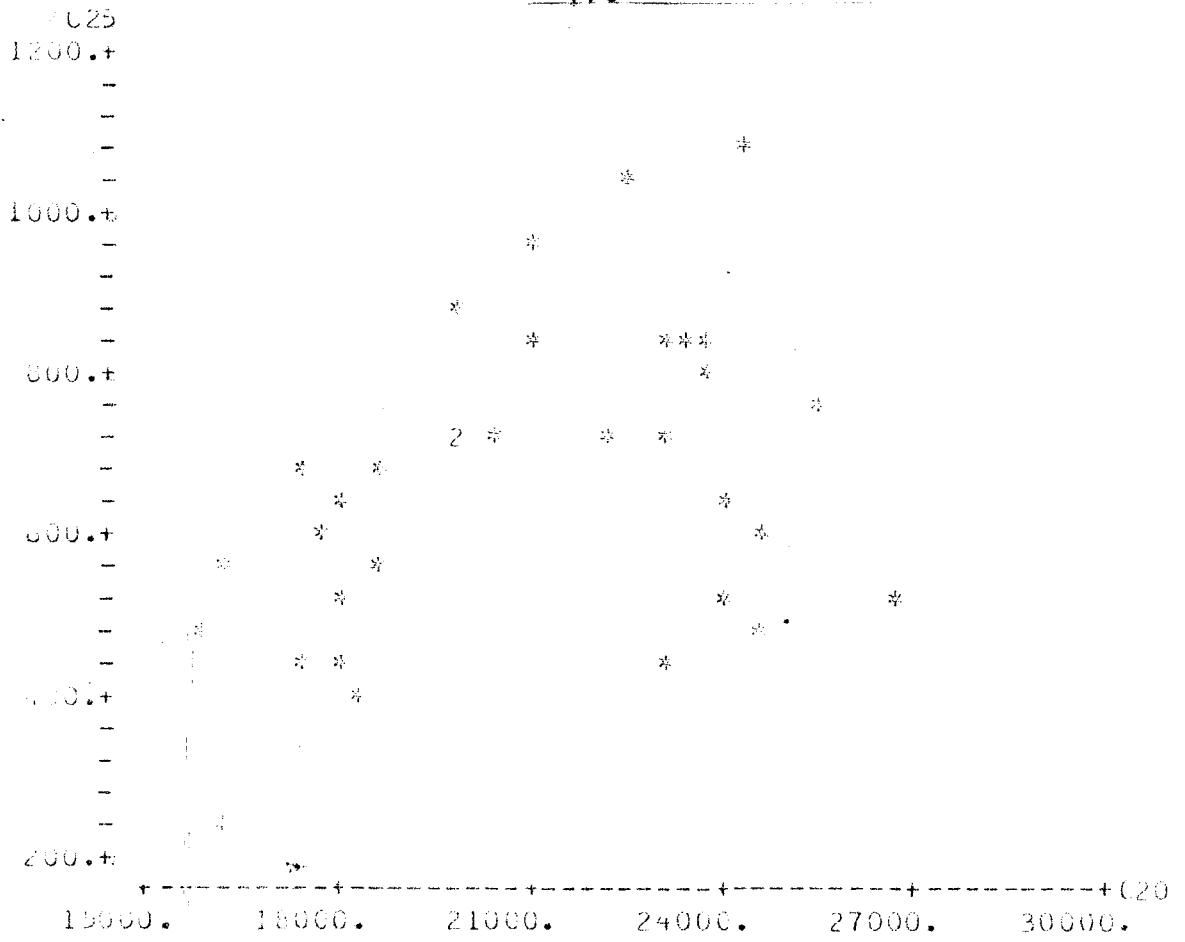


Fig. 161 G vs $E_{21,2f}$

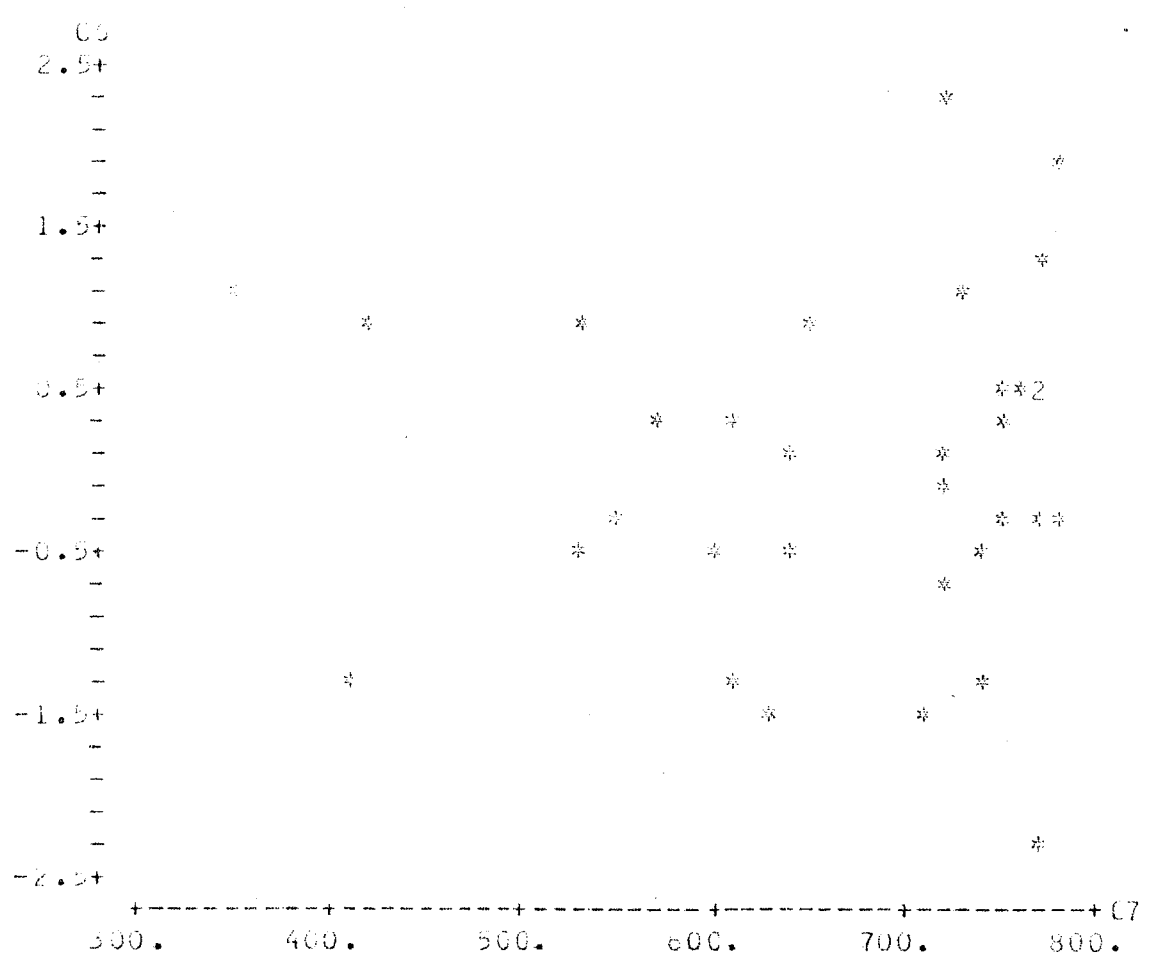


Fig. 162 Resíduos vs Valores Preditos

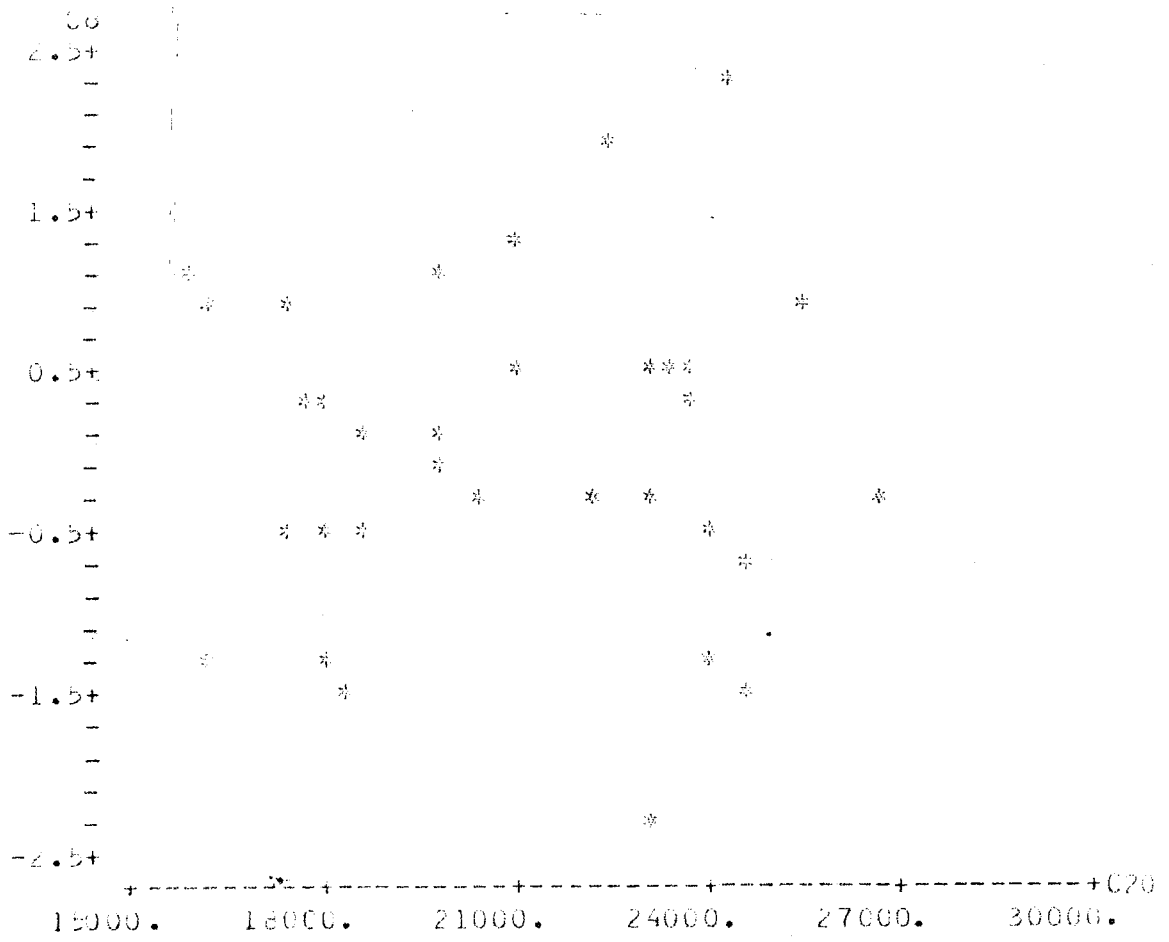


Fig. 163 Resíduos vs Variável x_1

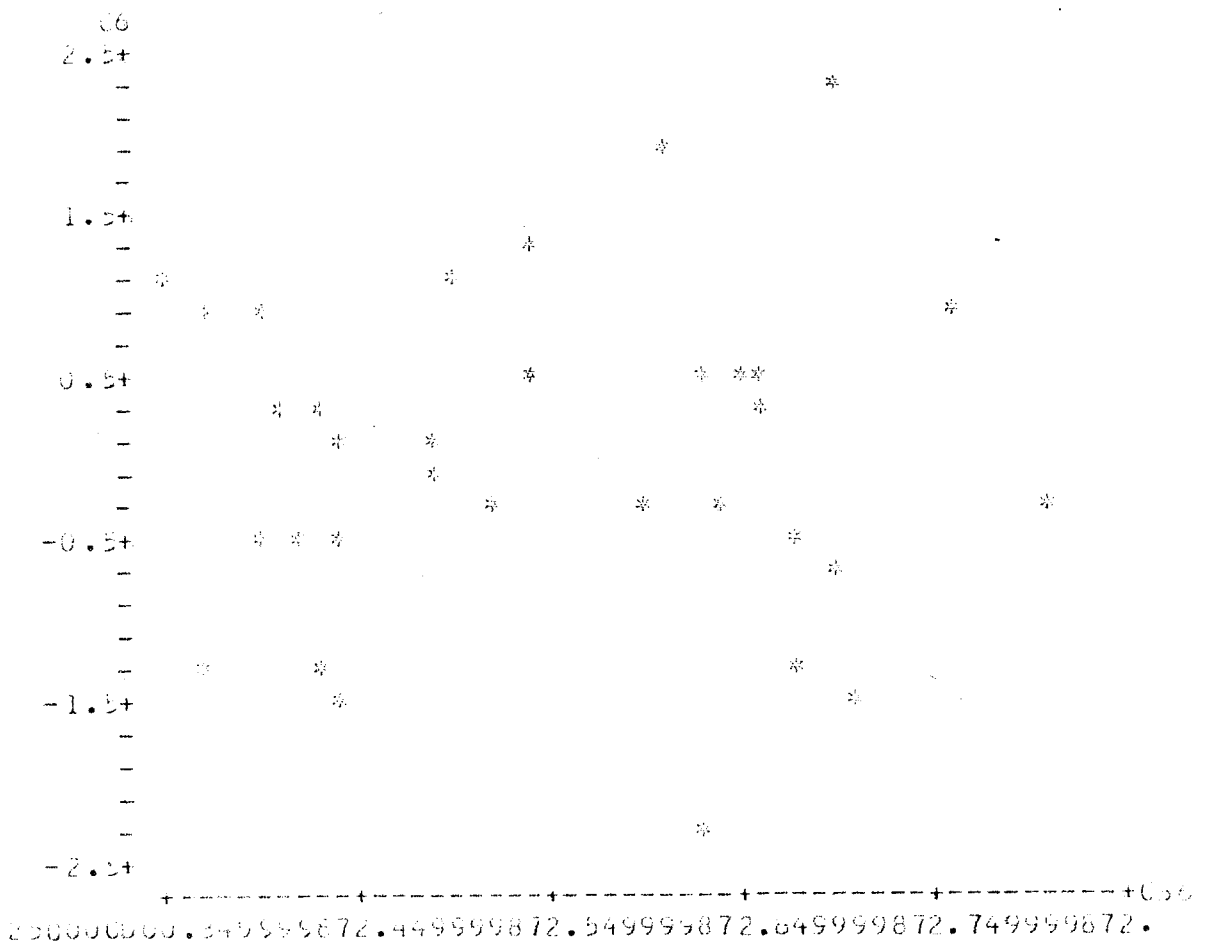


Fig. 164 Resíduos vs Variável x_2

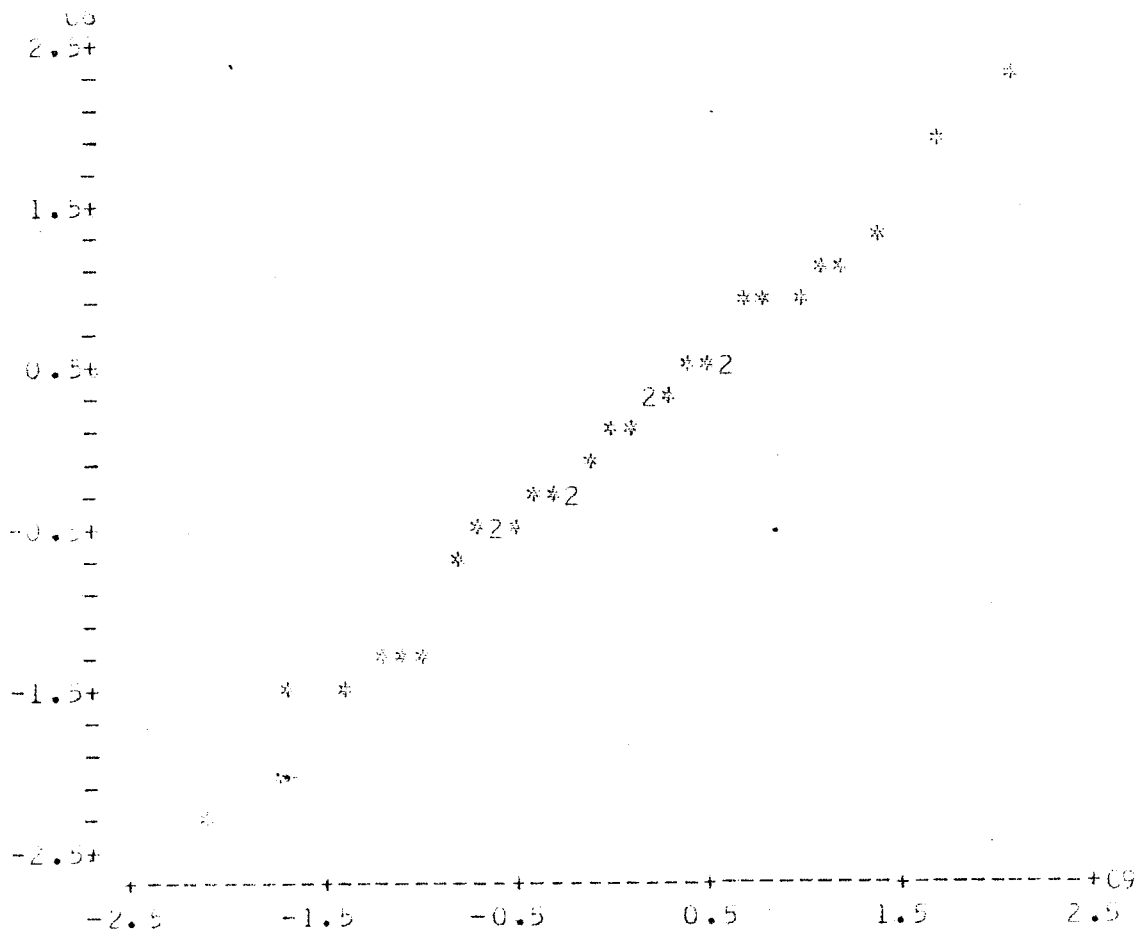


Fig. 165 Gráfico Probabilístico - ($R^2 = 98\%$)

5.4.2.4. Análise dos resultados - GONÇALO ALVES

TÍTULO: RELAÇÃO ENTRE $G \times E_{21,2f}$

ESPÉCIE: GONÇALO ALVES

QUADRO XLIX RESUMO DA ANÁLISE DE REGRESSÃO

ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO	OBSERVAÇÕES
MODELO	$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3$	A variável x_3 é altamente correlacionada com a x_2 , não aparecendo no modelo.
EQUAÇÃO (5.8)	$G = 2052 - 0,314 E_{21,2f} + 2 \cdot 10^{-5} E_{21,2f}$	
COEF. DE CORRELAÇÃO LINEAR	$R^2 = 69,2\%$	Tem-se bom grau de correlação linear.
TESTE "F"	$F(2,3) = 3,36$ nível de significância $\alpha = 19,86\%$	Regressão não significativa.
TESTE "t" (para cada variável)	$x_1: t = 0,51 \rightarrow \alpha = 32\%$ $x_2: t = 0,58 \rightarrow \alpha = 30\%$	As variáveis x_1 e x_2 não se relacionam com y , neste modelo.
GRÁFICO DA EQUAÇÃO (5.8)	Fig. 166 G vs $E_{21,2f}$	Estes gráficos revelam tendências, modelo não satisfatório. Pelo valor $R^2 = 88\%$ aceita-se distribuição normal de resíduos.
ANÁLISE DE RESÍDUOS	Fig. 167 Resíduos vs Valores Preditos.	
	Fig. 168 Resíduos vs Variável x_1 .	
	Fig. 169 Resíduos vs Variável x_2 .	
	Fig. 170 Gráfico Probabilístico. ($R^2 = 88\%$)	

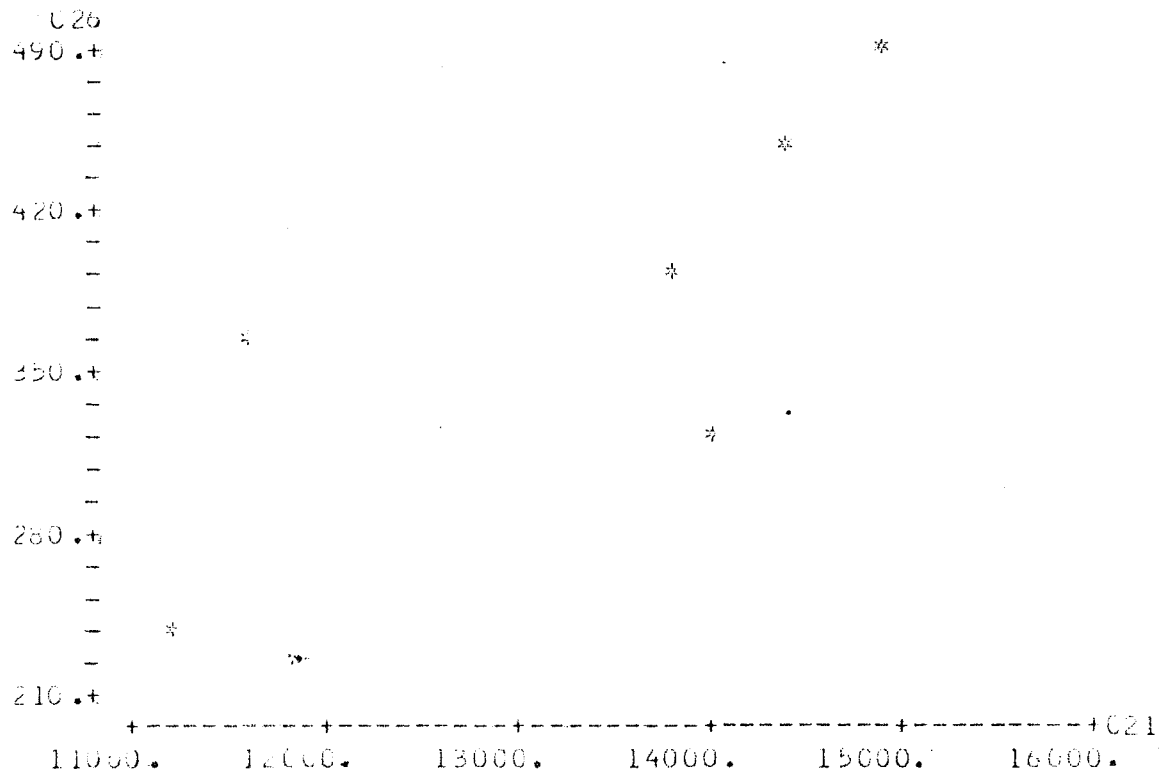


Fig. 166 G vs E_{21,2f}

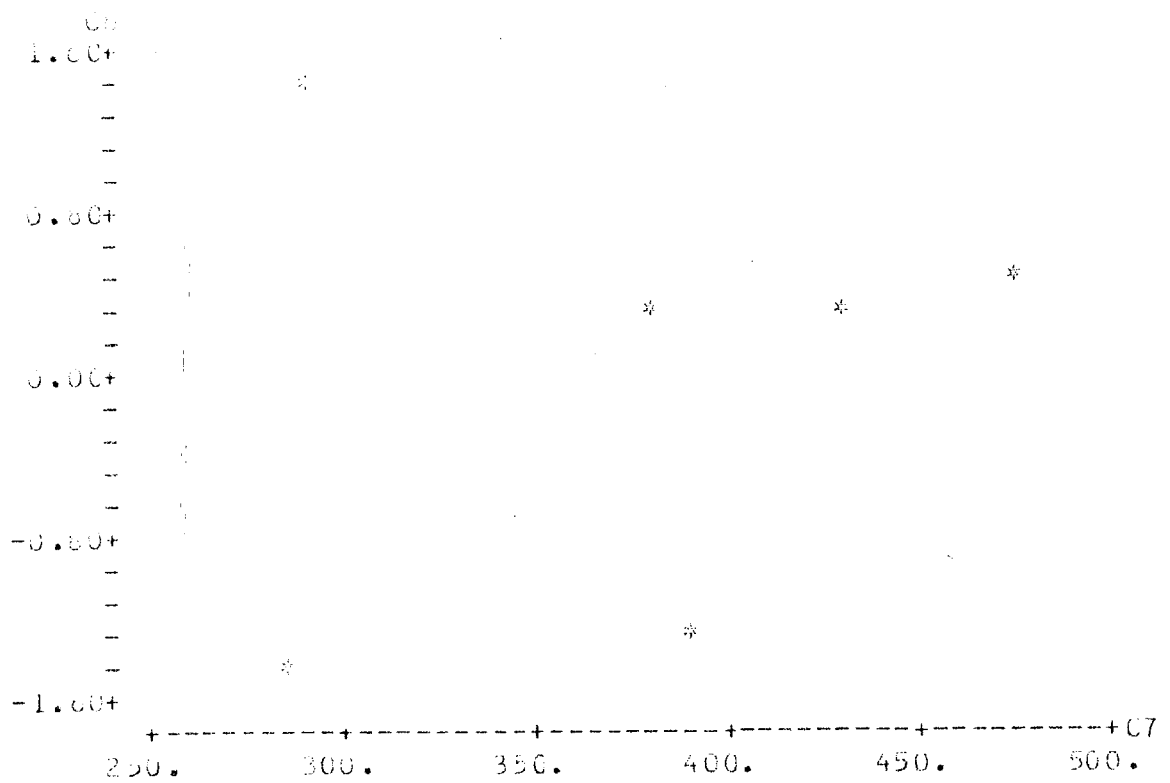


Fig. 167 Residuos vs Valores Preditos

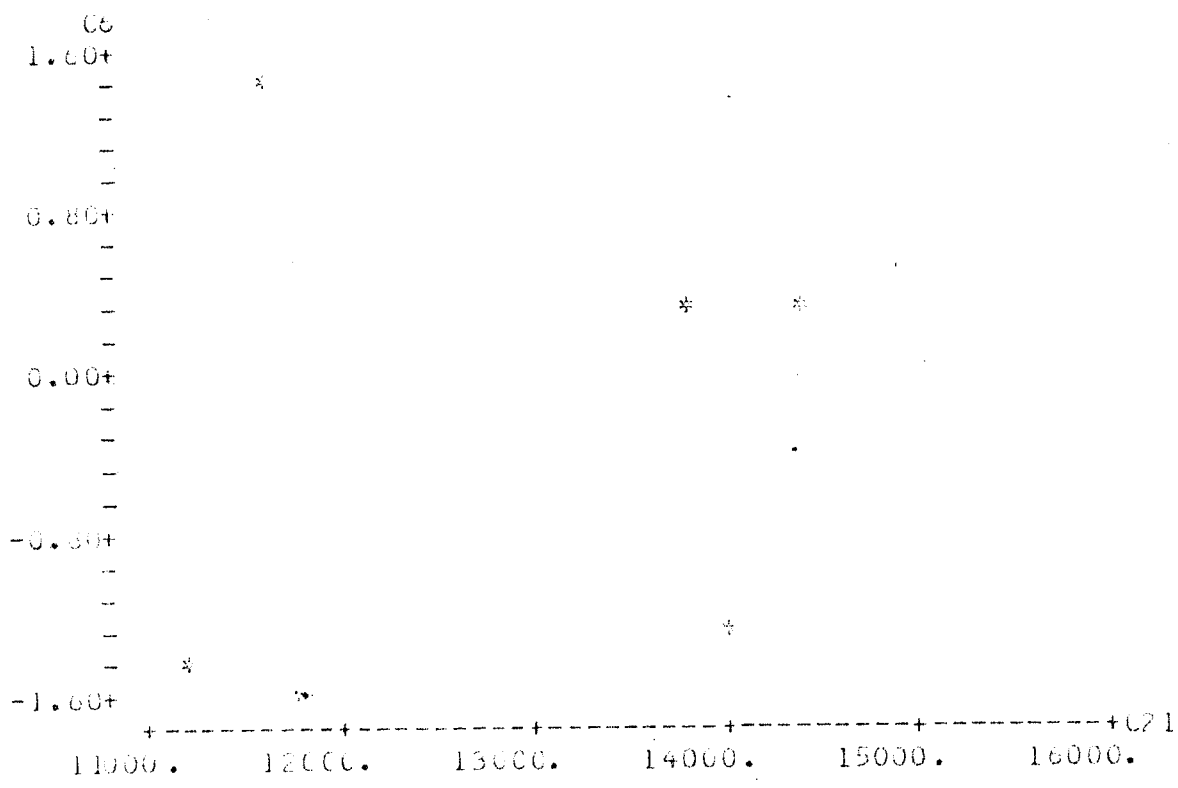


Fig. 168 Resĩduos vs Variável x_1

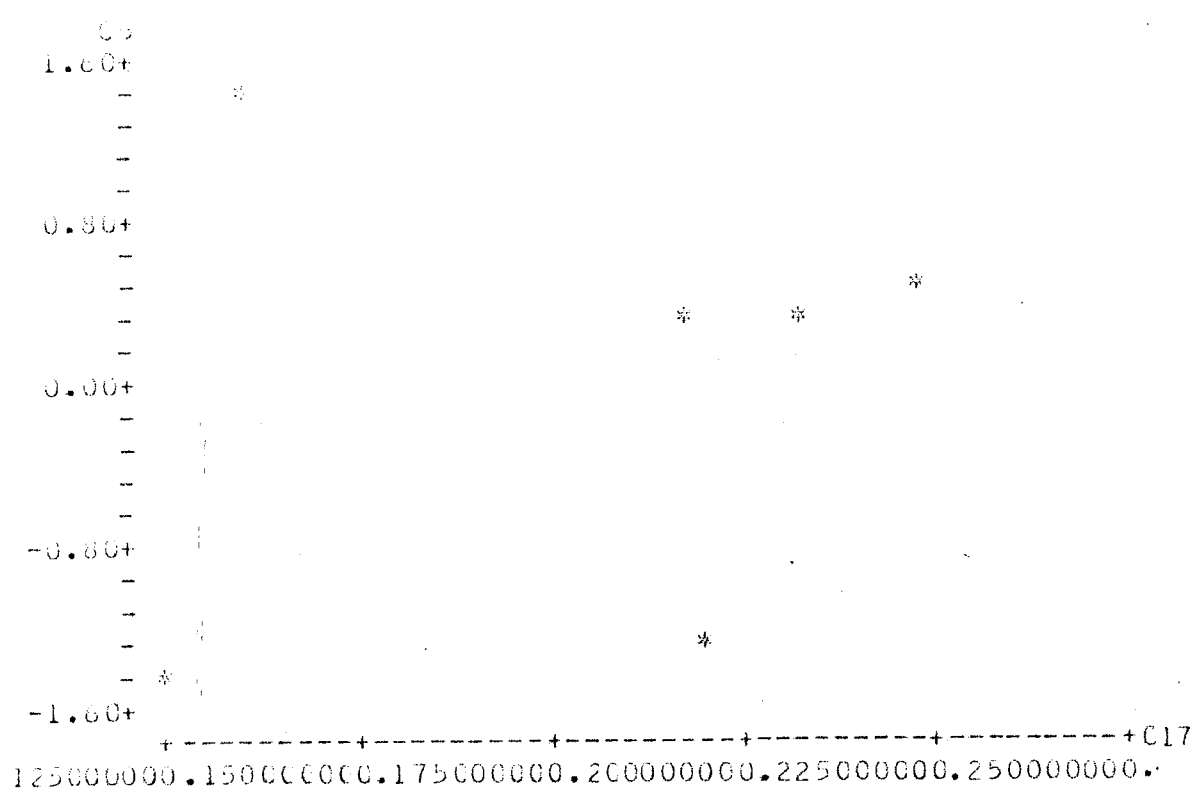


Fig. 169 Resĩduos vs Variável x_2

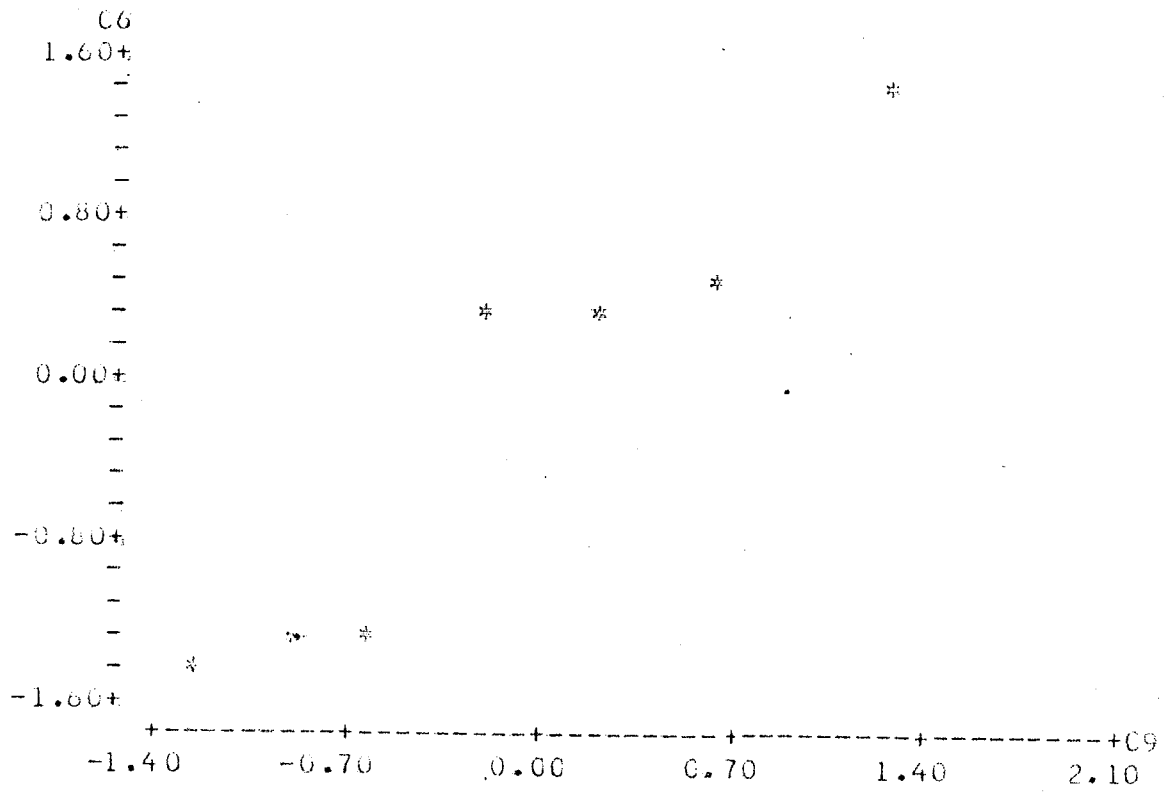


Fig. 170 Gráfico Probabilístico - ($R^2 = 88\%$)

5.4.2.5. Análise dos resultados - PEROBA DO NORTE

TÍTULO: RELAÇÃO ENTRE $G \times E_{21,2f}$

ESPÉCIE: PEROBA DO NORTE

QUADRO L RESUMO DA ANÁLISE DE REGRESSÃO

ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO	OBSERVAÇÕES
MODELO	$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3$	A variável x_3 é altamente correlacionada com a x_2 , não aparecendo no modelo.
EQUAÇÃO (5.9)	$G = 1742 - 0,226 E_{21,2f} + 1 \times 10^5 E_{21,2f}^2$	
COEF. DE CORRELAÇÃO LINEAR	$R^2 = 87,6\%$	Grau de correlação linear excelente.
TESTE "F"	$F(2,3) = 10,64$ nível de significância α $\alpha = 4,79\%$	Regressão sig-nificante.
TESTE "t" (para cada variável)	$x_1: t = 1,28 \rightarrow \alpha = 14,79\%$ $x_2: t = 1,53 \rightarrow \alpha = 10\%$	As variáveis x_1 e x_2 não se apresentam bem relacionadas com y .
GRÁFICO DA EQUAÇÃO (5.9)	Fig.171 G vs $E_{21,2f}$	Estes gráficos revelam alguma tendência, modelo discretamente satisfatório. Pode-se considerar distribuição normal de resíduos
ANÁLISE DE RESÍDUOS	Fig.172 Resíduos vs Valores Preditos.	
	Fig.173 Resíduos vs Variável x_1 .	
	Fig.174 Resíduos vs Variável x_2 .	
	Fig.175 Gráfico Probabilístico. ($R^2 = 92\%$)	

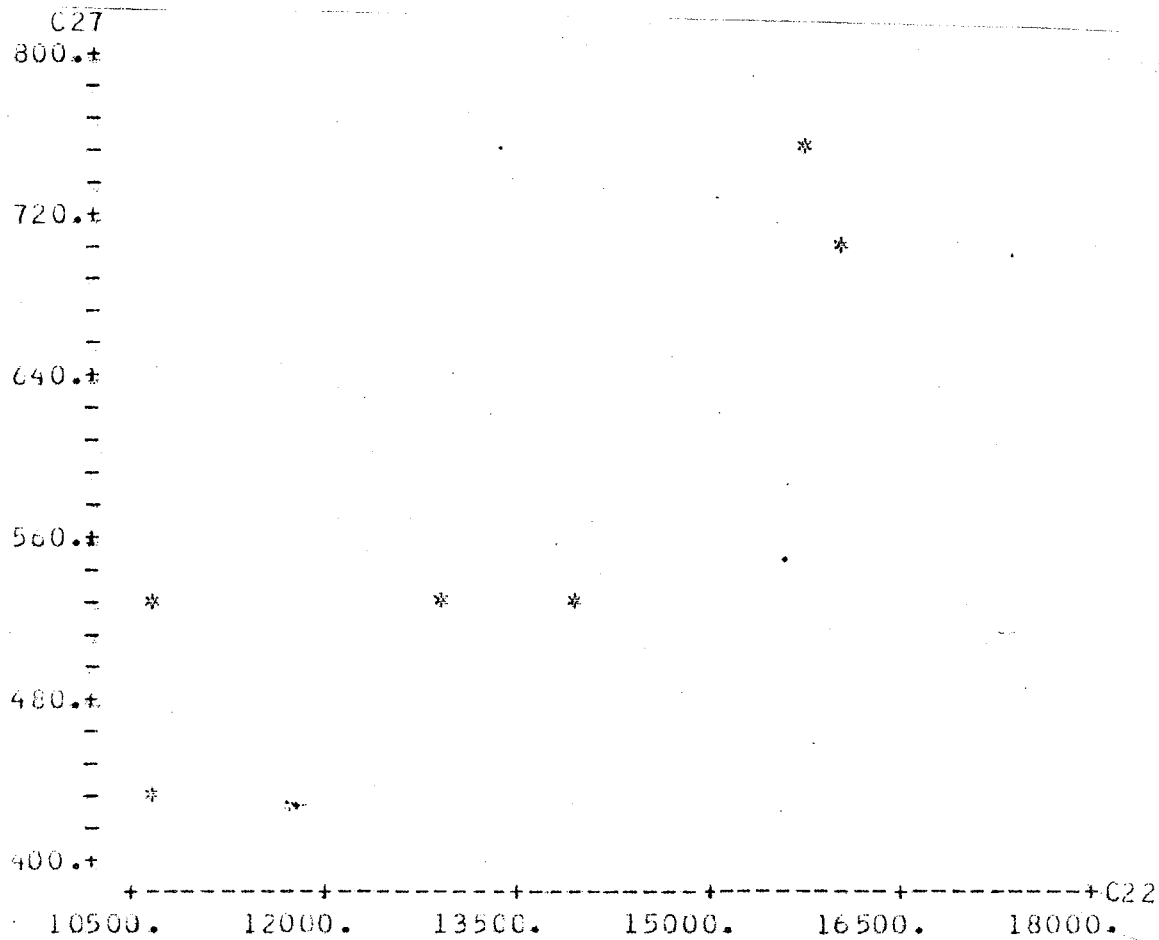


Fig. 171 G vs $E_{21,2f}$

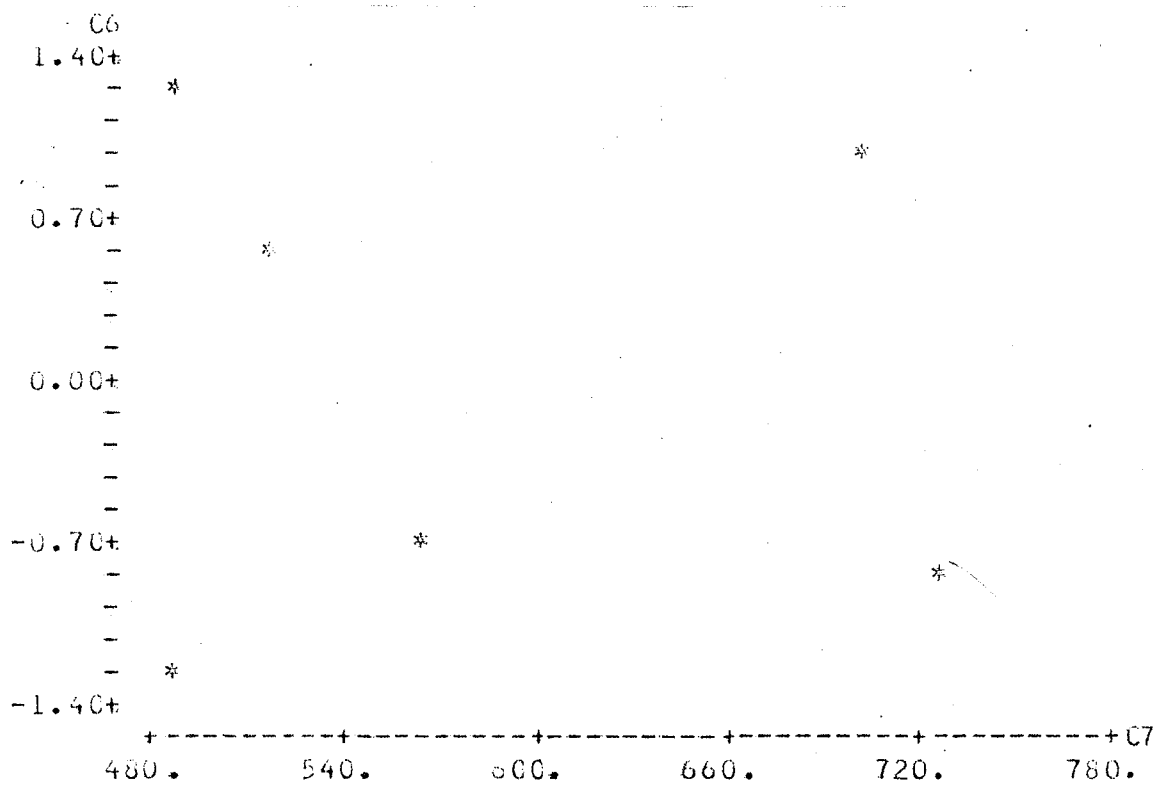


Fig. 172 Resíduos vs Valores Preditos

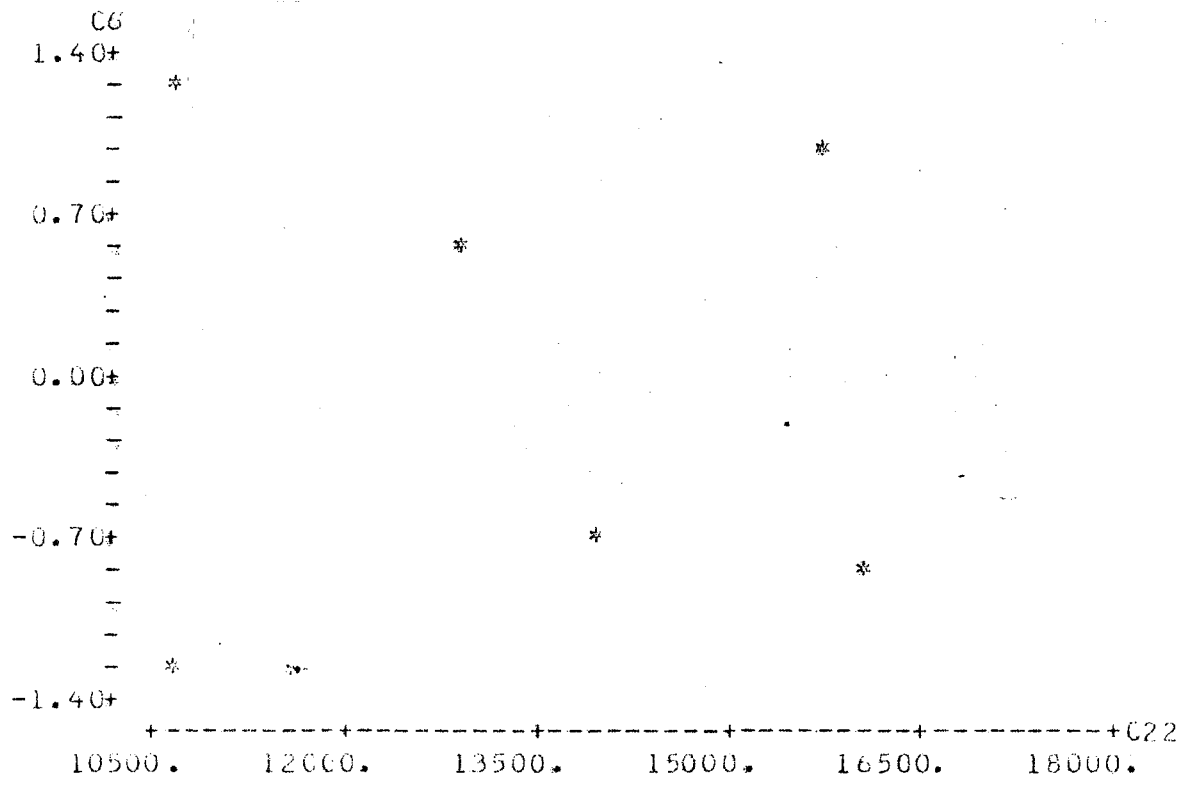


Fig. 173 Resíduos vs Variável x_1

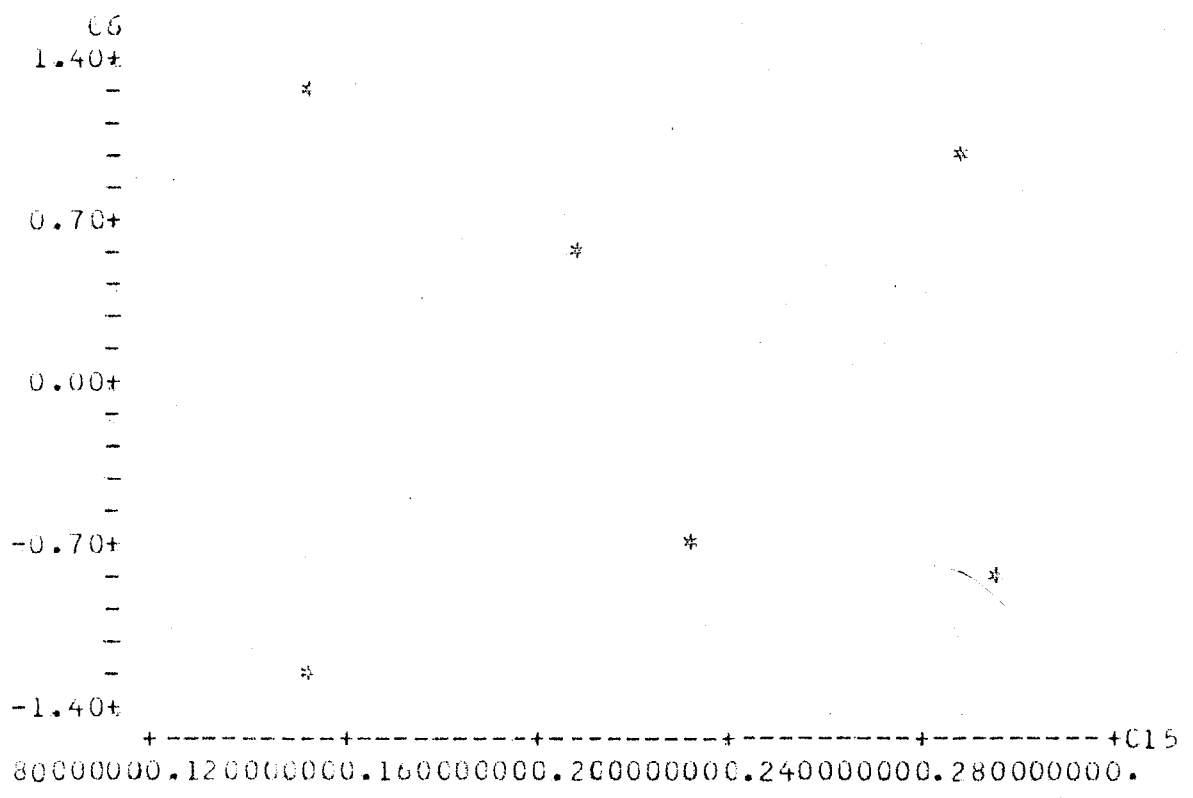


Fig. 174 Resíduos vs Variável x_2

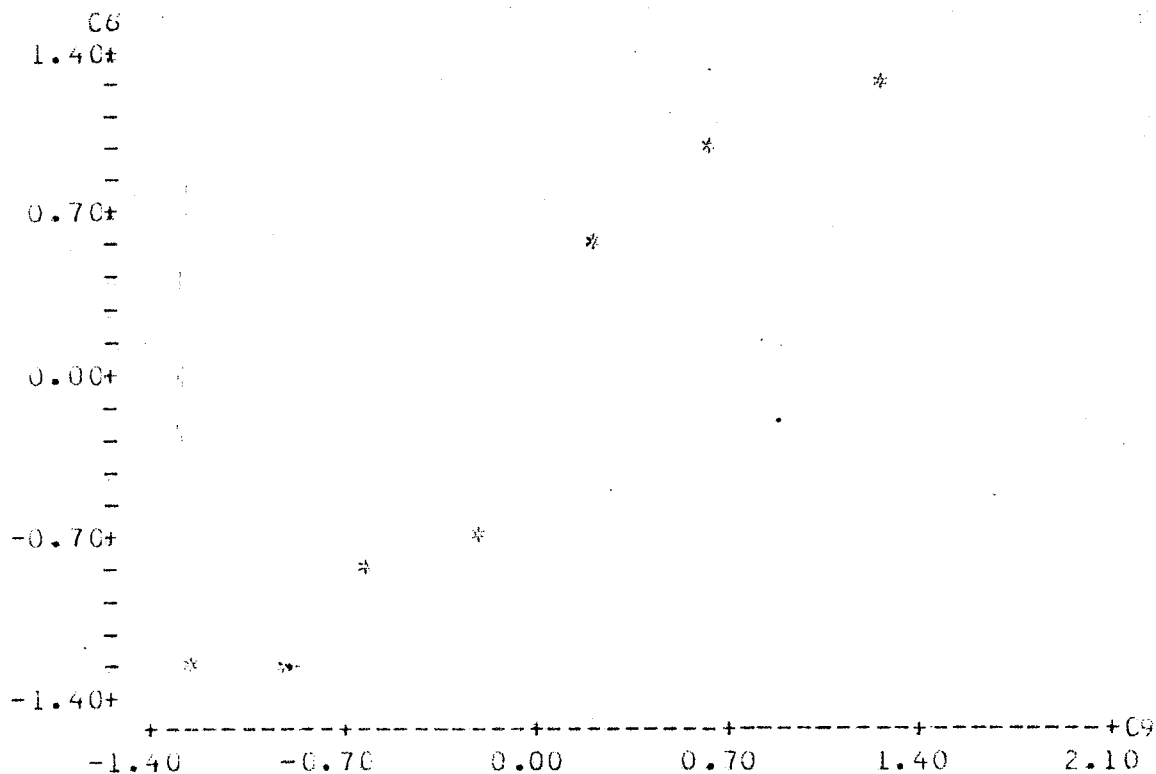


Fig. 175 Gráfico Probabilístico - ($R^2 = 92\%$)

5.5. Conclusões

Diante da análise estatística realizada pode-se supor que as relações entre G e E, para amostra em estudo, não foram satisfatórias. Observou-se um fato interessante na análise estatística das espécies Peroba do Norte e Gonçalves Alves, pois esta apresentou excelentes valores de R^2 , entretanto, insuficientes para uma completa análise de regressão.

Para um entendimento destas conclusões é apresentado um estudo complementar, oportuno e significativo para esclarecer o comportamento intrínseco da madeira.

5.5.1. Estudo complementar

São apresentados histogramas e diagramas "ramo e folhas" para conjunto de 172 resultados e para as amostras por espécies.

Para o desenvolvimento deste estudo, utilizou-se a subrotina MINITAB, através dos comandos HIST e STEM, para os traçados dos histogramas e dos diagramas "ramo e folhas".

5.5.1.1. Histograma e diagrama "ramo e folhas" das amostras de 172 resultados

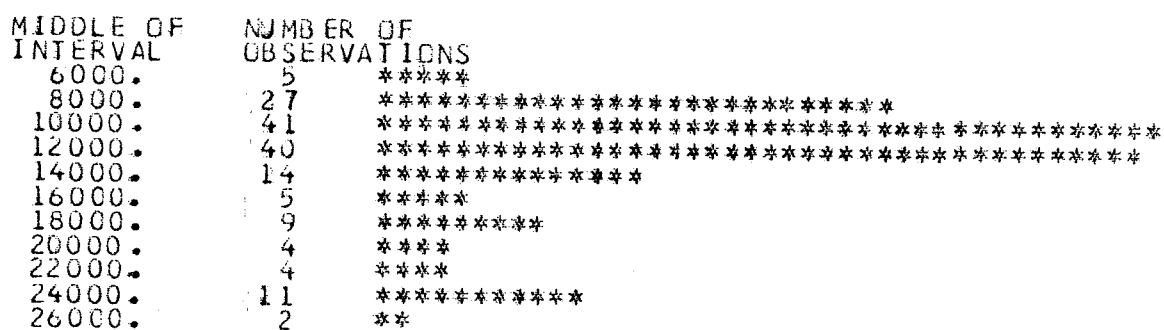


Fig. 176 Histograma do Módulo de Elasticidade Longitudinal

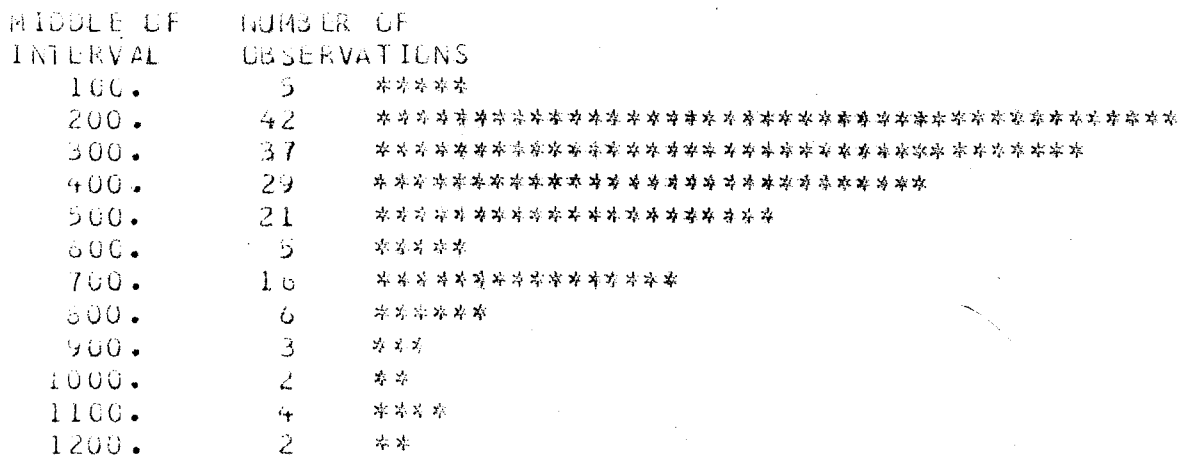


Fig. 177 Histograma do Módulo de Elasticidade Transversal

5	6	33458
15	7	0225678999
34	8	0011335566666777889
54	9	00111344456677778999
78	10	000111112233445556667799
(26)	11	00112333344556666666788999
68	12	0000122333455667899
49	13	0112378999
39	14	4479
35	15	78
33	16	023
30	17	2269
26	18	01445
21	19	768

HI 205, 210, 210, 222, 225, 230, 230,
 232, 234, 236, 237, 239, 240, 244, 245, 246, 255, 267

Fig. 178 Diagrama "ramo e folhas" - Módulo de Elasticidade Longitudinal

5	1*	01134
21	1.	66677777888886899
47	2*	000011111223333333334444
69	2.	5566666777777778899999
84	3*	000122222333344
(13)	3.	5557788889999
75	4*	0000011122223334
59	4.	5577899
52	5*	00122222333344
36	5.	57
36	6*	003
33	6.	5567899
26	7*	001123334
17	7.	69
15	8*	2234
11	8.	588
8	9*	
6	9.	6

HI 99, 105, 106, 110, 114, 115, 119

Fig. 179 Diagrama "ramo e folhas" - Módulo de Elasticidade Transversal

Pelo aspecto das fig. 176 a 179 nota-se que, em certos intervalos, a densidade de resultados bem menor que em outros. Como uma das conclusões do capítulo 4, a abordagem geral da madeira envolve uma somatória de várias espécies componentes do campo amostral, ocupando cada espécie um intervalo (podendo existir superposições) numérico de resultados do parâmetro em estudo. Esta conclusão se torna evidente com a análise dos histogramas dos resultados totais.

5.5.1.2. Histograma e diagrama "ramo e folhas" por espécie

5.5.1.2.1. Espécie - Peroba Rosa

MIDDLE OF INTERVAL	NUMBER OF OBSERVATIONS	
6000.	3	***
7000.	5	*****
8000.	11	*****
9000.	19	*****
10000.	17	*****
11000.	13	*****
12000.	19	*****
13000.	4	****
14000.	2	**
15000.	1	*

Fig. 180 Histograma do Módulo de Elasticidade Longitudinal

MIDDLE OF INTERVAL	NUMBER OF OBSERVATIONS	
100.	5	*****
200.	37	*****
300.	18	*****
400.	13	*****
500.	7	*****
600.	2	**
700.	5	*****
800.	1	*
900.	1	*
1000.	1	*
1100.	2	**
1200.	2	**

Fig. 181 Histograma do Módulo de Elasticidade Transversal

3	6*	334
5	6.	58
8	7*	022
14	7.	567999
19	8*	00113
31	8.	556666777889
38	9*	0111344
45	9.	5667799
(10)	10*	0111113344
39	10.	56799
34	11*	00123344
26	11.	566666678899
14	12*	0000333
7	12.	69
5	13*	13
3	13.	7
2	14*	4
1	14.	7

Fig. 182 Diagrama "ramo e folhas" - Módulo de Elasticidade Longitudinal

5	1*	01134
21	1.	666777788888899
42	2*	00001111223333333444
(12)	2.	56667778999
40	3*	000124
34	3.	577899
28	4*	1112233
21	4.	579
18	5*	1224
14	5.	7
13	6*	3
12	6.	89
10	7*	013

HI 84, 88, 99, 110, 114, 115, 119

Fig. 183 Diagrama "ramo e folhas" - Módulo de Elasticidade Transversal

5.5.1.2.2. Espécie - Jatobá

MIDDLE OF INTERVAL	NUMBER OF OBSERVATIONS
16000.	3 ***
17000.	2 **
18000.	6 ****
19000.	1 *
20000.	3 ***
21000.	3 ***
22000.	1 *
23000.	5 *****
24000.	5 *****
25000.	2 **
26000.	1 *
27000.	1 *

Fig. 184 Histograma do Módulo de Elasticidade Longitudinal

MIDDLE OF INTERVAL	NUMBER OF OBSERVATIONS
200.	1 *
300.	0
400.	3 ***
500.	7 *****
600.	3 ***
700.	9 *****
800.	5 *****
900.	2 **
1000.	1 *
1100.	2 **

Fig. 185 Histograma do Módulo de Elasticidade Transversal

1	15	7
3	16	23
7	17	22/69
12	18	01445
15	19	788
16	20	5
(2)	21	00
15	22	25
13	23	0024679
6	24	0456
2	25	5
1	26	7

Fig. 186 Diagrama "ramo e folhas" - Módulo de Elasticidade Longitudinal

1	2	3
1	3	
7	4	022579
12	5	22345
(6)	6	005567
15	7	0123369
8	8	22358
3	9	6
2	10	56

Fig. 187 Diagrama "ramo e folhas" - Módulo de Elasticidade Transversal

5.5.1.2.3. Espécie - Eucalipto Tereticornis

MIDDLE OF INTERVAL	NUMBER OF OBSERVATIONS
8000.	1 *
8500.	2 **
9000.	1 *
9500.	3 ***
10000.	5 ****
10500.	4 ****
11000.	0
11500.	3 ***
12000.	2 **
12500.	6 *****
13000.	5 *****
13500.	0
14000.	1 *

Fig. 188 Histograma do Módulo de Elasticidade Longitudinal

MIDDLE OF INTERVAL	NUMBER OF OBSERVATIONS
200.	1 *
240.	3 ***
280.	9 *****
320.	7 *****
360.	2 **
400.	8 *****
440.	0
480.	0
520.	3 ***

Fig. 189 Histograma do Módulo de Elasticidade Transversal

1	7.8
2	6* 3
3	8.6
5	9* 04
9	9.7789
13	10* 0022
16	10.567
(2)	11* 33
15	11.69
13	12* 1224
9	12.5567
4	13* 012
1	1.9

Fig 190 Diagrama "ramo e folhas" - Módulo de Elasticidade Longitudinal

3	2* 144
13	2.5557777899
(8)	3* 22233334
12	2.58889
7	4* 0000
3	4.
3	5* 002

Fig. 191 Diagrama "ramo e folhas" - Módulo de Elasticidade Transversal

5.5.1.2.4. Espécie - Peroba do Norte

MIDDLE OF INTERVAL	NUMBER OF OBSERVATIONS
11000.	2 **
12000.	0
13000.	1 *
14000.	1 *
15000.	0
16000.	2 **

Fig. 192 Histograma do Módulo de Elasticidade Longitudinal

MIDDLE OF INTERVAL	NUMBER OF OBSERVATIONS
450.	1 *
500.	0
550.	3 ***
600.	0
650.	0
700.	1 *
750.	1 *

Fig. 193 Histograma do Módulo de Elasticidade Transversal

2	10	56
2	11	
3	12	9
3	13	9
2	14	
2	15	8
1	16	0

Fig. 194 Diagrama "ramo e folhas" - Módulo de Elasticidade Longitudinal

1	4*	3
1	4.	
(3)	5*	333
2	5.	
2	6*	
2	6.	9
1	7*	4

Fig. 195 Diagrama "ramo e folhas" - Módulo de Elasticidade Transversal

5.5.1.2.5. Espécie - Gonçalves Alves

MIDDLE OF INTERVAL	NUMBER OF OBSERVATIONS	
11000.	1	*
11500.	1	*
12000.	0	
12500.	0	
13000.	0	
13500.	0	
14000.	2	**
14500.	1	*
15000.	1	*

Fig. 196 Histograma do Módulo de Elasticidade Longitudinal

MIDDLE OF INTERVAL	NUMBER OF OBSERVATIONS	
240.	1	*
280.	0	
320.	1	*
360.	1	*
400.	1	*
440.	1	*
480.	1	*

Fig. 197 Histograma do Módulo de Elasticidade Transversal

2	11	15
2	12	
(2)	13	89
2	14	49

Fig. 198 Diagrama "ramo e folhas" - Módulo de Elasticidade Longitudinal

1	2*	3
1	2.	
2	3*	2
(2)	3.	53
2	4*	+
1	4.	8

Fig. 199 Diagrama "ramo e folhas" - Módulo de Elasticidade Transversal

Analisando-se os histogramas e diagramas "ramo e folhas", por espécies, nota-se que eles apresentam um aspecto mais homogêneo que aqueles referentes a todas espécies em estudo, revelando-se tendência a distribuição normal, e possível tendência a distribuição log-normal para G. O estudo da distribuição de E será visto no cálculo 11, e o estudo relativo a distribuição G não se constitui objetivo deste trabalho.

Um outro aspecto a ser apresentado refere-se à aleatorização das amostras das espécies: Peroba Rosa, Eucalipto Tereticornis e Jatobá, e à amostragem de apenas um lote de madeira, (item 3.2.2.) das espécies: Peroba do Norte e Gonçalo Alves. As implicações desta amostragem podem recair nos ajustes da função estimada das regressões lineares nos diversos estudos deste trabalho.

6. ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS PARÂMETROS DE ELASTICIDADE

$E_{21,2f}$ e $E_{21,1f}$

6.1. Objetivos

Com os resultados experimentais obtidos através dos ensaios de flexão estática, segundo os esquemas B e C, e apresentados no item 3.5.2. do capítulo 3, foi feito um estudo comparativo entre os parâmetros de elasticidade $E_{21,2f}$ e $E_{21,1f}$.

Simultaneamente, pretende-se mostrar a possibilidade de serem obtidos resultados tão confiáveis e representativos de um ensaio de flexão pura, segundo esquema B (item 3.4.2) quanto os de um ensaio de flexão simples, segundo esquema C (item 3.4.3.). Uma vez comprovada a equivalência estatística entre os módulos de elasticidade longitudinais $E_{21,2f}$ e $E_{21,1f}$, opta-se pela realização do ensaio mais simples.

Outro aspecto importante é a possibilidade de aplicação da equação da flecha:

$$a = \frac{F\ell^3}{48EI} \quad (6.1)$$

na qual o valor de E será $E_{21,1f}$, no lugar da equação completa da flecha:

$$a = \frac{F\ell^3}{48EI} + \frac{3F\ell}{10GA} \quad (6.2)$$

A equação (6.2), para ser aplicada, presuppõe o conhecimento de G , parâmetro de difícil determinação, conforme visto no capítulo 5.

6.2. Descrição dos conceitos estatísticos utilizados

Para verificar a veracidade da equivalência entre $E_{21,2f}$ e $E_{21,1f}$, foram feitos dois testes estatísticos (testes de hipótese e significância), com o comando TWOSAMPLE, da subrotina MINITAB.

6.2.1. Descrição do comando TWOSAMPLE

Sendo μ_1 a média da primeira amostra e μ_2 a média da segunda amostra, este comando executa dois testes. O primeiro permite verificar se as amostras pertencem a um mesmo universo, através do seguinte teste de hipótese:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 \quad \text{versus} \quad H_1 : \mu_1 \neq \mu_2,$$

calculando-se a significância através da expressão:

$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \leq t_{\phi}(P\%) \quad (6.3)$$

onde: \bar{x}_1 = estimativa da média da primeira amostra

\bar{x}_2 = estimativa da média da segunda amostra

S_1 = desvio padrão da primeira amostra

S_2 = desvio padrão da segunda amostra

n_1 = nº de elementos da primeira amostra

n_2 = nº de elementos da segunda amostra

$t_{\phi}(P\%)$ = valor de 't' student' com P% de confiança

(P%) = 95%, indica o nível de confiança adotado

O segundo teste permite verificar se as médias das amostras, são estatisticamente equivalentes, isto é, indica se o intervalo da média das diferenças ($\mu_2 - \mu_1$) contém o zero. Tal intervalo é dado por:

$$\Delta_- = (\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - t^* \sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}} < \mu_2 - \mu_1 < (\bar{x}_1 + \bar{x}_2) + t^* \sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}} = \Delta_+ \quad (6.4)$$

na qual t^* é o valor correspondente para 95% de confiança e os graus de liberdade dado pela expressão:

$$df = \frac{\left[(S_1^2/n_1) + (S_2^2/n_2) \right]^2}{\left[\frac{(S_1^2/n_1)^2}{(n_1 - 1)} + \frac{(S_2^2/n_2)^2}{(n_2 - 1)} \right]} \quad (6.5)$$

Pode-se representar graficamente este segundo teste, através da figura 6.1.

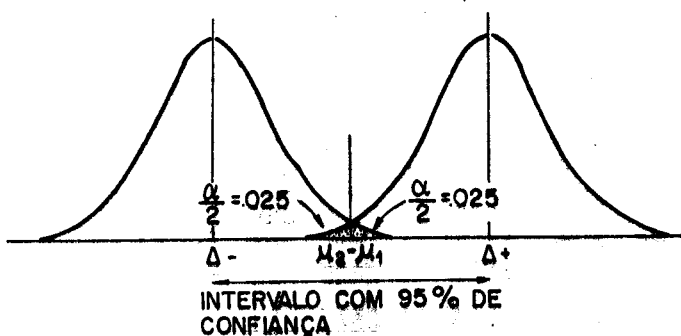


Fig. 200 Gráfico indicando o Intervalo de confiança com 95% de probabilidade

6.3. Análise dos resultados obtidos

Os resultados analisados se referem às espécies Jatobã (33 CP), Peroba do Norte (6 CP), Peroba Rosa (60 CP), e Gonçalo Alves (6CP), e estão apresentados nos quadros XIV, XVI, XIX, XXII do item 3.5.2, do capítulo 3.

6.3.1. Análise dos resultados

6.3.1.1. Espécie - JATOBÁ

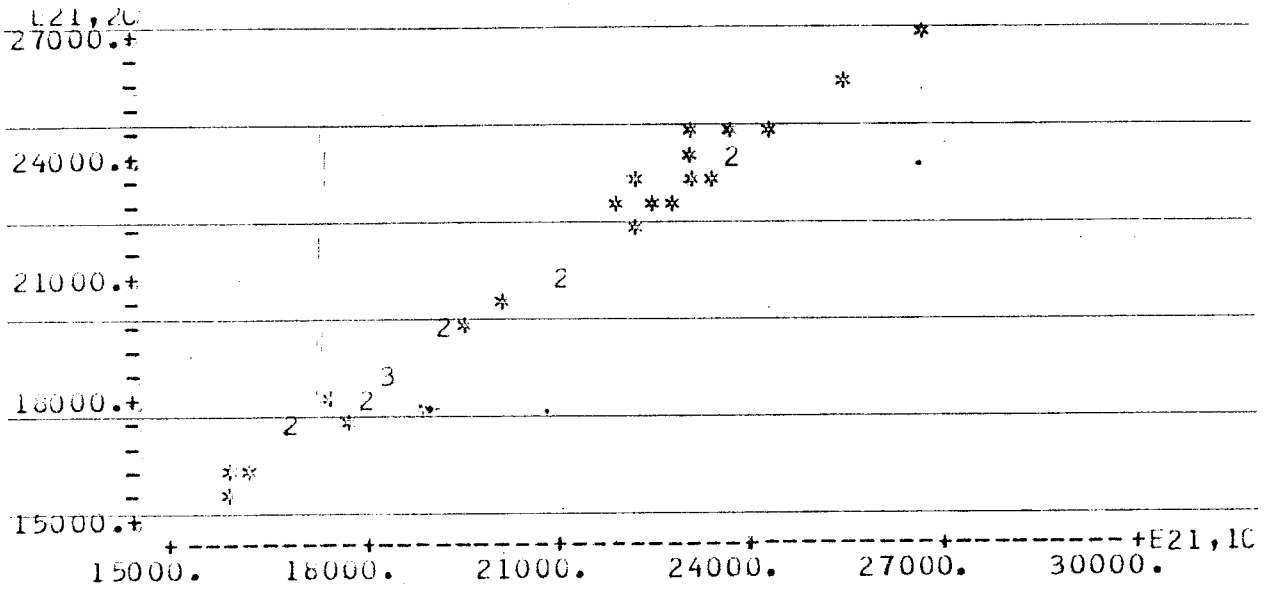


Fig. 201 Gráfico de Valores $E_{21,2f}$ e $E_{21,1f}$

QUADRO LI Resultado do Teste de TWOSAMPLE

TWOSAMPLE	T	C1	C2	MEAN =	ST.DEV. =
E21,2C	N = 33			20951.	3095.
E21,1C	N = 33			20595.	3020.

APPROX. DEGREES OF FREEDOM = 63

A 95.00 PERCENT C.I. FOR $\mu_1 - \mu_2$ IS (-1148.0193, 1861.0505)

TEST OF $\mu_1 = \mu_2$ VS. μ_1 N.E. μ_2
 $T = 0.474$
 THE TEST IS SIGNIFICANT AT 0.6374
 CANNOT REJECT AT ALPHA = 0.05

6.3.1.2. Espécie - PEROBA DO NORTE

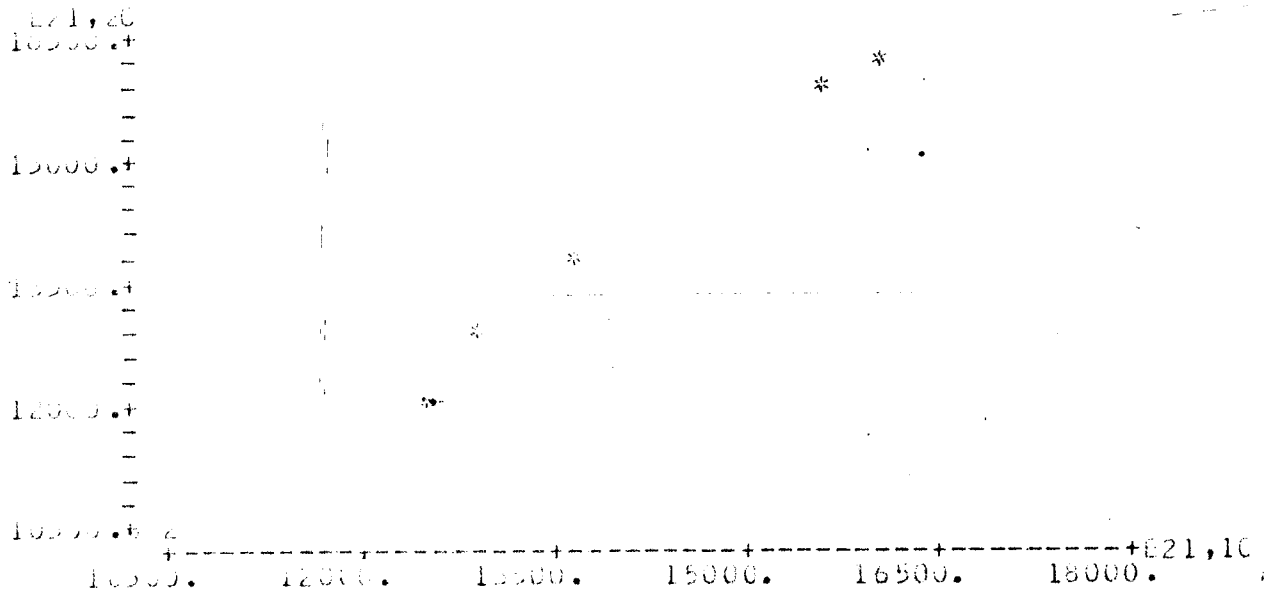


Fig. 202 Gráfico de Valores $E_{21,2f}$ e $E_{21,1f}$

QUADRO LII Resultados do Teste de TWOSAMPLE

```

TWO SAMPLE T TEST
E21,2C      N = 6      MEAN = 13317.      ST.DEV. = 2406.
E21,1C      N = 6      MEAN = 13214.      ST.DEV. = 2372.
APPROX. DEGREES OF FREEDOM = 9
A 95.00 PERCENT C.I. FOR MU1-MU2 IS (-3018.1455, 3224.4814)
TEST OF MU1 = MU2 VS. MU1 N.E. MU2
T = 0.075
THE TEST IS SIGNIFICANT AT 0.9420
CANNOT REJECT AT ALPHA = 0.05
    
```

6.3.1.3. Espécie - PEROBA ROSA

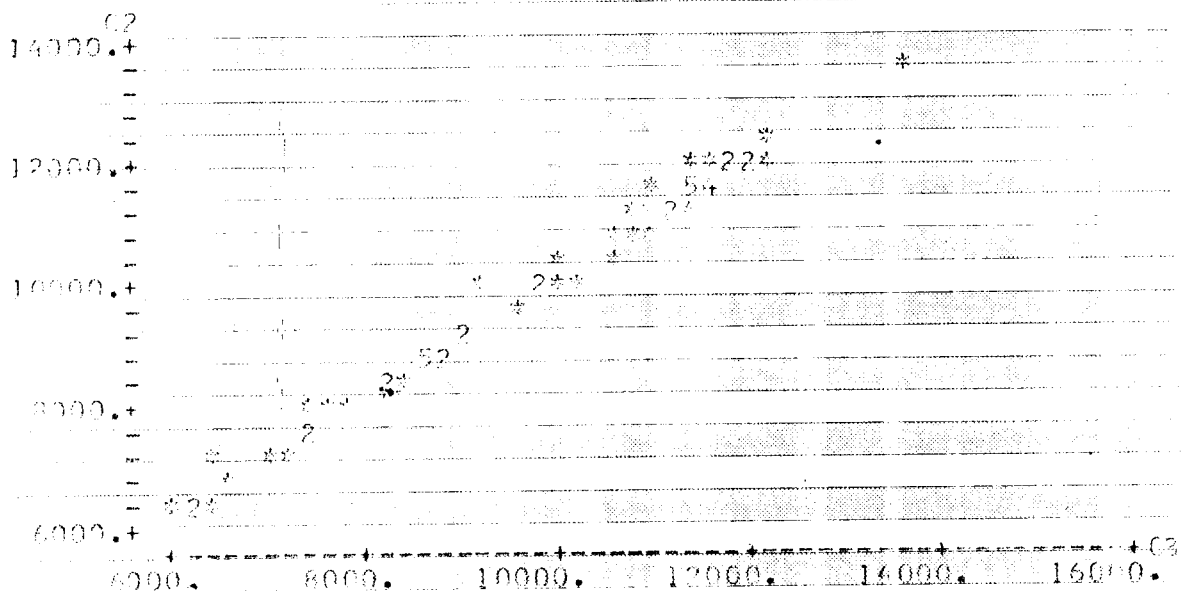


Fig.203 Gráfico de Valores $E_{21,2f}$ e $E_{21,1f}$

QUADRO LIII Resultados do Teste de TWOSAMPLE

```

TWOSAMPLE T C2 C3
E          N = 60   MEAN =    9903.7   ST.DEV. =    1880.
E21       N = 60   MEAN =    9712.4   ST.DEV. =    1934.

APPROX. DEGREES OF FREEDOM = 117
A 95.00 PERCENT C.I. FOR MU1-MU2 IS ( -498.4163,  881.0491)

TEST OF MU1 = MU2 VS. MU1 N.E. MU2
T = 0.549
THE TEST IS SIGNIFICANT AT 0.5837
CANNOT REJECT AT ALPHA = 0.05
    
```

6.3.1.4. Espécie - GONÇALO ALVES

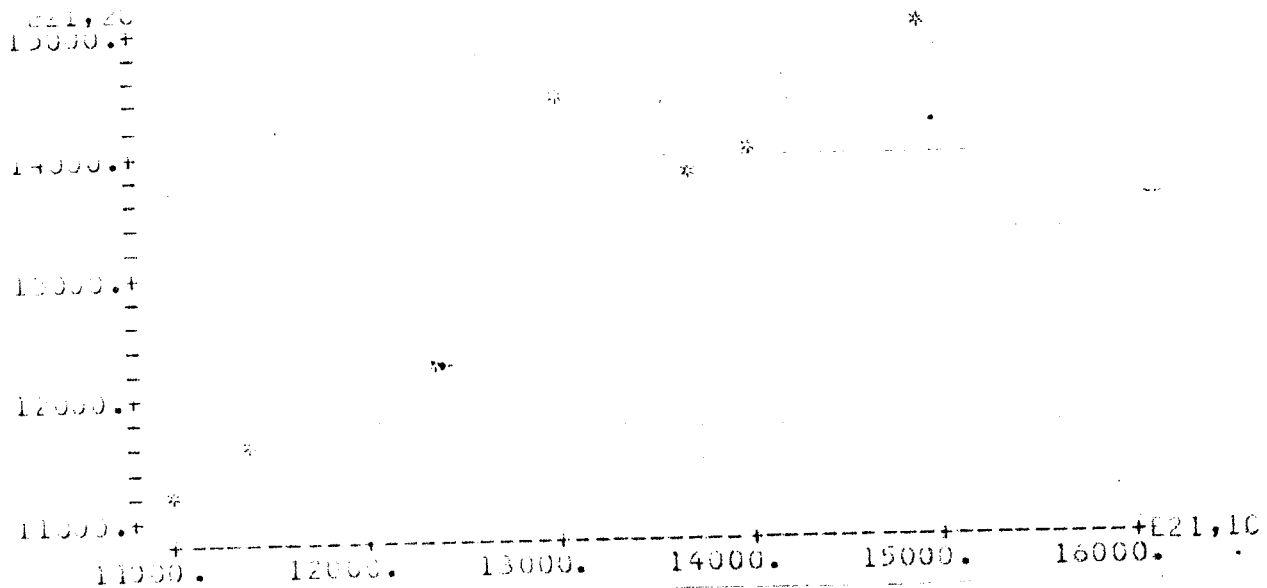


Fig.204 Gráfico de Valores $E_{21,2f}$ e $E_{21,1f}$

QUADRO LIV Resultado do Teste de TWOSAMPLE

TWOSAMPLE T CI C2
 $E_{21,2f}$ N = 8 MEAN = 13325. ST.DEV. = 1559.
 $E_{21,1f}$ N = 8 MEAN = 12996. ST.DEV. = 1521.
 APPROX. DEGREES OF FREEDOM = 9
 A 95.00 PERCENT C.I. FOR $\mu_1 - \mu_2$ IS (-1683.4609, 2341.4609)
 TEST OF $\mu_1 = \mu_2$ VS. $\mu_1 \neq \mu_2$
 T = 0.578
 THE TEST IS SIGNIFICANT AT 0.7200
 CANNOT REJECT AT ALPHA = 0.05

6.3.2. Resumo da análise da estatística de $E_{21,2f}$ e $E_{21,1f}$

QUADRO LV Resumo da Análise Estatística

Espécie	Nº CP	Teste t	Nível de significância α
Peroba Rosa	60	$t=0,549 < t_{05}=2,000$	$\alpha = 0,5837 >> 0,05$
Jatobã	33	$t=0,474 < t_{05}=2,030$	$\alpha = 0,6374 >> 0,05$
Peroba do Norte	6	$t=0,075 < t_{05}=2,571$	$\alpha = 0,9420 >> 0,05$
Gonçalo Alves	6	$t=0,370 < t_{05}=2,571$	$\alpha = 0,7200 >> 0,05$

6.4. Conclusão

Em decorrência da análise estatística apresentada nos itens 6.3.1. a 6.3.2., conclui-se pela equivalência estatística entre os parâmetros de elasticidade $E_{21,1f}$ e $E_{21,2f}$.

Com relação ao estudo da aplicação da expressão simplificada da flecha (6.1) no lugar da expressão completa (6.2), optou-se por apresentar suas conclusões paralelamente as do capítulo seguinte.

7. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE ℓ/d E DA CARGA CONCENTRADA NO MÓDULO DE ELASTICIDADE LONGITUDINAL DA MADEIRA

7.1. Objetivos

Com o intuito de verificar a influência da razão ℓ/d e das perturbações existentes nas proximidades do ponto de aplicação de uma carga concentrada (F) num ensaio de flexão estática, que possam acarretar alterações no valor do módulo de elasticidade longitudinal, fêz-se uma análise teórica e experimental.

7.2. Considerações teóricas

7.2.1. Cálculo da parcela das deformações normais na flecha total de uma viga simplesmente apoiada submetida a carga concentrada

Este cálculo é apresentado no item 2.1.3.1. do capítulo 2. Por simplificação, será repetida a equação (2.36), com a seguinte simbologia:

$$a_m = \frac{F\ell^3}{48IE} \quad (7.1)$$

sendo: a_m = parcela da flecha total devida às deformações normais medida em $\ell/2$
F = carga concentrada
 ℓ = vão
I = momento de inércia
E = módulo de elasticidade longitudinal

A figura (7.1) mostra a representação do esquema estático associado ao estudo em questão.

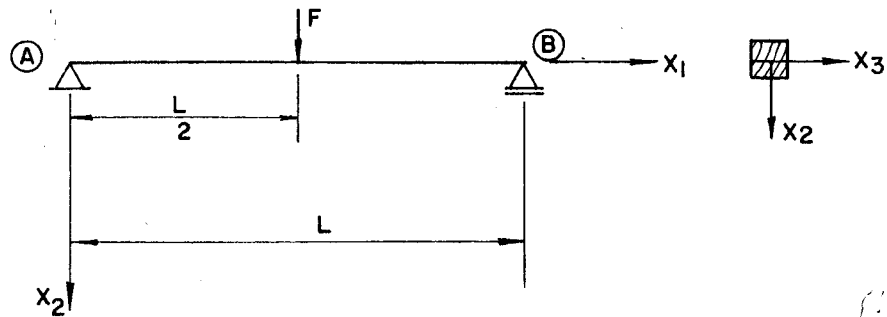


Fig. 205 Esquema Estático de uma Viga com Carga Central F

7.2.2. Cálculo da parcela das deformações tangenciais na flecha total

Este cálculo também é apresentado no item 2.1.3.1. do capítulo 2. Portanto, tem-se a equação (2.41) com a seguinte simbologia:

$$a_v = \frac{3 F \ell}{10 GA} \quad (7.2)$$

sendo: a_v = parcela da flecha total devida às deformações tangenciais medida em $\ell/2$

G = módulo de elasticidade longitudinal

A = área da seção transversal

7.2.3. Expressão da flecha total

A expressão da flecha total (a) referente a uma viga simplesmente apoiada com carga concentrada no meio do vão é:

$$a = a_m + a_v \quad (7.3)$$

Substituindo-se as expressões (7.1) e (7.2) na expressão (7.3), obtém-se:

$$a = \frac{F \ell^3}{48IE} + \frac{3 F \ell}{10 GA} \quad (7.4)$$

Utilizando-se a expressão:

$$i^2 = \frac{I}{A} \quad (7.5)$$

onde i é o raio de giração da seção e fazendo-se passagens algébricas na expressão (7.4), obtém-se:

$$a = \frac{Fl^3}{48IE} \left[1 + 1,2 \left(\frac{E}{G} \right) \left(\frac{d}{l} \right)^2 \right] \quad (7.6)$$

e, finalmente, tem-se:

$$\frac{a}{a_m} = 1 + \left[1,2 \left(\frac{E}{G} \right) \left(\frac{d}{l} \right)^2 \right] \quad (7.7)$$

Esta expressão relaciona a flecha total com a flecha devida às deformações normais, válida para um material isotrópico e homogêneo TIMOSHENKO (1972).

7.3. Considerações experimentais com aplicação da expressão da flecha total

Com os resultados experimentais obtidos de $E_{21,2f}$, $E_{21,1f}$, $E_{14,1f}$ e G , calcularam-se as médias destes parâmetros e montou-se o quadro:

QUADRO LVI Valores Médios dos Módulos de Elasticidade Longit. e Transv.

PARÂMETROS	JATOBÃ	PEROBA ROSA	PEROBA DO NORTE	EUCALIPTO TERET.	G.A.
$\bar{E}_{21,2f}$	20951	9904	13317	11133	13326
$\bar{E}_{21,1f}$	20595	9712	13214	-	12996
$\bar{E}_{14,1f}$	18456	8661	12140	9743	11642
\bar{G}	665	365	580	339	375

A seguir montou-se outro quadro, com as relações entre as médias: $\frac{\bar{E}_{21,2f}}{\bar{G}}$, $\frac{\bar{E}_{21,1f}}{\bar{G}}$ e $\frac{\bar{E}_{14,1f}}{\bar{G}}$

QUADRO LVII. Valores da Divisão das Médias dos Módulos de Elasticidade

RELAÇÃO	JATOBÁ	PEROBA ROSA	PEROBA DO NORTE	EUCALIPTO TERET.	G.A.
$\frac{\bar{E}_{21,2f}}{\bar{G}}$	31,51	27,14	22,98	32,84	35,56
$\frac{\bar{E}_{21,1f}}{\bar{G}}$	30,97	26,62	22,79	-	34,68
$\frac{\bar{E}_{14,1f}}{\bar{G}}$	27,75	23,74	20,94	28,74	31,07

Aplica-se então, a expressão (7.7) do item (7.2), obtendo-se os valores apresentados no QUADRO LVIII:

QUADRO LVIII Valores do QUADRO LVII aplicados na expressão (7.7)

VALORES DA RAZÃO	JATOBÁ	PEROBA ROSA	PEROBA DO NORTE	EUCALIPTO TERET.	G.A.
$a_{21,2f/a_m}$	1,08574	1,07385	1,06253	1,08936	1,09679
$a_{21,1f/a_m}$	1,08427	1,07244	1,06201	-	1,09437
$a_{14,1f/a_m}$	1,16990	1,14535	1,12820	1,17596	1,19022

7.4. Conclusões

Diante dos resultados mostrados no QUADRO LVIII, os valores dos parâmetros $E_{21,2f}$ e $E_{21,1f}$ revelam-se equivalentes (como já demonstrado no capítulo 6).

Alguns tópicos apresentados no item 2.1.3.1. do capítulo 2 podem ser retomados para evidenciar tal conclusão:

. a carga concentrada F pode ser admitida como

distribuída num pequeno trecho do corpo de prova; com isto na curvatura da viga haverá um efeito localizado e a parcela da flecha devida às deformações tangenciais será menor que a obtida pela expressão (7.2);

. as seções transversais vizinhas à carga F resistem a uma força cortante $F/2$ e, pelo fato de se admitir continuidade de deformação na vizinhança do ponto de aplicação de F , tais seções não se encurvarão livremente; haverá impedimentos e estes resultaram em alterações na elástica da viga (corpo de prova) e, conseqüentemente, no valor da flecha final (expressão 7.6);

. a distribuição de tensões na vizinhança do ponto de aplicação da carga F poderá ser diferente da indicada pela Teoria Clássica da flexão; esta constatação vai de encontro às observações de HOOLEY e HIBBERT (1967);

. a compressão normal, em particular devido a estrutura anatômica da madeira, tem influência na elástica da viga, no trecho de aplicação da carga;

. a aplicação da expressão simplificada da flecha no lugar da expressão completa para o dimensionamento de peças fletidas de madeira, é válida se utilizado o parâmetro de elasticidade $E_{21,1f}$. Não obstante, se utilizado valores de E para razões $l/d < 21$, é aconselhável o uso da expressão completa da flecha.

Outro aspecto a ser observado se refere a possibilidade de se determinar $E_{21,2f}$ ou $E_{21,1f}$, através de uma expressão do tipo:

$$E_{21,1f} \text{ (ou } E_{21,2f}) = \alpha + \beta E_{14,1f} \quad (7.8)$$

sendo α e β constantes.

Isto permite a manutenção do emprego de tabelas de propriedades físicas e mecânicas, de uso já consagrado. As correções necessárias poderão ser feitas sem quaisquer dificuldades.

Para algumas espécies de madeira, de uso estrutural, já ensaiadas, $1,10 < \beta < 1,20$.

Neste trabalho foi determinada uma expressão deste tipo, utilizando-se dos resultados obtidos para $E_{21,2f}$ e para $E_{14,1f}$.

A seguir é apresentada a análise estatística dos resultados.

TÍTULO: RELAÇÃO ENTRE $E_{21,2f} \times E_{14,1f}$

ESPÉCIE: TODAS UTILIZADAS NESTE TRABALHO

QUADRO LIX RESUMO DA ANÁLISE DE REGRESSÃO

ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO	OBSERVAÇÕES
MODELO	$y = a_0 + a_1 x_1$	Equação obtida pelo ajuste e pela teoria dos mínimos quadrados.
EQUAÇÃO (7.9)	$E_{21,1f} = 371,0 + 1,11 E_{14,1f}$	
COEF. DE CORRELAÇÃO LINEAR	$R^2 = 96,3\%$	Possui excelente grau de correlação linear.
TESTE "F"	$F(1,70) = 4447,71$ nível de significância $\alpha < 0,1\%$	Regressão altamente significativa.
TESTE "t" (valor para variável)	$x_1: t = 66,69$ nível de significância $\alpha < 0,05\%$	A variável x_1 está altamente correlacionada com y .
GRÁFICO DA EQUAÇÃO (7.9)	Fig.206 $E_{21,1f}$ vs $E_{14,1f}$	Não revela tendência, modelo satisfatório. Não revela anomalia, modelo satisfatório. Pode-se considerar distribuição normal de resíduos.
ANÁLISE DE RESÍDUOS	Fig.207 Resíduos vs Valores Preditos.	
	Fig.208 Resíduos vs Variável x_1 .	
	Fig.209 Gráfico Probabilístico. ($R^2 = 95\%$)	

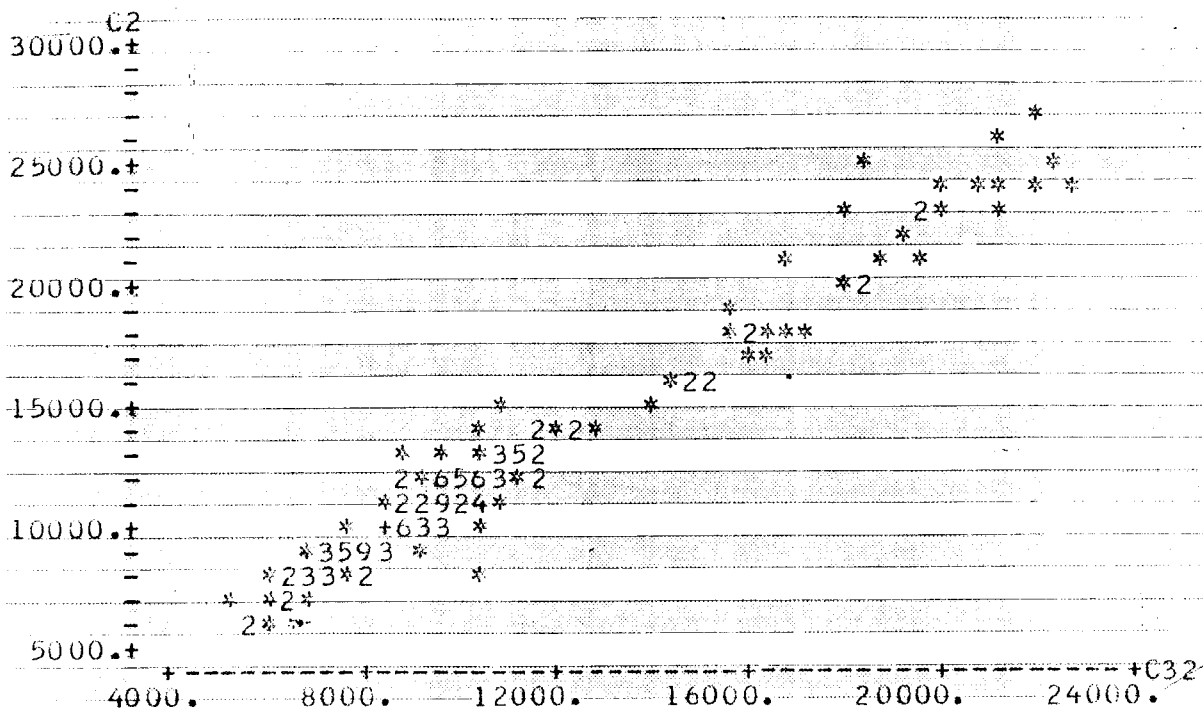


Fig. 206 $E_{21,1f}$ vs $E_{14,1f}$

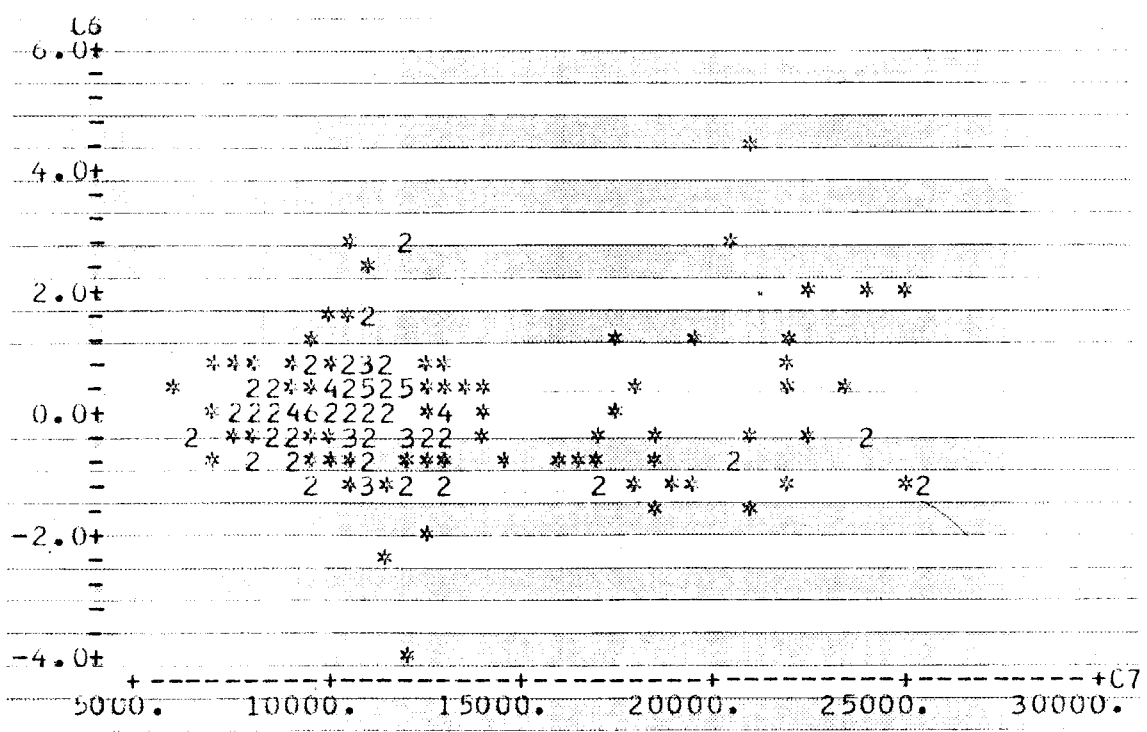
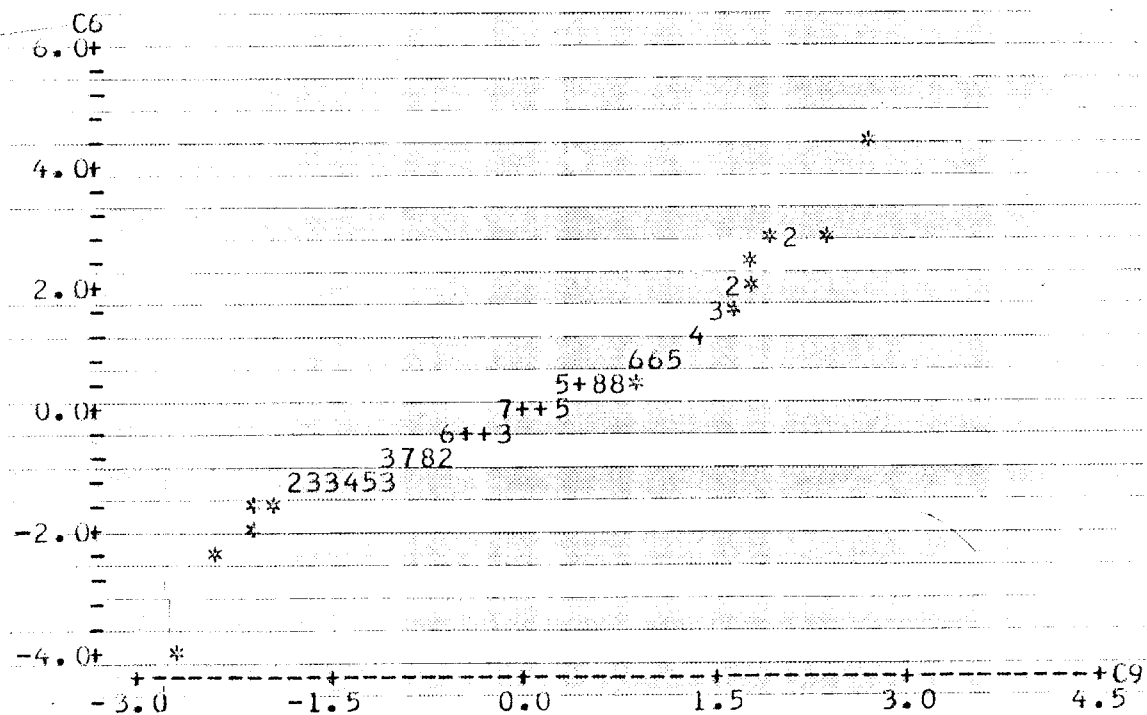
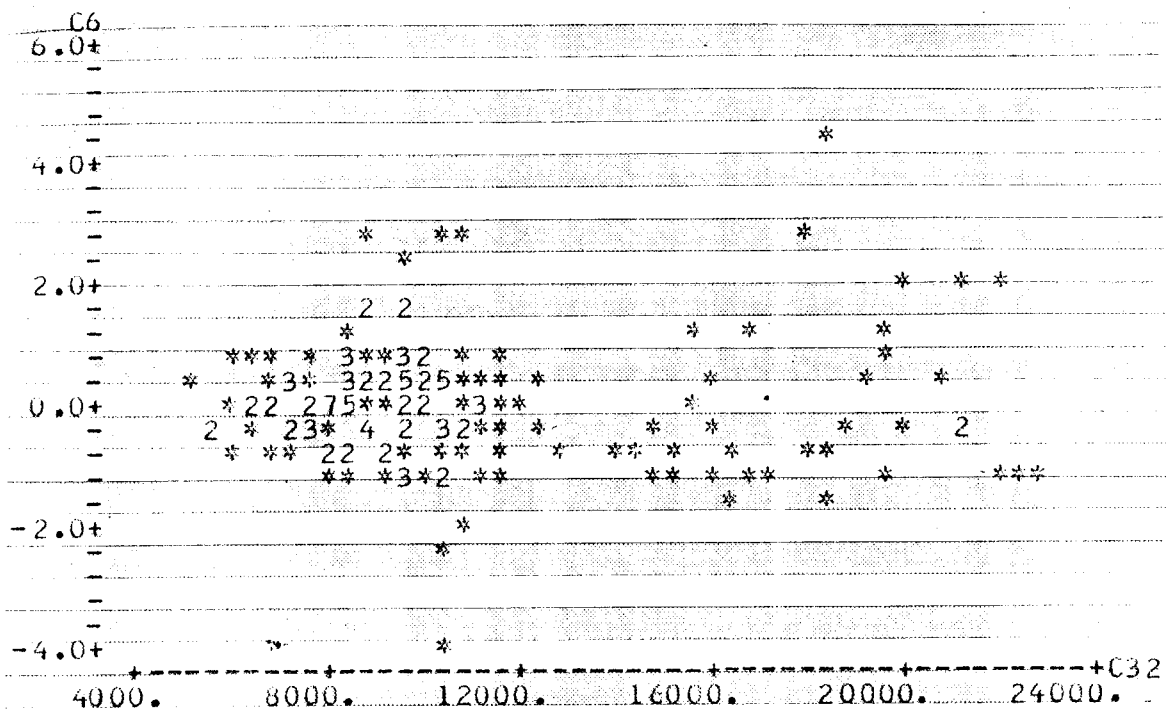


Fig. 207 Resíduos vs Valores Preditos



8. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA RAZÃO l/d NO MÓDULO DE RUPTURA À FLEXÃO ESTÁTICA

8.1. Objetivos

Com o interesse de avaliar a influência da razão l/d no valor do Módulo de Ruptura à Flexão (MRF), foram realizados ensaios em corpos de prova de madeira, variando-se l/d , de acordo com os esquemas de ensaios utilizados neste trabalho, ou seja:

- Esquema de Ensaio A: $l/d = 12$
- Esquema de Ensaio C: $l/d = 21$
- Esquema de Ensaio D: $l/d = 14$

A primeira destas razões é adotada pela NBR 6230, item 10, para obtenção do Módulo de Ruptura à Flexão ($MRF_{12,1f}$), e representado, neste trabalho, pelo esquema A. A segunda razão é também utilizada pela NBR 6230, item 11, no ensaio de Flexão Estática - Módulo de Elasticidade Longitudinal, equivalente ao esquema C. Por fim, a terceira razão usada está baseada na hipótese de que a partir de $l/d > 21$ (ver item 2.2.1.2.) MRF é praticamente constante. Outro aspecto importância da adoção de $l/d = 21$, recai na possibilidade de se obter um esquema de ensaio único para flexão estática, haja vista a equivalência entre os módulos de elasticidade longitudinais $E_{21,2f}$ e $E_{21,1f}$.

8.2 Etapas do estudo da influência de l/d em MRF

Para efetuar as diversas comparações entre os valores de MRF em função das razões l/d adotadas, este estudo foi desenvolvido em três etapas:

1^a etapa: Estudo Comparativo entre $MRF_{14,1f}$ e $MRF_{12,1f}$

2^a etapa: Estudo Comparativo entre $MRF_{21,1f}$ e $MRF_{14,1f}$

3^a etapa: Estudo Comparativo entre $MRF_{21,1f}$, $MRF_{14,1f}$ e

$MRF_{12,1f}$.

8.2.1. Estudo comparativo entre $MRF_{14,1f}$ x $MRF_{12,1f}$

Foram realizados ensaios de flexão segundo o esquema D e o esquema A, para a obtenção dos parâmetros $MRF_{14,1f}$ e $MRF_{12,1f}$.

Corpos de prova de quatro espécies foram ensaiados: Peroba Rosa (100 CP), Jatobá (66 CP), Peroba do Norte (12 CP), Gonçalo Alves (12 CP), sendo metade do número de CP para o esquema A e a outra metade para o esquema D.

Para melhor comparação entre os resultados experimentais, os CPs de dimensões $2 \times 2 \times 30 \text{ cm}^3$ foram retirados das partes dos CPs $5 \times 5 \times 120 \text{ cm}^3$ não danificadas após o ensaio esquema D.

Para se analisar a hipótese de equivalência entre os parâmetros, foram utilizados os mesmos testes do estudo comparativo dos módulos de elasticidade $E_{21,2f}$ e $E_{21,1f}$, ou seja, a aplicação do teste TWOSAMPLE, da subrotina MINITAB.

8.2.1.1. Apresentação e análise dos resultados

8.2.1.1.1. Espécie: PEROBA ROSA

Foram utilizados os seguintes quadros:

- QUADRO XI: $MRF_{12,1f}$

- QUADRO XX: $MRF_{14,1f}$

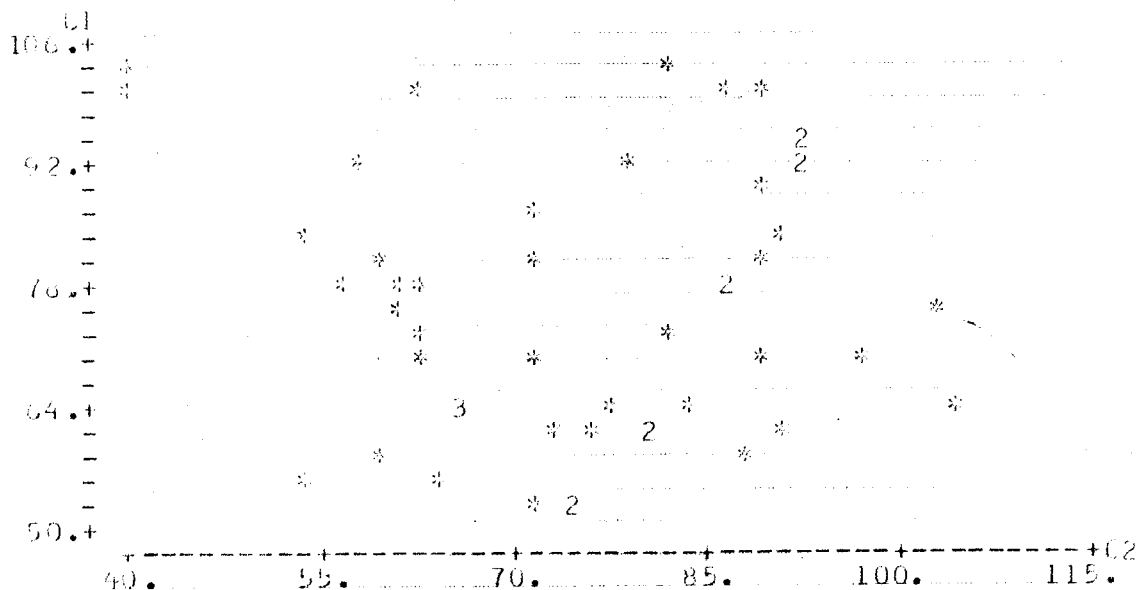


Fig. 210 Gráfico de Valores $MRF_{14,1f}$ e $MRF_{12,1f}$

QUADRO LX Resultado do Teste de TWOSAMPLE

TWO SAMPLE T	C1	C2	MEAN =	ST.DEV. =
C1	N = 50		75.760	15.2
C2	N = 50		75.300	15.3

APPROX. DEGREES OF FREEDOM = 97

A 95.00 PERCENT C.I. FOR $\mu_1 - \mu_2$ IS (-5.5969, 6.5169)

TEST OF $\mu_1 = \mu_2$ VS. μ_1 N.E. μ_2
 $t = 0.151$
 THE TEST IS SIGNIFICANT AT 0.8805
 CANNOT REJECT AT ALPHA = 0.05

8.2.1.1.2. Espécie: JATOBÁ

Foram utilizados os seguintes quadros:

- QUADRO VII: MRF_{12,1f}
- QUADRO XIV: MRF_{14,1f}

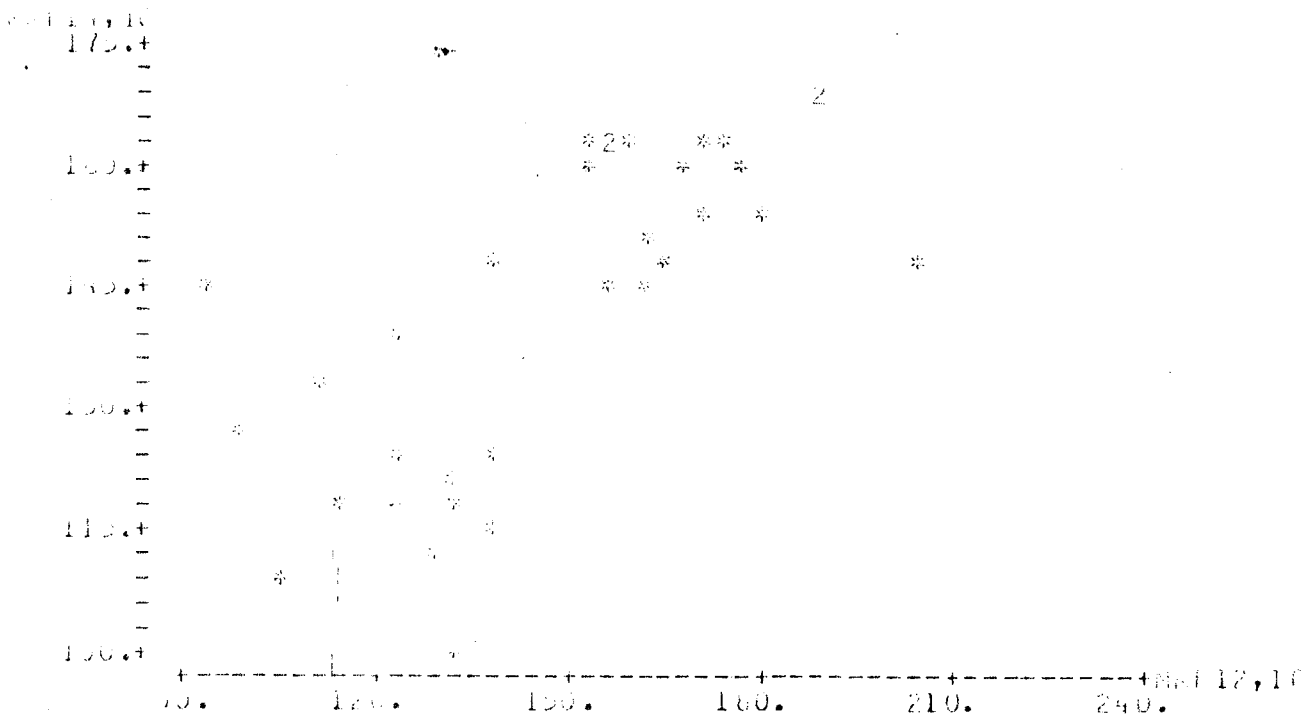


Fig. 211 Gráfico de Valores MRF_{14,1f} e MRF_{12,1f}

QUADRO LXI Resultado do Teste TWOSAMPLE

TWO SAMPLE T	C1	C2	MEAN =	ST.DEV. =
MRF _{14,1f}	N = 55		142.42	20.0
MRF _{12,1f}	N = 55		147.64	27.9

APPROX. DEGREES OF FREEDOM = 58

A 95.00 PERCENT C.I. FOR $\mu_1 - \mu_2$ IS (-17.1775, 6.7554)

TEST OF $\mu_1 = \mu_2$ VS. μ_1 N.E. μ_2
 $t = -0.872$
 THE TEST IS SIGNIFICANT AT 0.3867
 CANNOT REJECT AT ALPHA = 0.05

8.2.1.1.3. Espécie: PEROBA DO NORTE

Foram utilizados os seguintes quadros:

- QUADRO IX: MRF_{12,1f}
- QUADRO XVI: MRF_{14,1f}

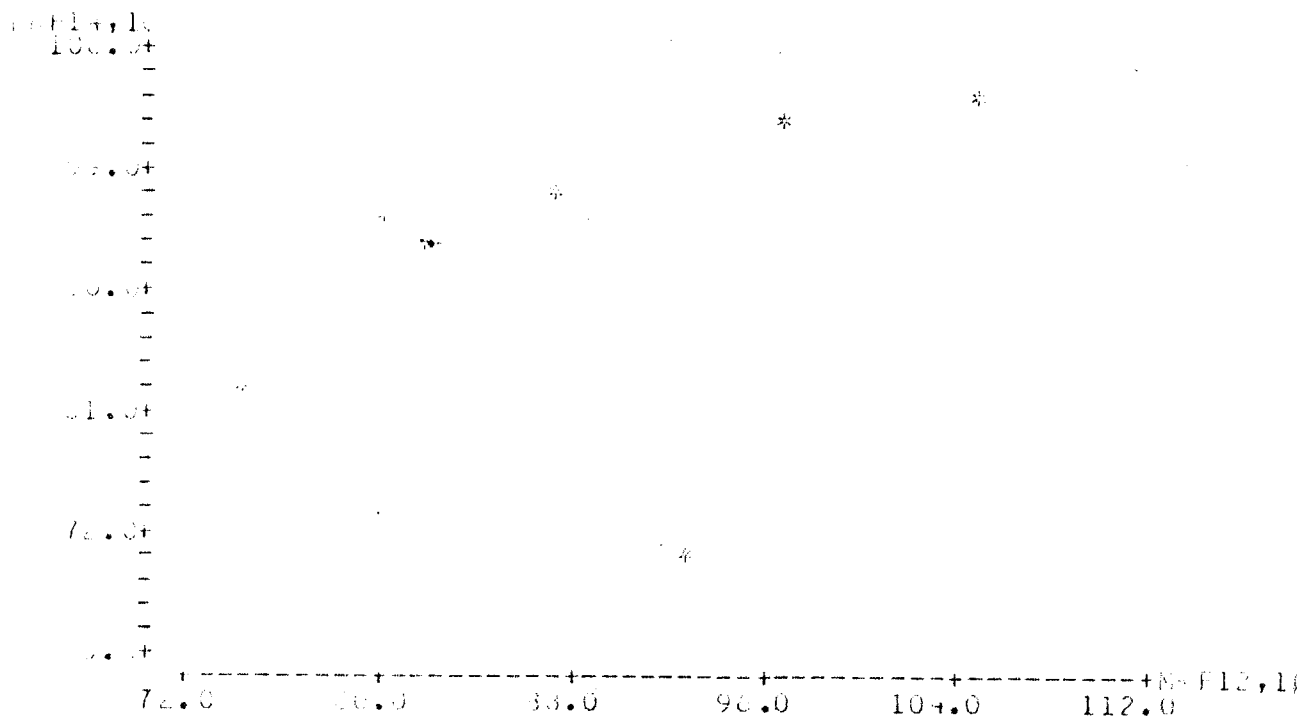


Fig. 212 Gráfico de Valores MRF_{14,1f} e MRF_{12,1f}

QUADRO LXII Resultado do Teste TWOSAMPLE

TWOSAMPLE T (CI 92)
 MRF14,1f N = 10 MEAN = 92.167 ST.DEV. = 12.1
 MRF12,1f N = 10 MEAN = 89.333 ST.DEV. = 11.4
 APPROX. DEGREES OF FREEDOM = 9
 APPROX. PERCENT C.I. FOR MU1-MU2 IS (-13.1677, 18.8343)
 TEST OF MU1 = MU2 VS. MU1 N.E. MU2
 T = 0.701
 ONE TAIL SIG. SIGNIFICANT AT 0.6980
 CANNOT REJECT AT ALPHA = 0.05

8.2.1.1.4. Espécie: GONÇALO ALVES

Foram utilizados os seguintes quadros:

- QUADRO XIII: MRF_{12,1f}
- QUADRO XXII: MRF_{14,1f}

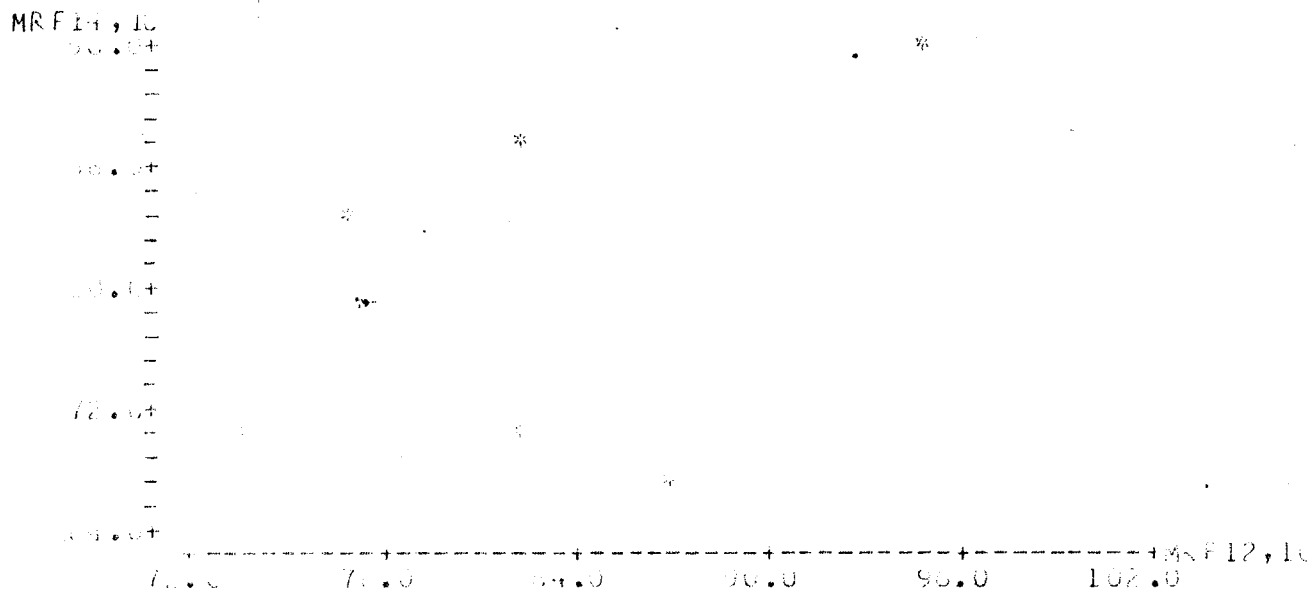


Fig. 213 Gráfico de Valores MRF_{14,1f} e MRF_{12,1f}

QUADRO LXIII Resultado do Teste de TWOSAMPLE

```

TWOSAMPLE T-TEST
MRF14,10  N = 8      MEAN =      79.500      ST.DEV. =      11.00
MRF12,10  N = 8      MEAN =      82.633      ST.DEV. =      7.77
APPROX. DEGREES OF FREEDOM =      8
A 95.00 PERCENT C.I. FOR MU1-MU2 IS ( -18.5190,      9.1524)
TEST OF MU1 = 102 VS. MU1 N.L. MU2
T = -7.000
THE TEST IS SIGNIFICANT AT 0.5759
CRITICAL TEST AT ALPHA = 0.05

```

8.2.1.2. Conclusão do item 8.2.1.

Pelos resultados desta análise estatística, há evidências da equivalência entre os parâmetros : MRF_{14,1f} e MRF_{12,1f}.

8.2.2. Estudo comparativo entre $MRF_{21,1f}$ e $MRF_{14,1f}$

Este estudo se desenvolveu numa etapa posterior ao estudo entre $MRF_{14,1f}$ e $MRF_{12,1f}$, com o objetivo de apresentar uma proposta simplificada ao ensaio de flexão.

Foram retirados CPs para o esquema de ensaio C e D, aos pares, isto é, de peças escolhidas aleatoriamente, retiraram-se 2n CPs. Com isto, conseguiu-se representatividade e aleatorização na comparação entre os parâmetros. Com as amostras de Peroba Rosa (36 CP), Jatobá (12 CP) e Peroba do Norte (12 CP), distribuídos em dois grupos, o primeiro para ensaio-esquema C (obtenção de $MRF_{21,1f}$) e o segundo para ensaio-esquema D (obtenção de $MRF_{14,1f}$) foram realizados os ensaios e posteriormente a análise estatística dos resultados.

Os testes estatísticos são os mesmos utilizados nos itens anteriores deste capítulo.

8.2.2.1. Apresentação e análise dos resultados

8.2.2.1.1. Espécie: PEROBA ROSA

Utilizou-se o QUADRO XXI, para análise dos resultados.

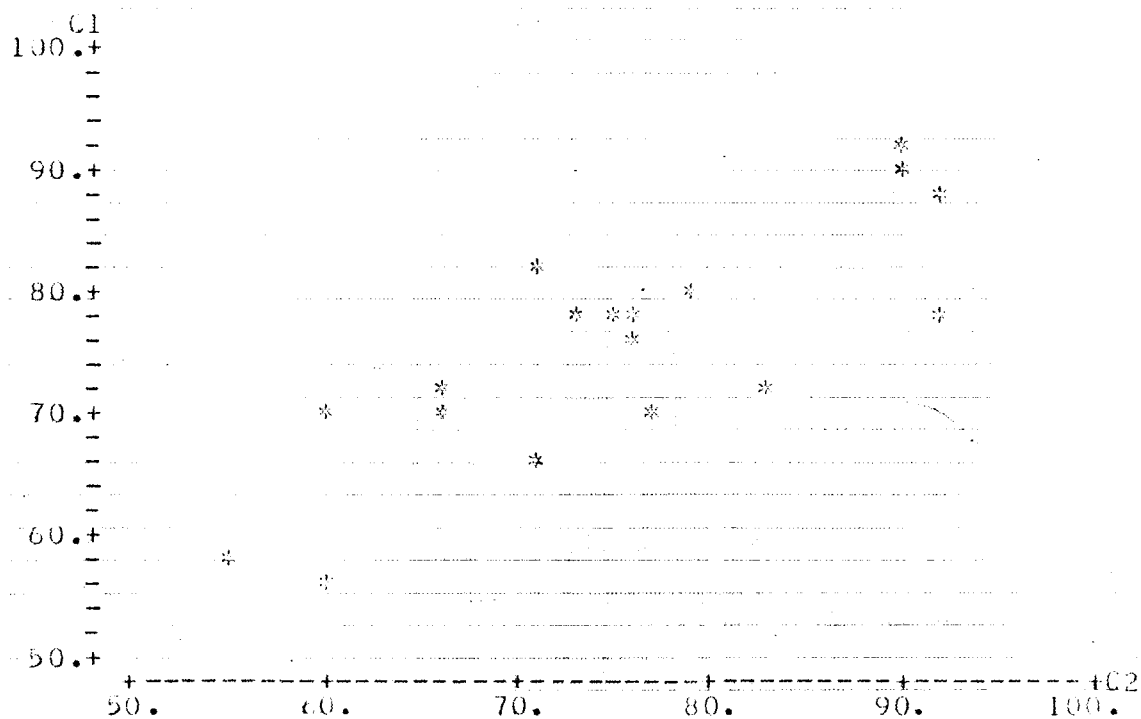


Fig. 214 Gráfico de Valores $MRF_{14,1f}$ e $MRF_{12,1f}$

QUADRO LXIV Resultado do Teste de TWOSAMPLE

```

TWOSAMPLE T C1 C2
C1 N = 18 MEAN = 74.833 ST.DEV. = 9.85
C2 N = 18 MEAN = 75.111 ST.DEV. = 11.3
APPROX. DEGREES OF FREEDOM = 33
A 95.00 PERCENT C.I. FOR MU1-MU2 IS ( -7.4606, 6.9050)
TEST OF MU1 = MU2 VS. MU1 N.E. MU2
T = -0.079
THE TEST IS SIGNIFICANT AT 0.9377
CANNOT REJECT AT ALPHA = 0.05
    
```

8.2.2.1.2. Espécie: JATOBÁ

Utilizou-se o QUADRO XV , para análise dos resultados.

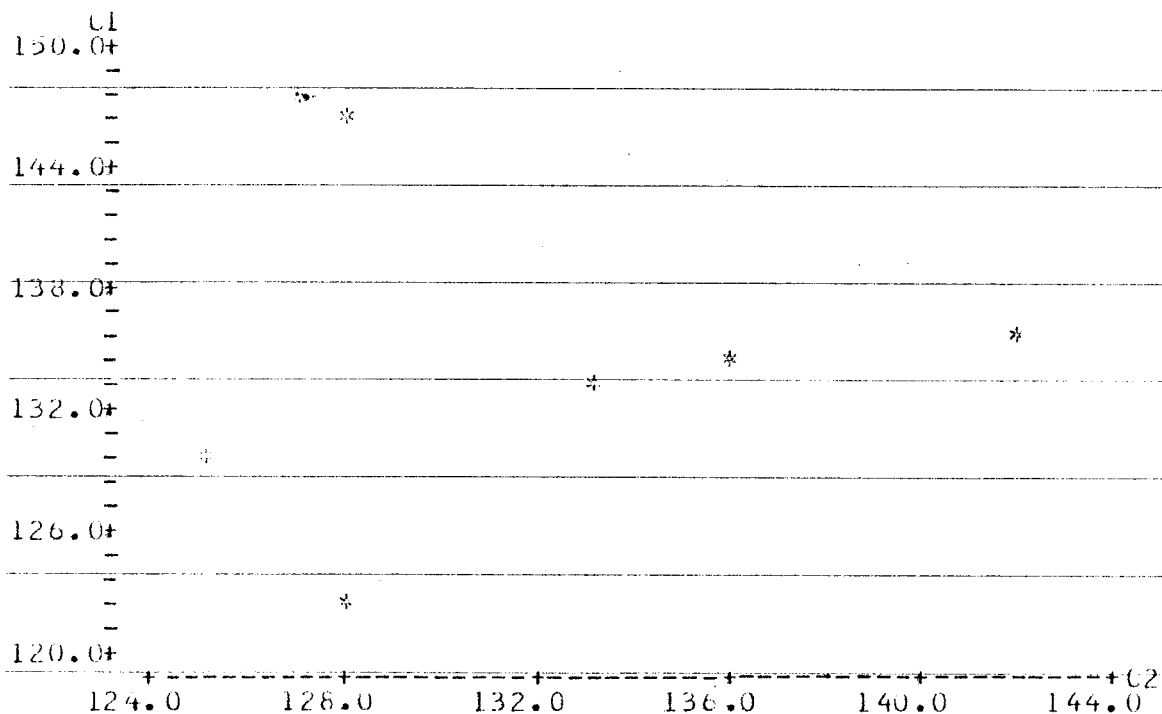


Fig.215 Gráfico de Valores MRF_{14,1f} e MRF_{12,1f}

QUADRO LXV Resultado do Teste de TWOSAMPLE

```

TWOSAMPLE T C1 C2
C1 N = 6 MEAN = 133.33 ST.DEV. = 7.94
C2 N = 6 MEAN = 132.00 ST.DEV. = 6.29
APPROX. DEGREES OF FREEDOM = 9
A 95.00 PERCENT C.I. FOR MU1-MU2 IS ( -8.0267, 10.6934)
TEST OF MU1 = MU2 VS. MU1 N.E. MU2
T = 0.322
THE TEST IS SIGNIFICANT AT 0.7546
CANNOT REJECT AT ALPHA = 0.05
    
```

8.2.2.1.3. Espécie: PEROBA DO NORTE

Utilizou-se o QUADRO XVII, para análise dos resultados.

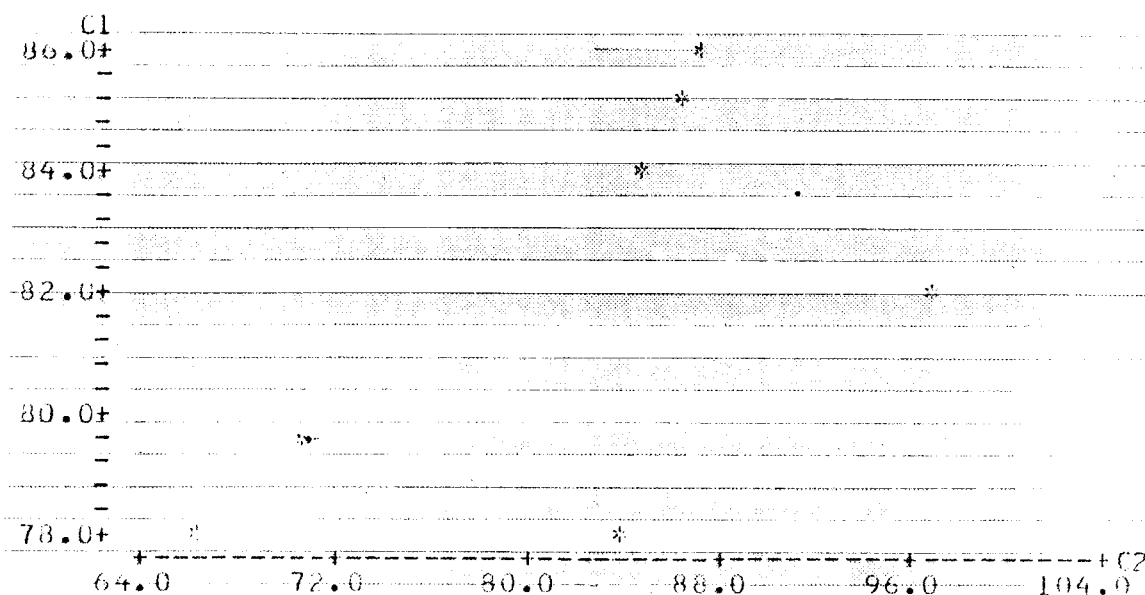


Fig. 216 Gráfico dos Valores MRF_{14,1f} e MRF_{12,1f}

QUADRO LXVI Resultado do Teste de TWOSAMPLE

TWOSAMPLE T		C1	C2	
C1	N =	6	MEAN = 82.167	ST.DEV. = 3.49
C2	N =	6	MEAN = 84.167	ST.DEV. = 10.1
APPROX. DEGREES OF FREEDOM = 6				
A 95.00 PERCENT C.I. FOR MU1-MU2 IS (-12.6469, 8.6469)				
TEST OF MU1 = MU2 VS. MU1 ≠ MU2				
T = -0.460				
THE TEST IS SIGNIFICANT AT 0.6619				
CANNOT REJECT AT ALPHA = 0.05				

8.2.2.2. Conclusão do item 8.2.2.

Pelos resultados desta análise estatística, há evidências da equivalência entre os parâmetros MRF_{14,1f} e MRF_{21,1f}

8.2.3. Estudo comparativo entre $MRF_{21,1f}$, $MRF_{14,1f}$ e $MRF_{12,1f}$

A preocupação em estudar a relação entre estes parâmetros está vinculada ao fato de se poder quantificar a validade das estimativas das médias destes parâmetros rejeitarem ou não a hipótese nula, ou seja, média de $MRF_{21,1f} (\bar{x}_c)$, de $MRF_{14,1f} (\bar{x}_d)$ e $MRF_{12,1f} (\bar{x}_a)$ serem equivalentes ($\bar{x}_c = \bar{x}_d = \bar{x}_a$).

O fato de já se ter feito o estudo comparativo dos parâmetros, dois a dois, não é suficiente para aceitar, ou não $\bar{x}_c = \bar{x}_d = \bar{x}_a$.

Optou-se por fazer um estudo onde cada espécie ensaiada representasse um BLOCO, pelo fato de se adotar um número mínimo de CP igual a 6 e cada parâmetro, função l/d , ou seja um TRATAMENTO, designado por COMPRIMENTO ou TAMANHO. Com isto, outras perturbações como densidade, inclinação de fibras, temperatura, foram englobadas no estimador BLOCOS.

Fêz-se, então, uma análise de regressão com BLOCOS, TRATAMENTOS e RESULTADOS.

Foram ensaiados corpos de prova de Jatobá (6 CP), Peroba do Norte (6 CP).

8.2.3.1. Apresentação e análise dos resultados

8.2.3.1.1. Espécie: PEROBA DO NORTE

Utilizou-se o QUADRO X ($MRF_{12,1f}$) e o QUADRO XVII ($MRF_{14,1f}$ e $MRF_{21,1f}$) para análise dos resultados.

8.2.3.1.2. Espécie: JATOBÁ

Utilizou-se o QUADRO VIII ($MRF_{12,1f}$) e o QUADRO XV ($MRF_{14,1f}$ e $MRF_{21,1f}$) para análise dos resultados.

OBSERVAÇÃO: Os quadros de análise de variância destas espécies são apresentados nas páginas a seguir.

QUADRO LXVII RESUMO DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA ESPECIFICAÇÃO: Comparação entre MRF _{21,1f} , MRF _{14,1f} , e MRF _{12,1f} para PEROBA DO NORTE						
MODELO: $Y_{ti} = \mu + \beta_i + \tau_t + \varepsilon_{ti}$ com: $\varepsilon_{ti} \sim N(0, \sigma^2)$, β_i - efeito de blocos; τ_t - efeito de tratamentos						
TESTES DAS HIPÓTESES: (i) $\beta_i = 0$ (ii) $\tau_t = 0$						
EFEITO DE VARIÂÇÃO	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRO MÉDIO	RAZÃO DOS QUADRADOS MÉDIOS	TESTES DAS HIPÓTESES (5%)	OBSERVAÇÕES
ENTRE BLOCOS	$S_B = 307,33$	$\nu_B = 5$	$s_B^2 = 61,47$	$s_B^2/s_R^2 = 1,082$	$F_{(5,10)} = 3,33$	A hipótese $\beta_i = 0$ é aceita
ENTRE TRATAMENTOS	$S_T = 13,00$	$\nu_T = 2$	$s_T^2 = 6,50$	$s_T^2/s_R^2 = 0,114$	$F_{(2,10)} = 4,10$	A hipótese $\tau_t = 0$ é aceita
RESÍDUOS	$S_R = 567,66$	$\nu_R = 10$	$s_R^2 = 56,77$			

QUADRO LXVIII - RESUMO DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA
 ESPECIFICAÇÃO: Comparação entre MRF_{21,1f}, MRF_{14,1f} e MRF_{12,1f} para JATOBÁ

MODELO: $Y_{tj} = \mu + \beta_j + \tau_t + \epsilon_{tj}$
 como: $\epsilon_{tj} \sim N(0, \sigma^2)$; β_j - efeito de blocos; τ_t - efeito de tratamentos

TESTES DAS HIPÓTESES: (i) $\beta_j = 0$ (ii) $\tau_t = 0$

EFEITO DE VARIÂÇÃO	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO MEDIO	RAZÃO DOS QUADRADOS MEDIOS	TESTES DAS HIPÓTESES (5%)	OBSERVAÇÕES
ENTRE BLOCOS	$S_B = 358,44$	$\nu_B = 5$	$s_B^2 = 71,69$	$s_B^2/s_R^2 = 0,762$	$F(5,10) = 3,33$	A hipótese $\beta_j = 0$ é aceita
ENTRE TRATAMENTOS	$S_T = 8,78$	$\nu_T = 2$	$s_T^2 = 4,39$	$s_T^2/s_R^2 = 0,04$	$F(2,10) = 4,10$	A hipótese $\tau_t = 0$ é aceita
RESÍDUOS	$S_R = 939,88$	$\nu_R = 10$	$s_R^2 = 93,98$			

8.2.3.2. Conclusão do item 8.2.3.

Da análise de regressão, verifica-se a hipótese das médias \bar{x}_d , \bar{x}_c e \bar{x}_a serem equivalentes. Assim o efeito "tratamentos" não influi no resultado de MRF, podendo-se adotar o parâmetro $MRF_{21,1f}$, para estimar a resistência. Outro fato importante é a não rejeição da hipótese $\beta_1 = 0$ (efeito dos BLOCOS no modelo de regressão linear) evidenciando-se a aleatorização da amostra.

8.2.4. Estudo complementar das relações $MRF_{12,1f}$,

$MRF_{14,1f}$ e $MRF_{21,1f}$

Para uma verificação complementar da hipótese nula, foram realizados 18 ensaios com corpos de prova de Peroba Rosa de uma amostra aleatorizada.

Desta maneira, não houve a necessidade da inclusão do efeito "BLOCOS" de regressão linear.

Para testar a hipótese $\bar{x}_d = \bar{x}_c = \bar{x}_a$, foram utilizados os testes ONEWAY (TRATAMENTOS) e TOWAY (BLOCOS E TRATAMENTOS) da subrotina MINITAB. Foi aplicado o primeiro teste para a Peroba Rosa (18 CP), para a Peroba do Norte (6 CP) e para o Jatobá (6 CP) aplicou-se o segundo teste.

8.2.4.1. Descrição do comando ONEWAY

- ONEWAY

Este comando testa a hipótese das médias serem iguais (hipótese nula), por análise de variância. É utilizado para verificar a influência de "tratamento" (τ_t) na média da população (μ).

A análise estatística é feita através do modelo:

$$Y_{ti} = \mu + \tau_t + \epsilon_{ti} \quad (8.1)$$

com: Y_{ti} = valor da i -ésima observação sobre o tratamento t , e com os $\epsilon_{ti} \sim N(0, \sigma^2)$, isto é, os "erros" seguem uma distribuição normal com média 0 (zero) e variância σ^2 .

8.2.4.2. Descrição do comando TWOWAY

- TWOWAY

Este comando testa a hipótese nula, por análise de variância, verificando a influência dos "tratamentos" (τ_t) e de "blocos" (β_i) na média da população (μ).

A análise estatística é feita através do modelo:

$$Y_{ti} = \mu + \beta_i + \tau_t + \epsilon_{ti} \quad (8.2)$$

com: Y_{ti} = valor da observação sob o t-ésimo tratamento no bloco i.

8.2.4.3. Apresentação e análise dos resultados

8.2.4.3.1. Espécie: PEROBA ROSA

Utilizou-se o QUADRO XII ($MRF_{12,1f}$) e o QUADRO XXI ($MRF_{14,1f}$ e $MRF_{21,1f}$) para análise dos resultados.

QUADRO LXIX Resultados do Teste ONEWAY

```

-- ONEWAY ADV ON DATA IN C1,SUBSCRIPTS IN C2
ANALYSIS OF VARIANCE

```

DUE TO FACTOR	DF	SS	MS=SS/DF	F-RATIO
ERROR	51	7030.	138.	0.06
TOTAL	53	7048.		

LEVEL	N	MEAN	ST. DEV.
1	18	75.1	11.0
2	18	75.1	10.2
3	18	73.9	13.7

POOLED ST. DEV. = 11.7

```

INDIVIDUAL 95 PERCENT C. I. FOR LEVEL MEANS
(BASED ON POOLED STANDARD DEVIATION)

```

LEVEL	Lower Bound	Upper Bound
1	66.0	83.0
2	66.0	83.0
3	66.0	83.0

A seguir é apresentado o resumo dos resultados.

QUADRO LXX - RESUMO DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA ESPECIFICAÇÃO: Comparação entre MRF _{21,1f} , MRF _{14,1f} e MRF _{12,1f} para PEROBA ROSA						
MODELO: $Y_{ti} = \mu + \tau_t + \epsilon_{ti}$ com: $\epsilon_{ti} \sim N(0, \sigma^2)$, τ_t = efeito de tratamentos						
TESTES DAS HIPÓTESES: (i) $\tau_t = 0$						
EFEITO DE VARIÂÇÃO	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	RAZÃO DOS QUADRADOS MÉDIOS	TESTES DAS HIPÓTESES (5%)	OBSERVAÇÃO
ENTRE TRATAMENTOS	$S_T = 17,0$	$\nu_T = 2$	$s_T^2 = 9,0$	$s_T^2/s_R^2 = 0,06$	$F(2,51) \approx 3,2$	A Hipótese $\tau_t = 0$ é aceita
RESÍDUOS	$S_R = 7030,0$	$\nu_R = 51$	$s_R^2 = 138,0$			

8.2.4.3.2. Espécie: JATOBÁ

No item 8.2.3.1.2. estão indicados os resultados para aplicação do teste.

Observa-se que não é apresentado um resumo de análise de variância para o teste TWOWAY, por resultar num quadro semelhante ao QUADRO LXVIII. Esta observação se estende a Peroba do Norte.

QUADRO LXXI Resultados do Teste TWOWAY

-- TWOWAY ANOVA DATA IN C1, SUBSCRIPTS IN C2 C3

ANALYSIS OF VARIANCE

DUE TO	DF	SS	MS=SS/DF
C2	2	9.3	4.7
C3	5	386.7	77.3
ERROR	10	996.0	99.6
TOTAL	17	1392.0	

OBSERVATIONS

ROWS ARE LEVELS OF C2 COLS ARE LEVELS OF C3

	1	2	3	4	5	6
1	128.00	128.00	125.00	142.00	136.00	133.00
2	140.00	122.00	129.00	136.00	134.00	133.00
3	135.00	138.00	140.00	141.00	106.00	130.00
COL. MEANS	136.33	129.33	131.33	139.67	125.33	132.00

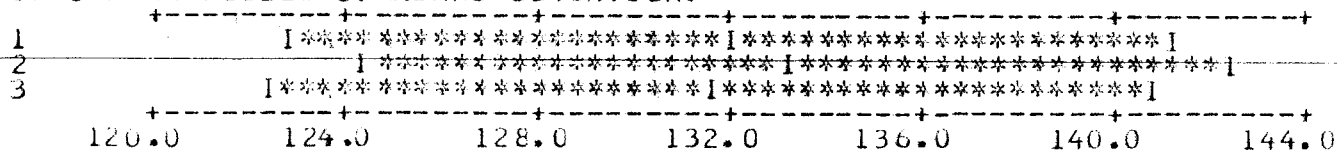
ROW MEANS

1	132.00
2	133.33
3	131.67

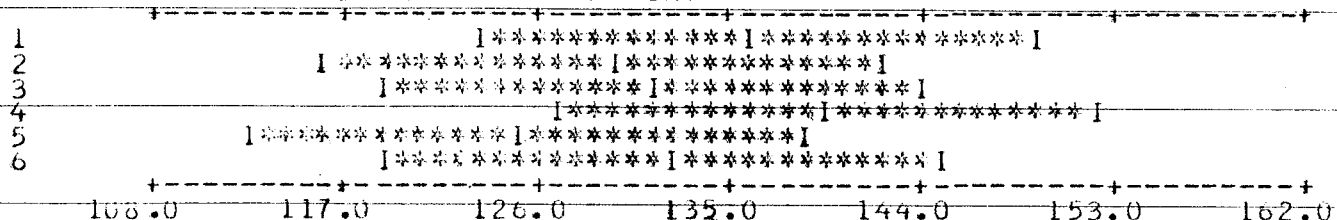
COL. MEANS 132.33

POOLED ST. DEV. = 9.98

INDIVIDUAL 95 PERCENT C. I. FOR LEVEL MEANS OF C2 (BASED ON POOLED STANDARD DEVIATION)



INDIVIDUAL 95 PERCENT C. I. FOR LEVEL MEANS OF C3 (BASED ON POOLED STANDARD DEVIATION)



8.2.4.3.3. Espécie: PEROBA DO NORTE

No item 8.2.3.1.1. estão indicados os resultados para aplicação do teste.

QUADRO LXXII Resultados do Teste TWOWAY

-- TWOWAY ANOVA DATA IN C1, SUBSCRIPTS IN C2 C3

ANALYSIS OF VARIANCE

DUE TO	DF	SS	MS=SS/DF
C2	2	13.8	6.9
C3	5	315.6	63.1
ERROR	10	589.6	59.0
TOTAL	17	918.9	

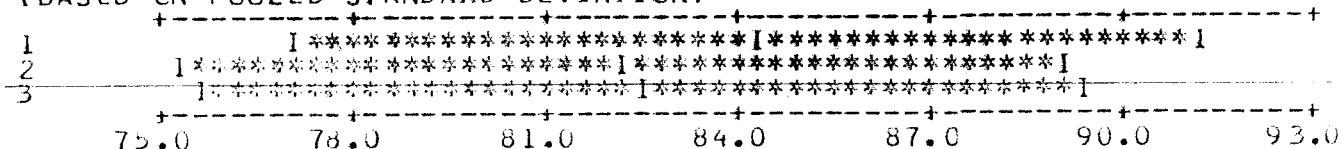
OBSERVATIONS

ROWS ARE LEVELS OF C2 COLS ARE LEVELS OF C3

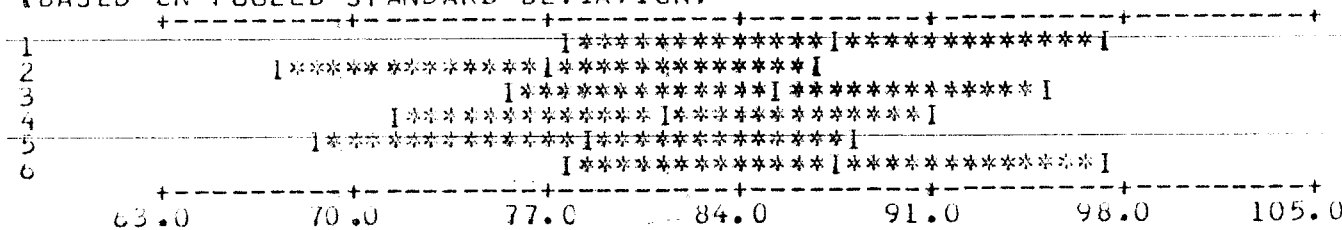
	1	2	3	4	5	6
1	97.00	86.00	87.00	84.00	85.00	86.00
2	82.00	78.00	86.00	78.00	84.00	85.00
3	84.00	87.00	84.00	82.00	67.00	91.00
CUL. MEANS	87.67	77.00	85.67	81.33	78.67	87.33
ROW MEANS						
1	84.17					
2	82.17					
3	82.50					
CUL. MEANS	82.94					

POOLED ST. DEV. = 7.68

INDIVIDUAL 95 PERCENT C. I. FOR LEVEL MEANS OF C2
(BASED ON POOLED STANDARD DEVIATION)



INDIVIDUAL 95 PERCENT C. I. FOR LEVEL MEANS OF C3
(BASED ON POOLED STANDARD DEVIATION)



8.2.4.4. Conclusão do item 8.2.4.

Nota-se, pelos quadros apresentados neste capítulo, que os valores de $MRF_{21,1f}$, $MRF_{14,1f}$ e $MRF_{12,1f}$ são, em média, equivalentes, ou seja, aceita-se que os "tratamentos" (representados pelos esquemas de ensaio) não têm influência significativa nos resultados obtidos. Outro aspecto mostrado é a

dispersão dos resultados, quando se analisa o efeito dos "BLO-COS". Este fato induz a refletir que variáveis como densidade, umidade, inclinação de fibras, podem influenciar na análise, mas no assunto em estudo (equivalência dos módulos de resistência versus tamanho do CP), não apresentam qualquer tipo de influência.

8.4. Conclusões e propostas para normalização do ensaio de flexão estática em peças de madeira

A importância de se propor a realização de ensaios de flexão estática em corpos de prova com razão $l/d = 21$ para a determinação dos parâmetros de ruptura ($MRF_{21,1f}$) e de elasticidade ($E_{21,1f}$), recai no fato de se tornar possível a adoção de um único esquema de ensaio.

Por outro lado, para determinação do parâmetro de elasticidade G há necessidade da utilização de outro esquema de ensaio, o esquema D.

Como o Módulo de Ruptura à Flexão independe da utilização de corpos de prova de $2 \times 2 \times 30 \text{ cm}^3$ ou de $5 \times 5 \times 120 \text{ cm}^3$, e existe a equivalência entre os módulos de elasticidade longitudinais $E_{21,1f}$ e $E_{21,2f}$ (item 6.4.), propõe-se a adoção do esquema C e D para o ensaio de flexão estática.

É também de real importância concluir pela validade e representatividade dos resultados experimentais obtidos com seis corpos de prova de $5 \times 5 \times 120 \text{ cm}^3$, saturados, para a determinação dos parâmetros de ruptura e de elasticidade com vistas a caracterização de um lote de madeira. A NBR 6230 adotada para o ensaio de flexão-qualificação oitenta corpos de prova de $2 \times 2 \times 30 \text{ cm}^3$: quarenta saturados e quarenta secos ao ar e para o ensaio de flexão módulo de elasticidade doze corpos de prova de $6 \times 6 \times 100 \text{ cm}^3$, saturados, com a finalidade de caracterizar uma espécie de madeira, entretanto, não fazendo qualquer adendo a respeito da caracterização de um lote de madeira.

Também deve ser ressaltado o fato de as dimensões $5 \times 5 \times 120 \text{ cm}^3$ representarem bem melhor a madeira que as dimensões $2 \times 2 \times 30 \text{ cm}^3$, pois fatores relativos ao tamanho das peças utilizadas nas construções e as imperfeições dele decorrentes são menos pronunciadas nas peças de $2 \times 2 \times 30 \text{ cm}^3$. Daí se configura a necessidade do estudo experimental de peças de dimensões superiores a $5 \times 5 \times 120 \text{ cm}^3$, à vista do interesse de

se introduzir para a madeira, considerações a respeito da resistência e do módulo de elasticidade característicos e dos respectivos valores de cálculo.

9. ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA EM PEÇAS DE DIMENSÕES ESTRUTURAIS

9.1. Generalidades

É da natureza intrínseca da madeira a existência de imperfeições nas peças utilizadas estruturalmente em construções.

Os resultados de ensaios em pequenos corpos de prova padronizados, isentos de defeitos, obtidos em um laboratório, terão validade se possibilitarem a estimativa do comportamento físico e mecânico dos elementos (peças de dimensões maiores) componentes de uma estrutura.

Neste contexto, tem-se uma diferença efetiva entre a resistência do material utilizado na estrutura e a medida em corpos de prova padronizados.

9.2. Objetivos

Tendo em vista a determinação da variação da resistência à flexão em função das dimensões das peças, foram realizados ensaios em corpos de prova de dimensões $6 \times 16 \times 360 \text{ cm}^3$, da espécie Peroba Rosa. Os resultados obtidos nestes ensaios serviram para comparar a resistência entre os corpos de prova de dimensões $6 \times 16 \times 360 \text{ cm}^3$, com os de dimensões $2 \times 2 \times 30 \text{ cm}^3$ (indicados na NBR 6230) e com os de dimensões $5 \times 5 \times 120 \text{ cm}^3$. Para se obter significativa representação estatística dos resultados, os corpos de prova de $5 \times 5 \times 120 \text{ cm}^3$, foram retirados das regiões íntegras das de dimensões $6 \times 16 \times 360 \text{ cm}^3$, e os corpos de prova de $2 \times 2 \times 30 \text{ cm}^3$, foram da mesma maneira, dos corpos de prova de $5 \times 5 \times 120 \text{ cm}^3$.

Paralelamente, também se constitui objetivo deste capítulo, a análise dos tópicos :

- relações entre parâmetros de ruptura e de elasticidade dos corpos de prova de $6 \times 16 \times 360 \text{ cm}^3$.

- variação dos parâmetros de elasticidade devida à variação do tamanho dos corpos de prova ($6 \times 16 \times 360$, $5 \times 5 \times 120$ e $2 \times 2 \times 30 \text{ cm}^3$).

- comparação entre $E_{21,2f}$ e $E_{21,1f}$ nas peças de $6 \times 16 \times 360 \text{ cm}^3$.

9.3. Esquemas de ensaio utilizados

Os esquemas de ensaio utilizados neste capítulo são descritos no item 3.4.

Com intuito de ilustrar alguns aspectos do ensaio são apresentadas fotografias, estando os corpos de prova nas fases elástica e não-elástica do ensaio.

9.3.1. Figuras ilustrativas

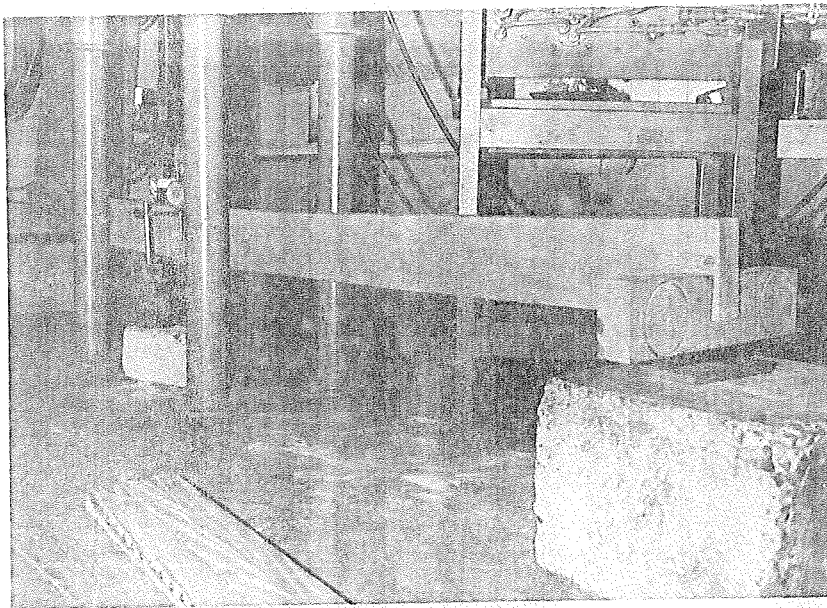


Foto do Ensaio - Fase Elástica

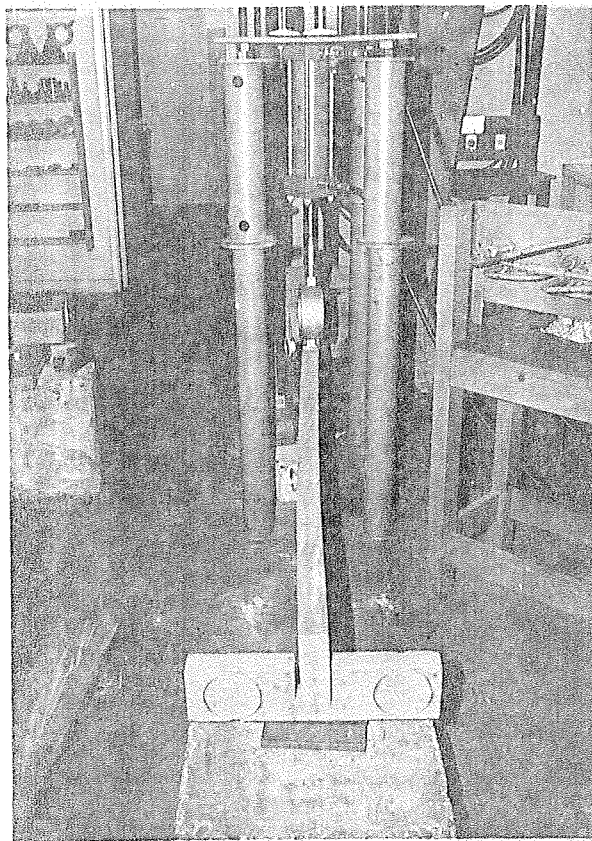


Foto do Ensaio - Fase Não-Elástica

9.4. Estudo sobre a variação da resistência devida ao tamanho das peças

Resultados apresentados por SILVA (1942), sobre ensaio de peças estruturais da espécie Pinho do Paraná, mostraram uma redução de 31% na resistência em relação aos CPs da NBR 6230.

As peças ensaiadas tinham em média as dimensões: (7,62 x 15,24 x 200) cm³, relação l/d utilizada igual a 11,8 e eram em número de seis (6).

A metodologia do ensaio atendeu à ASTM D198.

O QUADRO LXXIII apresenta os resultados experimentais obtidos.

QUADRO LXXIII Flexão Estática - Espécie: Pinho do Paraná

Tipo de CP	Valores da MRF (em MPa)						Média	Desvio Padrão
Corpos de prova de grandes dimensões (saturados)	28,5	50,3	36,3	35,7	45,4	41,7	39,9	7,1
Pequenos corpos de prova (saturados)	69,5	53,0	36,3	66,3	62,5	62,5	58,3	11,1
OBS.	Redução média: 31,5%							

Com a mesma sistemática de ensaio apresentada até agora, procurou-se quantificar, para a espécie Peroba Rosa, através de 6 corpos de prova (número mínimo já estimado anteriormente) a variação de resistência entre as peças estruturais de dimensões 6 x 16 x 360 cm³, e as peças utilizadas no método proposto, de dimensões 5 x 5 x 120 cm³ e as peças de dimensões 2 x 2 x 30 cm³ da NBR 6230.

A estimativa de taxa de variação da resistência foi feita pelos parâmetros:

- MRF_{21,1f} para peça estrutural; $(\frac{l}{d} = 21)$

- MRF_{21,1f} para peça 5x5x120 cm³; $(\frac{l}{d} = 21)$

- MRF_{14,1f} para peça 5x5x120 cm³; $(\frac{l}{d} = 14)$

- MRF_{12,1f} para peça 2x2x30 cm³; $(\frac{l}{d} = 12)$

9.4.1. Apresentação e análise dos resultados obtidos

Os resultados obtidos são apresentados no QUADRO LXXIV.

QUADRO LXXIV VALORES DE MRF (em MPa)

CP	MRF _{21,1f} CP6 x 16	MRF _{21,1f} CP5 x 5	MRF _{12,1f} CP2 x 2
1	55	74	76
2	76	91	90
3	56	72	69
4	64	69	69
5	46	58	58
6	72	77	74

As relações entre os Módulos de Ruptura à Flexão foram:

$$\frac{\text{MRF}_{21,1f} \text{ (CP 5 x 5)}}{\text{MRF}_{21,1f} \text{ (CP 6 x 16)}} = 1,1980$$

$$\frac{\text{MRF}_{12,1f} \text{ CP (2 x 2)}}{\text{MRF}_{21,1f} \text{ CP (6 x 16)}} = 1,1964$$

$$\frac{\text{MRF}_{21,1f} \text{ CP (5 x 5)}}{\text{MRF}_{12,1f} \text{ CP (2 x 2)}} = 1,001$$

A análise estática dos resultados é similar ao item 8.2.3., sendo os corpos de prova designados por BLOCOS e os tamanhos por TRATAMENTOS.

A seguir é apresentado o quadro de análise estatística.

QUADRO LXXV - RESUMO DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA ESPECIFICAÇÃO: Comparação entre os MRF variando o tamanho da peça de madeira							
MODELO: $Y_{tj} = \mu + \beta_j + \tau_t + \epsilon_{tj}$ como: $\epsilon_{tj} \sim N(0, \sigma^2)$; β_j - efeito de blocos; τ_t - efeito de tratamentos							
TESTES DAS HIPÓTESES: (i) $\beta_j = 0$ (ii) $\tau_t = 0$							
EFEITO DE VARIÂÇÃO	SOMA DOS QUADRADOS	GRAU DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	RAZÃO DOS QUADRADOS	TESTE DAS HIPÓTESES (5%)	OBSERVAÇÕES	
ENTRE BLOCOS	$S_B = 1635,75$	$\nu_B = 5$	$s_B^2 = 327,1$	$s_B^2/s_R^2 = 23,26$	$F(5,10) = 3,33$	A hipótese $\beta_j = 0$ não é aceita	
ENTRE TRATAMENTOS	$S_T = 538,80$	$\nu_T = 2$	$s_T^2 = 269,40$	$s_T^2/s_R^2 = 19,16$	$F(2,10) = 4,10$	A hipótese $\tau_t = 0$ não é aceita	
RESÍDUOS	$S_R = 140,55$	$\nu_R = 10$	$s_R^2 = 14,06$				

9.5. Relação entre parâmetros de resistência e de elasticidade nas peças estruturais

Baseada nos estudos anteriores, fêz-se análise de regressão para os resultados obtidos nos ensaios de flexão estática. Optou-se pelo modelo linear de regressão, que apresenta maior justeza entre os resultados e pela sua maior simplicidade.

RELAÇÕES ESTUDADAS

- $MRF_{21,1f} \times E_{21,2f}$

- $MRF_{21,1f} \times E_{21,1f}$

- $MRF_{21,1f} \times E_{14,1f}$

9.5.1. Apresentação e análise dos resultados

Utilizou-se o QUADRO XXIV para relacionar os parâmetros de ruptura e de elasticidade das peças de 6 x 16 x 360 cm³.

São apresentados a seguir os quadros de "RESUMO DA ANÁLISE DE REGRESSÃO".

9.5.1.1. RELAÇÃO ENTRE $MRF_{21,1f} \times E_{21,2f}$

ESPÉCIE: PEROBA ROSA

QUADRO LXXVI RESUMO DA ANÁLISE DE REGRESSÃO

ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO	OBSERVAÇÕES
MODELO	$y = a_0 + a_1 x_1$	Equação obtida pelo ajuste e pela teoria dos mínimos quadrados.
EQUAÇÃO (9.1)	$MRF_{21,1f} = 8,37 + 0,0054 E_{21,1f}$	
COEF. DE CORRELAÇÃO LINEAR	$R^2 = 57,7$	Possui grau de correlação linear aceitável.
TESTE "F"	$F(1,4) = 5,46$ nível de significância α $\alpha = 8,54\%$	Pode-se considerar a regressão significativa.
TESTE "t" (valor para variável)	$x_1: t = 2,34$ nível de significância α $\alpha = 3,53$	A variável x_1 está correlacionada com y .
GRÁFICO DA EQUAÇÃO (9.1)	Fig.217 $MRF_{21,1f}$ vs $E_{21,2f}$	<p>Não revela tendência, modelo satisfatório.</p> <p>Não revela anomalia, modelo satisfatório.</p> <p>Pelo valor $R^2 = 80\%$ aceita-se distribuição normal de resíduos.</p>
ANÁLISE DE RESÍDUOS	Fig.218 Resíduos vs Valores Preditos.	
	Fig.219 Resíduos vs Variável x_1 .	
	Fig.220 Gráfico Probabilístico. ($R^2 = 80\%$)	

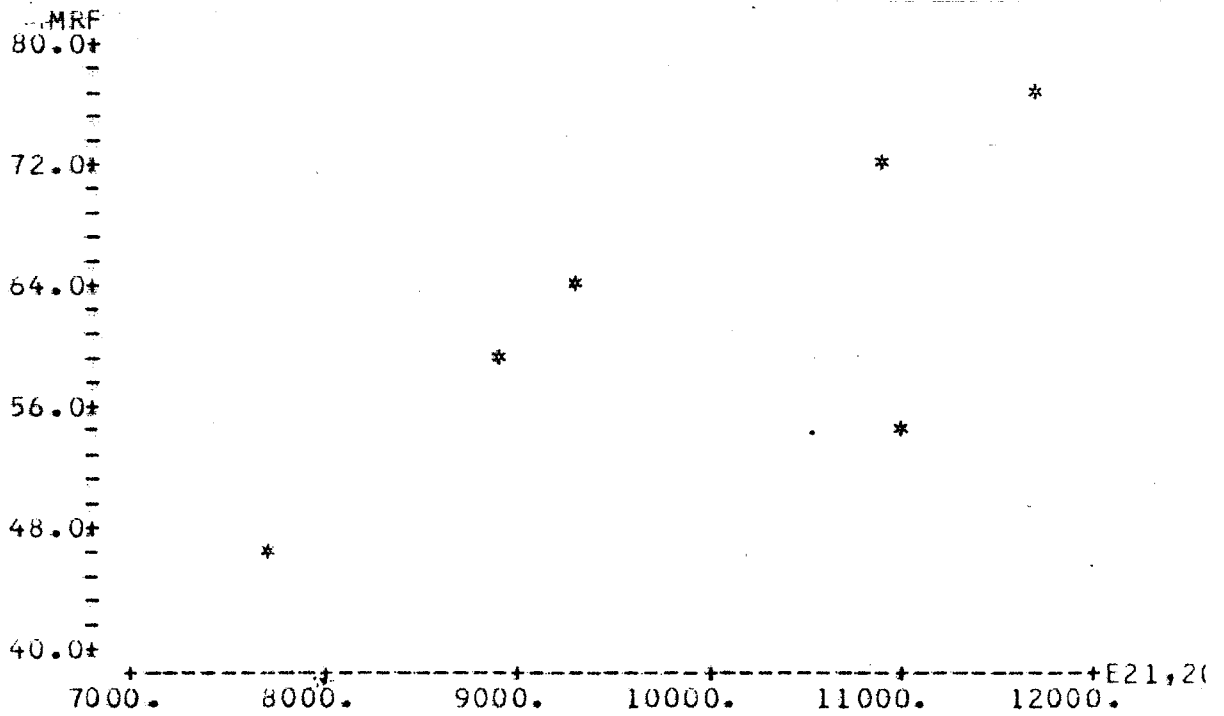


Fig.217 MRF_{21,1f} vs E_{21,2f}

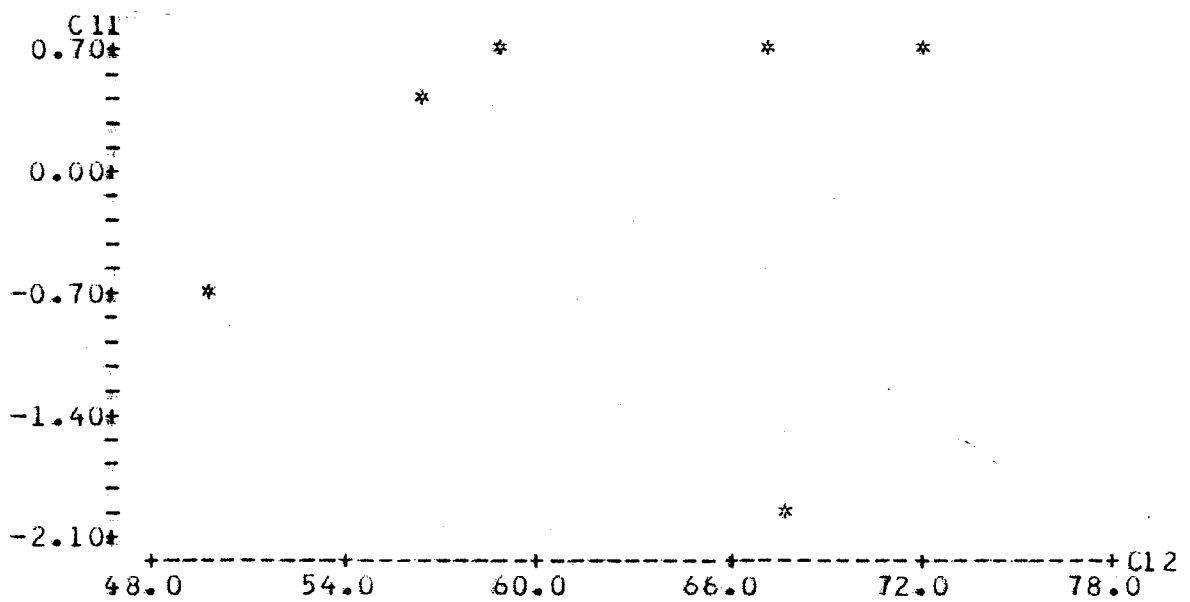


Fig. 218 Resíduos vs Valores Preditos

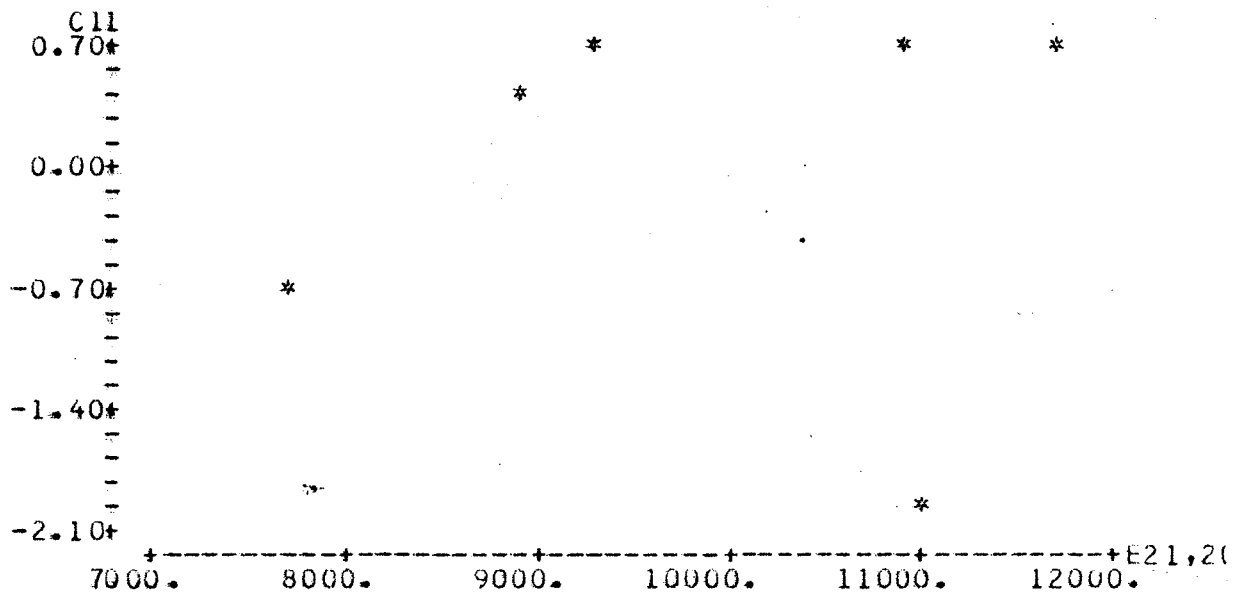


Fig. 219 Resíduos vs Variável x_1

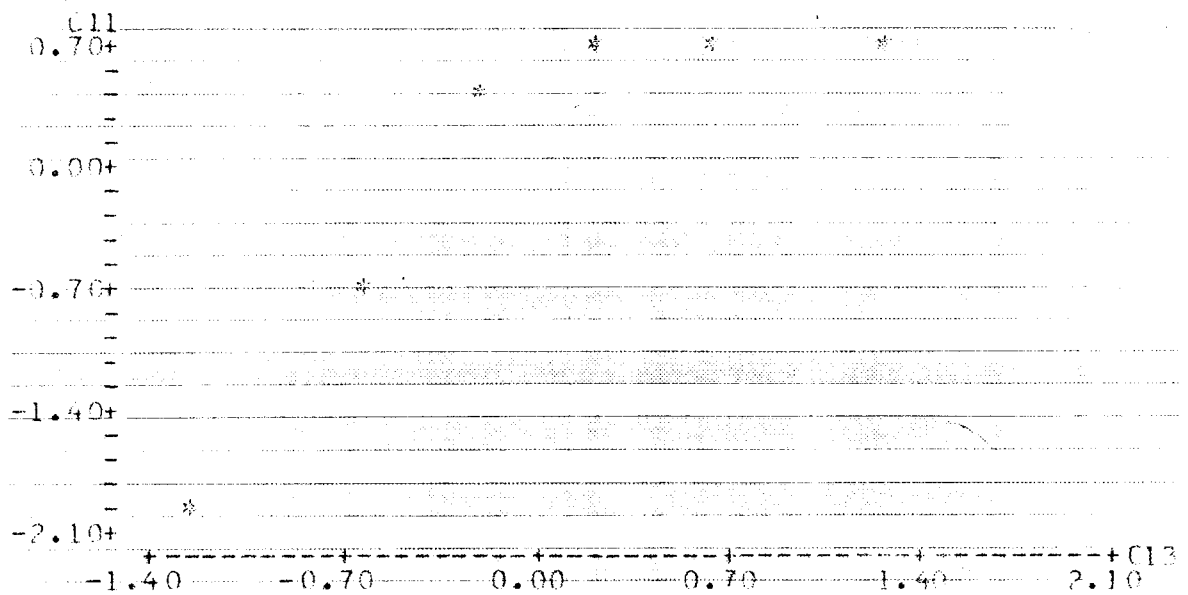


Fig. 220 Gráfico Probabilístico - ($R^2 = 80\%$)

9.5.1.2. RELAÇÃO ENTRE $MRF_{21,1f}$ X $E_{21,1f}$

ESPECIE: PEROBA ROSA

QUADRO LXXVII RESUMO DA ANÁLISE DE REGRESSÃO

ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO	OBSERVAÇÕES
MODELO	$y = a_0 + a_1 x_1$	Equação obtida pelo ajuste e pela teoria dos mínimos quadrados.
EQUAÇÃO (9.2)	$MRF_{21,1f} = 12,5 + 0,0051 E_{21,1f}$	
COEF. DE CORRELAÇÃO LINEAR	$R^2 = 55,5\%$	Grau de correlação linear aceitável.
TESTE "F"	$F(1,4) = 4,99$ nível de significância $\alpha = 9,29\%$	Pode-se considerar a regressão significativa.
TESTE "t" (valor para variável)	$x_1: t = 2,23$ nível de significância $\alpha = 4,03\%$	A variável x_1 está correlacionada com y .
GRÁFICO DA EQUAÇÃO (9.2)	FIG.221 $MRF_{21,1f}$ vs $E_{21,1f}$	<p>Não revela tendência, modelo satisfatório.</p> <p>Não revela anomalia, modelo satisfatório.</p> <p>Pelo valor $R^2 = 82\%$ aceita-se distribuição, normal de resíduos.</p>
ANÁLISE DE RESÍDUOS	FIG.222 Resíduos vs Valores Preditos.	
	FIG.223 Resíduos vs Variável x_1 . Fig.224 Gráfico Probabilístico. $(R^2 = 82\%)$	

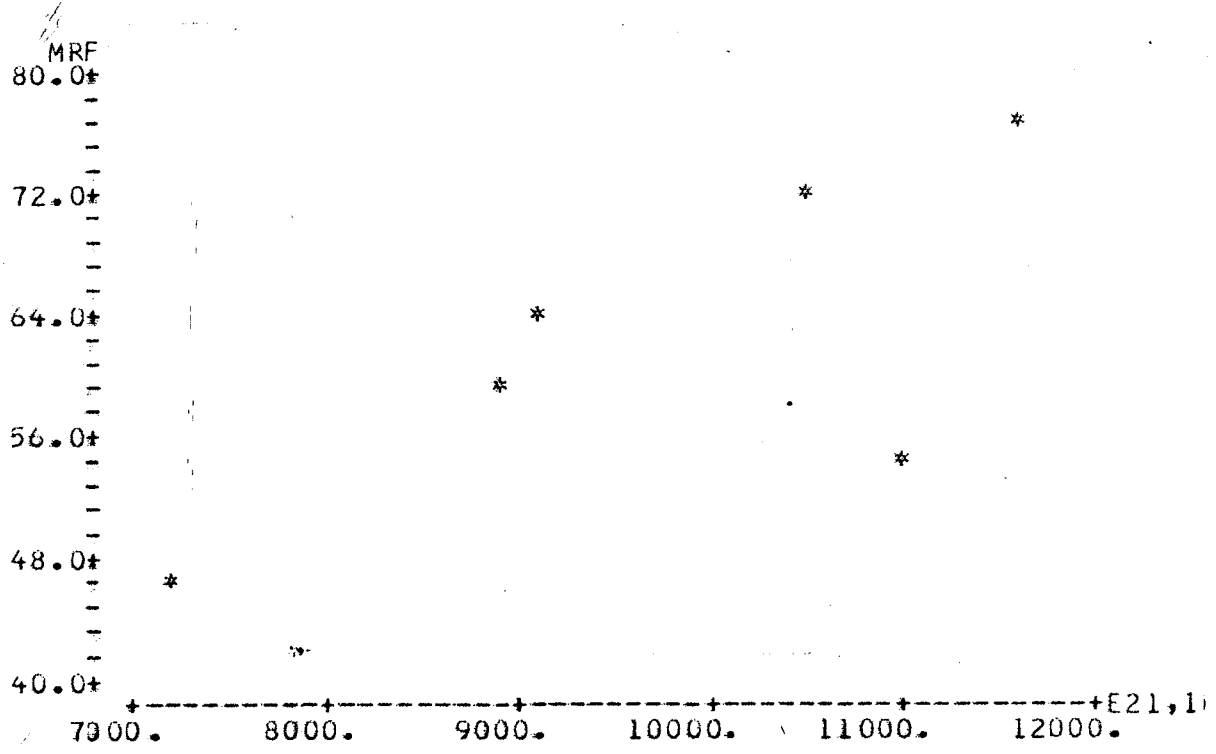


Fig. 221 MRF_{21,1f} vs E_{21,1f}

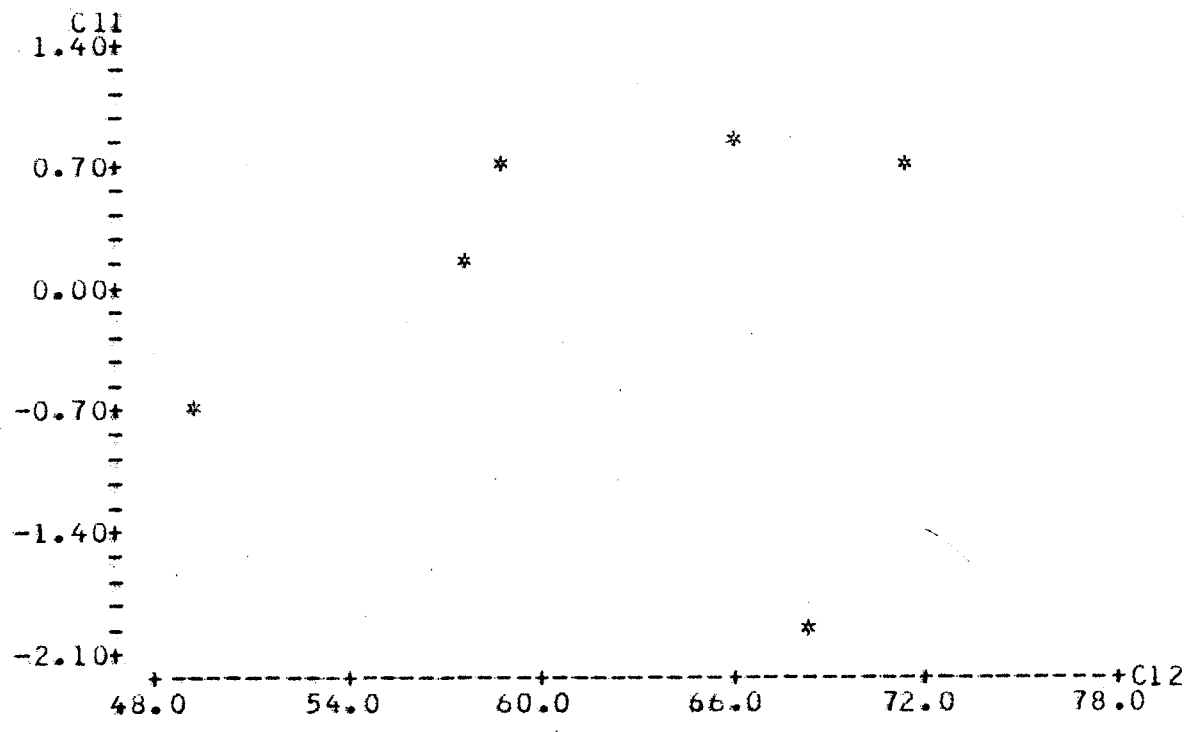


Fig. 222 Residuos vs Valores Preditos

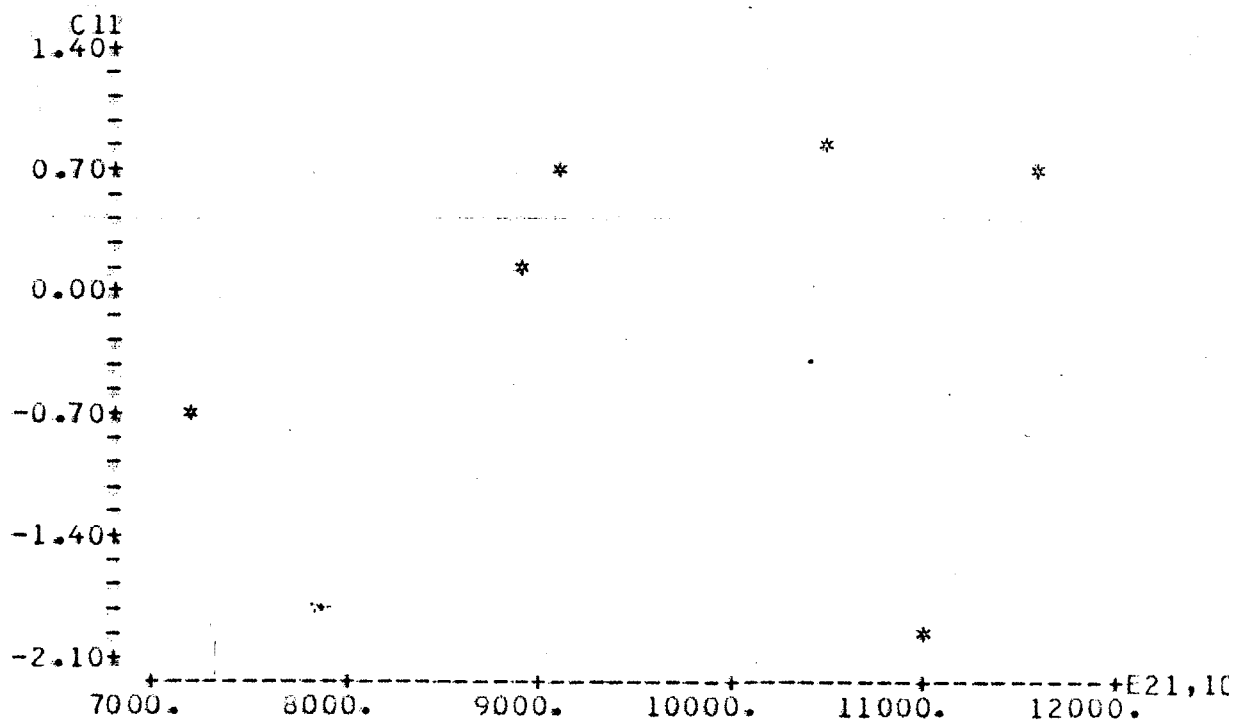


Fig. 223 Resíduos vs Variável x₁

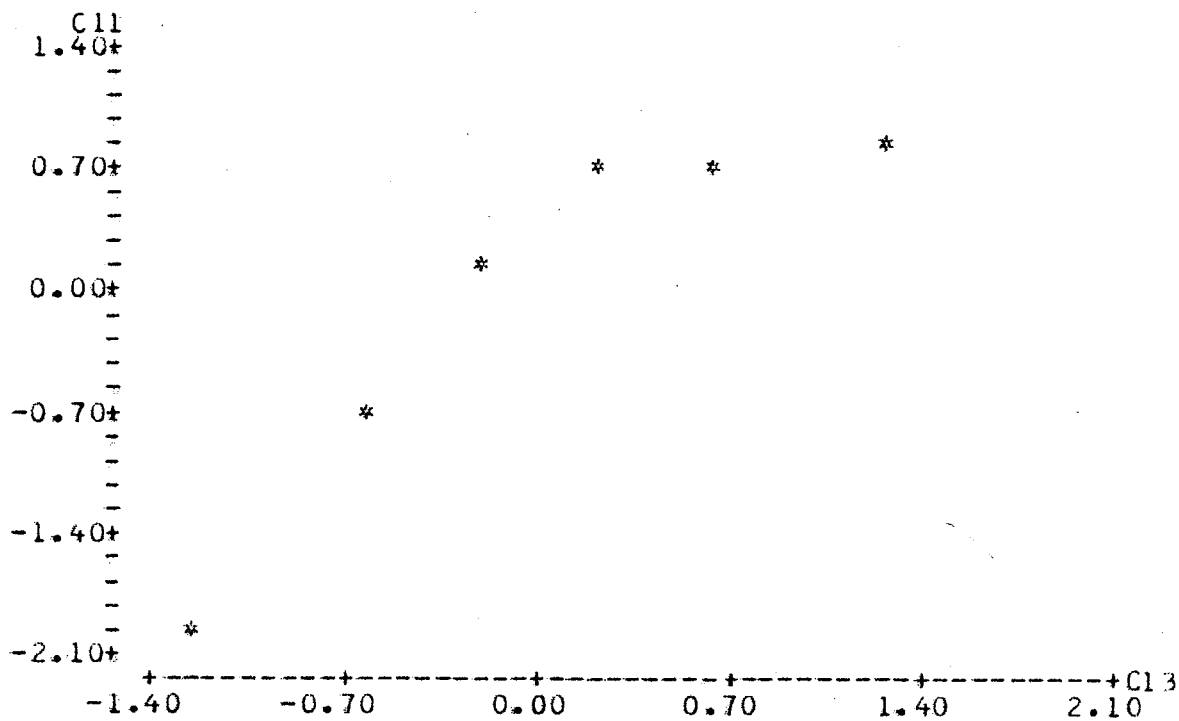


Fig. 224 Gráfico Probabilístico $\rightarrow (R^2 = 82\%)$

9.5.1.3. RELAÇÃO ENTRE $MRF_{21,1f} \times E_{14,1f}$

ESPÉCIE: PEROBA ROSA

QUADRO LXXVIII RESUMO DA ANÁLISE DE REGRESSÃO

ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO	OBSERVAÇÕES
MODELO	$Y = a_0 + a_1 x_1$	Equação obtida pelo ajuste e pela teoria dos mínimos quadrados
EQUAÇÃO (9.3)	$MRF_{21,1f} = 3,66 + 0,0077E_{14,1f}$	
COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO LINEAR	$R^2 = 60,5\%$	Possui bom grau de correlação linear
TESTE "F"	$F(1,4) = 6,12$ nível de significância $\alpha = 7,50\%$	Pode-se considerar a regressão significativa.
TESTE "t" (valor para a variável)	$x_1 : t = 2,47$ nível de significância $\alpha = 2,95\%$	A variável x_1 está correlacionada com y.
GRÁFICO DA EQUAÇÃO	FIG:225 $MRF_{21,1f}$ vs $E_{14,1f}$	
ANÁLISE DE RESÍDUOS	FIG.226 Resíduos vs Valores Preditos	Não revela tendência, modelo satisfatório.
	FIG.227 Resíduos vs Variável x_1	Não releva anomalia modelo satisfatório.
	Fig.228 Gráfico Probabilístico ($R^2 = 95\%$)	Pode-se considerar distribuição normal de resíduos.

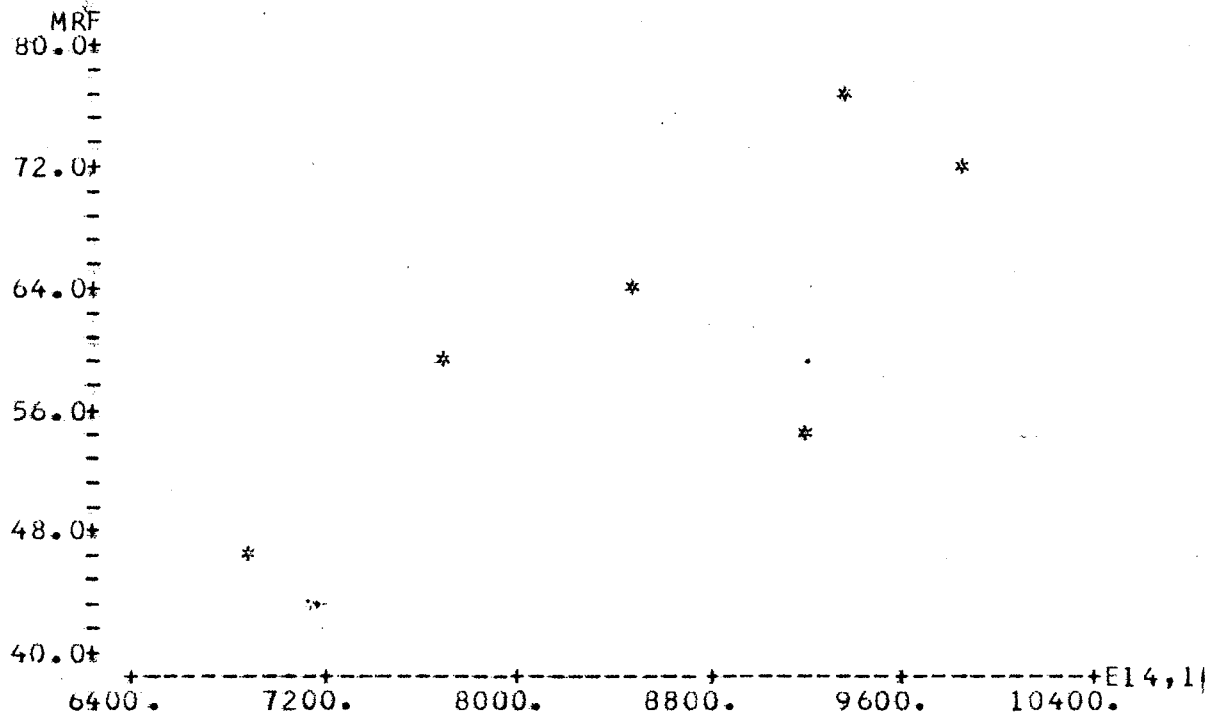


Fig. 225 MRF_{21,1f} vs E_{14,1f}

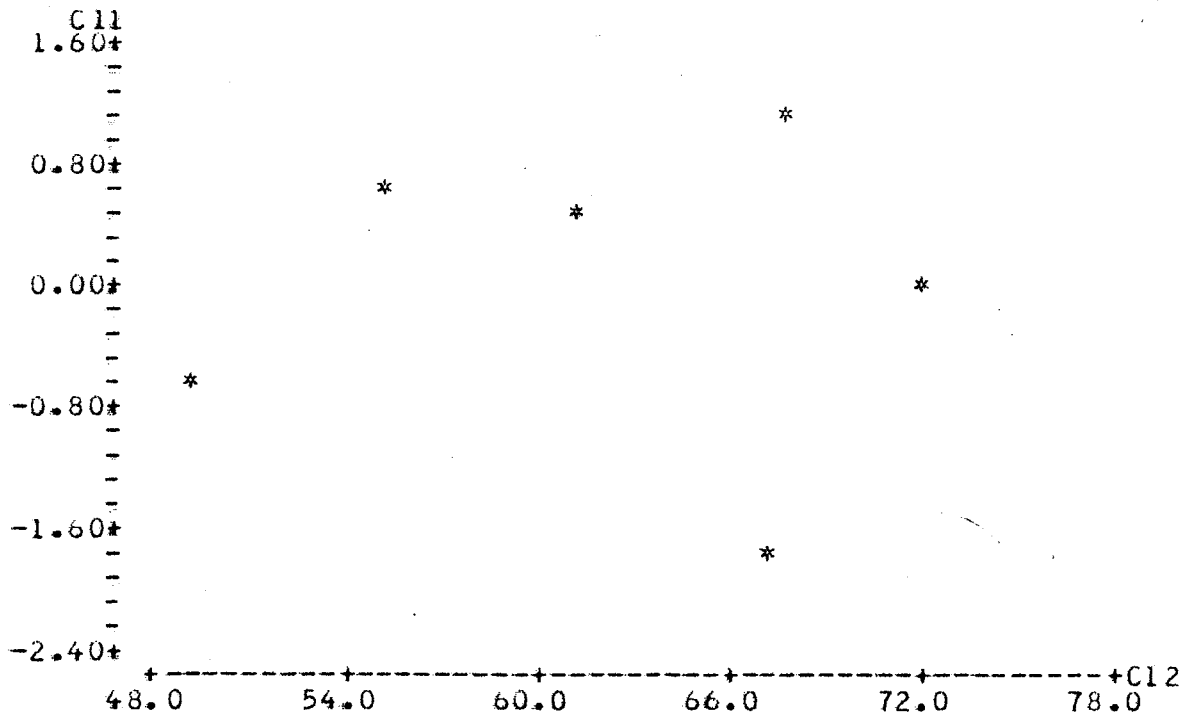


Fig. 226 Resíduos vs Valores Preditos

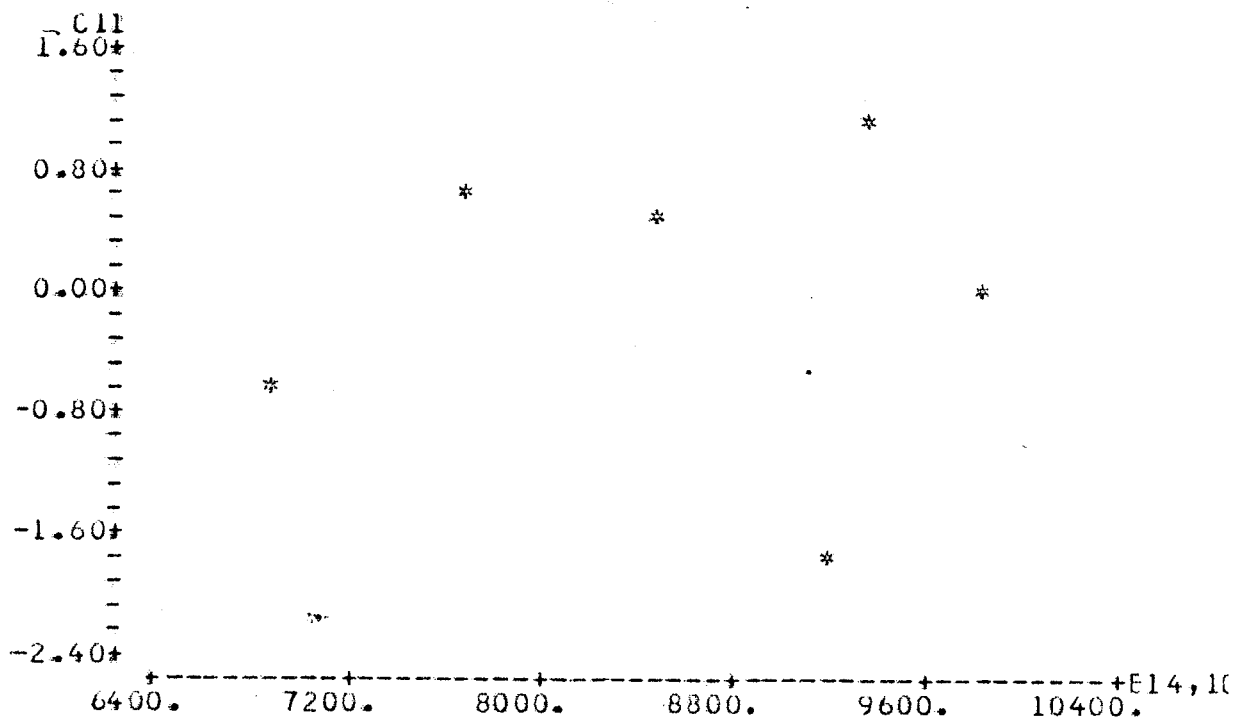


Fig. 227 Resíduos vs Variável x_1

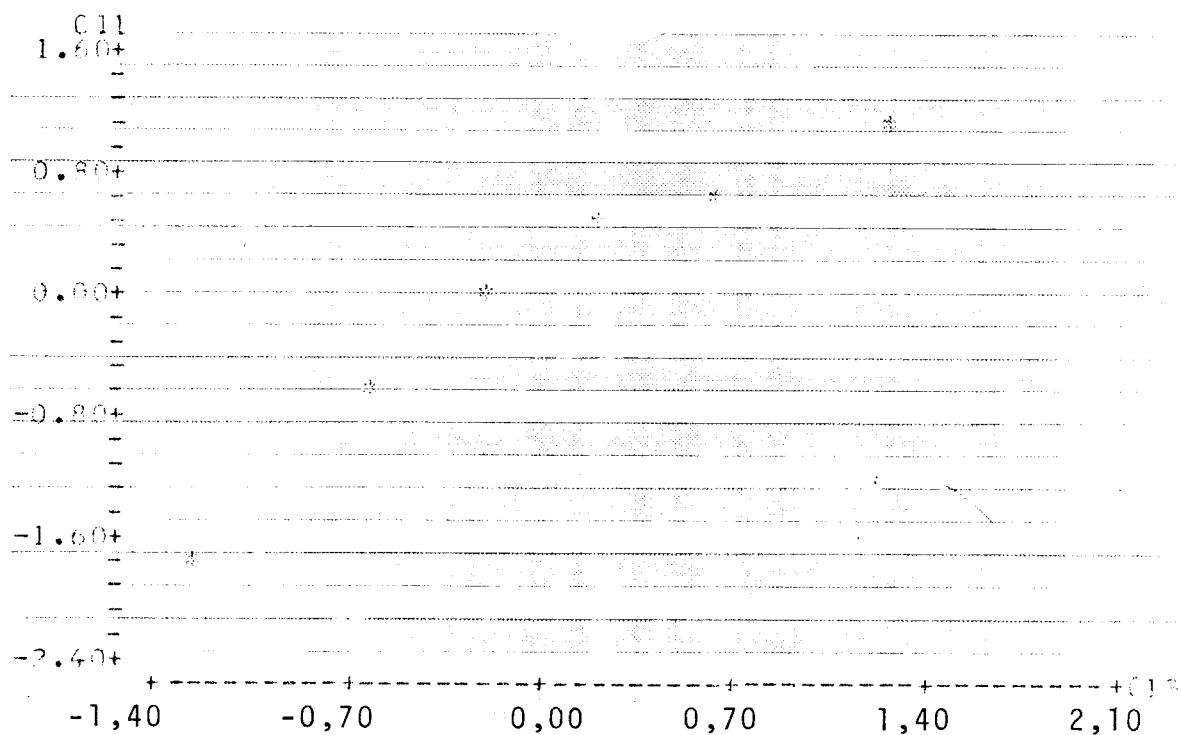


Fig. 228 Gráfico Probabilístico - ($R^2 = 95\%$)

9.6. Comparação entre $E_{21,2f}$ e $E_{21,1f}$

Os resultados dos ensaios foram utilizados para comparação dos módulos de elasticidade em peças de dimensões $6 \times 16 \times 360 \text{ cm}^3$. Foi aplicado o teste TWOSAMPLE aos resultados do QUADRO XXIV.

QUADRO LXXX Resultado do Teste TWOSAMPLE

```
TWOSAMPLE T C2 C3
E21,2C N = 6 MEAN = 9919.3 ST.DEV. = 1557.
E21,1C N = 6 MEAN = 9734.5 ST.DEV. = 1624.
APPROX. DEGREES OF FREEDOM = 9
A 95.00 PERCENT C.I. FOR MU1-MU2 IS (-1893.8335, 2263.4976)
TEST OF MU1 = MU2 VS. MU1 N.E. MU2
T = 0.201
THE TEST IS SIGNIFICANT AT 0.8450
CANNOT REJECT AT ALPHA = 0.05
```

9.7. Estudo sobre a variação dos parâmetros de elasticidade devida ao tamanho das peças

Para complementar o estudo comparativo entre peças "estruturais" e peças para método de ensaio, ou seja, a influência das dimensões expressas pelo termo "TAMANHO", fez-se uma abordagem referente à variação do módulo de elasticidade obtido de diversos modos.

A análise estatística é análoga à feita no item 8.2.3.

9.7.1. Apresentação e análise dos resultados

Utilizou-se o QUADRO XXVI para análise dos resultados.

A seguir são apresentados quadros de análise de variância.

QUADRO LXXIX - RESUMO DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA ESPECIFICAÇÃO: Comparação entre $E_{21,2f}$ variando o tamanho da peça de madeira						
MODELO: $Y_{tj} = \mu + \beta_j + \tau_t + \epsilon_{tj}$ com: $\epsilon_{tj} \sim N(0, \sigma^2)$, β_j - efeito de blocos, τ_t - efeito de tratamentos						
TESTES DAS HIPÓTESES: (i) $\beta_j = 0$ (ii) $\tau_t = 0$						
EFEITO DE VARIÂÇÃO	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	RAZÃO DOS QUADRADOS MÉDIOS	TESTES DAS HIPÓTESES (5%)	OBSERVAÇÕES
ENTRE BLOCOS	$S_B = 24850568$	$\nu_B = 5$	$s_B^2 = 4970109$	$s_B^2/s_T^2 = 148,44$	$F_{(5,5)} = 5,05$	A hipótese $\beta_j = 0$ não é aceita
ENTRE TRATAMENTOS	$S_T = 50313$	$\nu_T = 1$	$s_T^2 = 50313$	$s_T^2/s_R^2 = 1,502$	$F_{(1,5)} = 6,61$	A hipótese $\tau_t = 0$ é aceita
RESÍDUOS	$S_R = 167407$	$\nu_R = 5$	$s^2 = 33481$			

QUADRO LXXXI - RESUMO DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA
 ESPECIFICAÇÃO: Comparação entre $E_{21,1f}$ variando o tamanho da peça de madeira

MODELO: $Y_{ti} = \mu + \beta_j + \tau_t + \epsilon_{ti}$
 com: $\epsilon_{ti} \sim N(0, \sigma^2)$, β_j - efeito de blocos, τ_t - efeito de tratamentos

TESTE DAS HIPÓTESES: (i) $\beta_j = 0$ (ii) $\tau_t = 0$

EFEITO DE VARIÂÇÃO	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	RAZÃO DOS QUADRADOS MÉDIOS	TESTES DAS HIPÓTESES (5%)	OBSERVAÇÕES
ENTRE BLOCOS	$S_B = 27433891$	$\nu_B = 5$	$s_B^2 = 5486744$	$s_B^2 / s_R^2 = 163,87$	$F_{(5,5)} = 5,05$	A hipótese $\beta_j = 0$ não é aceita
ENTRE TRATAMENTOS	$S_T = 114275$	$\nu_B = 1$	$s_T^2 = 114275$	$s_T^2 / s_R^2 = 3,41$	$F_{(1,5)} = 6,61$	A hipótese $\tau_j = 0$ é aceita
RESÍDUOS	$S_R = 364042$	$\nu_R = 5$	$s_R^2 = 72808$			

QUADRO LXXXII - RESUMO DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA
 ESPECIFICAÇÃO: Comparação entre $E_{14,1f}$ variando o tamanho da peça de madeira

MODELO: $Y_{tj} = \mu + \beta_j + \tau_t + \epsilon_{tj}$
 com: $\epsilon_{tj} \sim N(0, \sigma^2)$, β_j - efeito de bloco, τ_t - efeito de tratamentos

TESTES DAS HIPÓTESES: (i) $\beta_j = 0$ (ii) $\tau_t = 0$

EFEITO DE VARIÂÇÃO	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	RAZÃO DOS QUADRADOS MÉDIOS	TESTES DAS HIPÓTESES (5%)	OBSERVAÇÕES
ENTRE BLOCOS	$S_B = 13353462$	$\nu_B = 5$	$s_B^2 = 2670692$	$s_B^2/s_R^2 = 181,70$	$F_{(5,5)} = 5,05$	A hipótese $\beta_j = 0$ não é aceita
ENTRE TRATAMENTOS	$S_T = 12869$	$\nu_T = 1$	$s_T^2 = 12869$	$s_T^2/s_R^2 = 0,87$	$F_{(1,5)} = 6,61$	A hipótese $\tau_t = 0$ é aceita
RESÍDUOS	$S_R = 73489$	$\nu_R = 5$	$s_R^2 = 14698$			

QUADRO LXXXIII RESUMO DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA ESPECIFICAÇÃO: Comparação entre G variando o tamanho da peça de madeira						
MODELO: $Y_{tj} = \mu + \beta_j + \tau_t + \epsilon_{tj}$ com: $\epsilon_{tj} \sim N(0, \sigma^2)$, β_j - efeito de blocos, τ_t - efeito de tratamentos						
TESTES DAS HIPÓTESES: (i) $\beta_j = 0$ (ii) $\tau_t = 0$						
EFEITO DE VARIÂÇÃO	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	RAZÃO DOS QUADRADOS MÉDIOS	TESTES DAS HIPÓTESES (5%)	OBSERVAÇÕES
ENTRE BLOCOS	$S_B^2 = 159057$	$\nu_B = 5$	$s_B^2 = 31811$	$s_B^2 / s_R^2 = 16,80$	$F(5,5) = 5,05$	A hipótese $\beta_j = 0$ não é aceita
ENTRE TRATAMENTOS	$S_T = 3502$	$\nu_T = 1$	$s_T^2 = 3502$	$s_T^2 / s_R^2 = 1,84$	$F(1,5) = 6,61$	A hipótese $\tau_j = 0$ é aceita
RESÍDUOS	$S_R = 9465$	$\nu_R = 5$	$s_R^2 = 1893$			

9.8. Conclusões

Através do estudo e da análise dos resultados experimentais obtidos nos ensaios, conclui-se:

- a resistência de peças de dimensões $6 \times 16 \times 360 \text{ cm}^3$, diminui cerca de 20% em relação a uma peça de $2 \times 2 \times 30 \text{ cm}^3$. Este fato é bastante significativo para o dimensionamento de peças sujeitas à flexão estática.

- não foi constatada diferença significativa entre a resistência de peças de $2 \times 2 \times 30 \text{ cm}^3$ e de $5 \times 5 \times 120 \text{ cm}^3$.

- os parâmetros de elasticidade não apresentam variação significativa com a variação das dimensões das peças.

- os parâmetros de elasticidade $E_{21,1f}$ e $E_{21,2f}$ são estatisticamente equivalentes.

- o módulo de elasticidade é um bom estimador da resistência à flexão, não obstante a ligeira tendência observada na análise dos resíduos da regressão linear.

10. DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA DA MADEIRA

10.1. Objetivos

Neste capítulo é apresentado o estudo desenvolvido para a determinação da distribuição de frequência das resistências à flexão da madeira.

A partir de um conjunto de resultados obtidos na experimentação, foi realizada análise estatística com o objetivo de se definir a função densidade de probabilidade mais representativa do campo amostral existente.

Este é um passo inicial para a determinação dos valores relativos à resistência característica da madeira à flexão estática.

10.2. Considerações a respeito da amostragem utilizada

Tendo em vista a aleatorização das amostras empregadas na experimentação, foram adquiridas peças (caibros e vigas) em diversas serrarias e em várias oportunidades, desde meados de 1983 até início de 1985. Com isto, espera-se ter alcançado uma amostra aleatorizada.

As espécies de madeiras escolhidas para experimentação nesta etapa do trabalho foram: Peroba Rosa, Jatobá e Eucalipto Tereticornis, respectivamente com 94, 33 e 33 peças. A escolha destas espécies de madeira e do número de peças, recaiu no fato do seu amplo uso na construção e da disponibilidade de peças na ocasião do trabalho.

10.3. Apresentação dos resultados

A utilização do acervo de resultados experimentais relativos à resistência à flexão na obtenção da respectiva função densidade de probabilidade é indicada nos quadros de resultados: QUADRO XVIII, XIV e XXIII referentes às espécies de madeira Peroba Rosa, Jatobá e Eucalipto tereticornis. Estes corpos de prova foram preparados nas dimensões 5 x 5 x 120 cm³.

A não apresentação dos quadros de resultados neste capítulo evita redundância.

10.4. Análise dos resultados

A análise dos resultados se baseou em conceitos estatísticos apresentados a seguir. A finalidade destes testes é definir a distribuição de frequência das resistências à flexão da madeira.

10.4.1. Histograma dos resultados e Diagrama "ramo e folhas"

Para traçado dos histogramas dos resultados e do diagrama "ramo e folhas" utilizou-se a subrotina MINITAB, através dos comandos HIST e STEM.

10.4.1.1. Histograma de resultados e Diagrama "ramo e folhas" para Peroba Rosa

MIDDLE OF INTERVAL	NUMBER OF OBSERVATIONS		
		2	5* 24
		4	5. 25
		10	6* 001233
		16	6. 555999
50.	2	**	
60.	8	*****	
70.	12	*****	
80.	14	*****	
90.	15	*****	
100.	13	*****	
110.	2	**	
120.	2	**	
130.	2	**	
		27	7. 55678
		(9)	8* 011122234
		34	8. 666788
		26	9* 011223344
		19	9. 55779
		14	10* 00003334
		6	10. 00
		6	11* 00
		4	11. 68
		2	12*
		2	12. 78

10.4.1.2. Histograma de resultados e Diagrama "ramo e folhas" para Jatobá

MIDDLE OF INTERVAL	NUMBER OF OBSERVATIONS		
		1	10* 1
		1	10. 00
		3	11* 02
		7	11. 5789
100.	1	*	
110.	2	**	
120.	5	****	
130.	4	****	
140.	2	**	
150.	6	*****	
160.	11	*****	
170.	2	**	
		8	12* 2
		11	12. 558
		12	13* 4
		12	13. 00
		14	14* 04
		(5)	14. 56789
		14	15* 1
		13	15. 559
		10	16* 00223334
		2	16. 99

10.4.1.3. Histograma de resultados e Diagrama "ramo e folhas" para Eucalipto Tereticornis

MIDDLE OF INTERVAL	NUMBER OF OBSERVATIONS			
70.	1	*	1	7*
75.	1	*	2	7.
80.	1	*	+	8*
85.	+	****	8	8.
90.	+	****	14	9*
95.	4	****	15	9.
100.	3	***	(4)	10*
105.	1	*	14	10.
110.	0	*****	9	11*
115.	1	*	5	11.
120.	+	***	2	12*
125.	0		1	12.
130.	1	*		

10.4.2. Distribuição normal e testes de aderência

Uma observação preliminar dos histogramas e diagramas "ramo e folhas" revela a tendência dos resultados apresentarem uma distribuição normal. Os noventa e quatro resultados experimentais da Peroba Rosa apresentam uma amostra do universo e admite-se \bar{x} e s , respectivamente média e desvio padrão desta amostra, como sendo bons estimadores de μ e σ , respectivamente média e desvio padrão do universo. Esta mesma hipótese se aplica aos trinta e três resultados experimentais das espécies: Eucalipto Tereticornis e Jatobá. Além disso, foram feitos testes de aderência para comprovar a tendência normal da distribuição de frequência.

10.4.2.1. Método de Kolmogorov e Smirnov

Kolmogorov e Smirnov (apud COSTA NETO 1977) desenvolveram um método para testar a aderência, no qual a variável de teste é a maior diferença entre a função de distribuição acumulada do modelo testado e a da amostra.

Essa diferença é representada por:

$$d = \max |F(x) - G(x)| \tag{10.1}$$

onde: $F(x) = P(X < Z)$ é a função de distribuição acumulada do modelo testado e $G(x)$ é a função de distribuição acumulada da amostra.

O teste consiste simplesmente em fazer a comparação do valor d com um valor crítico (d_{crit}), tabelado em função do número de elementos da amostra e do nível de significância α , com $\alpha = 5\%$. Se $d < d_{crit}$, não se rejeita a hipótese de aderência entre as distribuições comparadas (H_0).

10.4.2.1.1. Resultados obtidos pelo Método Kolmogorov-Smirnov

Através de um programa processado na calculadora HP-9825T, foram determinados os valores de d e aplicou-se o teste. Os resultados são apresentados no QUADRO LXXXIV.

QUADRO LXXXIV Teste de aderência - Método KOLMOGOROV-SMIRNOV

ESPECIES	Nº CP	d	d_{crit} ($\alpha = 5\%$)	CONCLUSÃO
Peroba Rosa	94	0,08004	0,14027	Não se rejeita H_0
Eucalipto Tereticornis	33	0,13654	0,23120	Não se rejeita H_0
Jatobã	33	0,12723	0,23120	Não se rejeita H_0

10.4.2.1.2. Conclusão do teste de aderência (Método Kolmogorov-Smirnov)

Com base nos resultados apresentados no QUADRO LXXXIV, não se rejeita a hipótese de distribuição normal dos resultados de MRF.

10.4.2.2. Teste de aderência de Pearson

Karl Pearson, 1900 (*apud* MEYER, 1972), apresentou o seguinte teste de aderência que, em linhas gerais, consiste em se calcular a estatística D^2 , sendo:

$$D^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i} \quad (10.2)$$

onde: k = número de intervalos

n = número total de resultados da amostra

n_i = frequência do intervalo A_i

p_i = probabilidade da variável estar contida no intervalo A_i

Neste caso, para a determinação do número de intervalos, foi adotada a sugestão de Benjamin e Cornell, 1970 (apud FUSCO, 1977). Assim, $k = 1 + 3,3 \log n$.

Por hipótese, quando n é grande, D^2 segue uma distribuição qui-quadrado. D^2 deve ser comparado com um valor C , obtido da tabela do qui-quadrado com $r = k - 1 - p$ graus de liberdade (onde p é o número de parâmetros estimados, no caso, $p = 2$ pois foram estimados a média e o desvio padrão) e com o nível de segurança desejado. Se $D^2 > C$, rejeita-se a hipótese da distribuição tender à normal (H_0).

A seguir é apresentado o teste de aderência de Pearson, com os resultados divididos em sete intervalos (A_i) de classe, cada um com n_i elementos. É conveniente adotar um número e uma frequência de intervalos A_i , tal que o espaço amostral da variável aleatória não seja subdividido em partes tão pequenas, que o número esperado de ocorrências em qualquer subdivisão se torne muito reduzido, por exemplo, n_i inferior a dois.

10.4.2.2.1. Aplicação do teste de Pearson - Peroba Rosa

QUADRO LXXXV-Intervalos de Classe e Frequência de Resultados

$A_1:$	$x \leq 56 \rightarrow n_1 = 5$
$A_2:$	$56 < x \leq 66 \rightarrow n_2 = 15$
$A_3:$	$66 < x \leq 76 \rightarrow n_3 = 19$
$A_4:$	$76 < x \leq 86 \rightarrow n_4 = 20$
$A_5:$	$86 < x \leq 96 \rightarrow n_5 = 18$
$A_6:$	$96 < x \leq 106 \rightarrow n_6 = 11$
$A_7:$	$x > 106 \rightarrow n_7 = 6$

Com a média dos resultados $\bar{x} = 81,426$ MPa, e o desvio padrão $s = 16,6$ MPa, e auxílio da tabela de distribuição normal são calculadas as probabilidades:

QUADRO LXXXVI Cálculo das Probabilidades p_i

p_1	=	$P(x \leq 56)$	=	0,0630
p_2	=	$P(56 < x \leq 66)$	=	0,1106
p_3	=	$P(66 < x \leq 76)$	=	0,1971
p_4	=	$P(76 < x \leq 86)$	=	0,2396
p_5	=	$P(86 < x \leq 96)$	=	0,2003
p_6	=	$P(96 < x \leq 106)$	=	0,1200
p_7	=	$P(x > 106)$	=	0,0694

Obtem-se o valor D^2 , através de (10.2):

$$D^2 = \sum_{i=1}^7 \frac{(n_i - 94p_i)^2}{94p_i} = 2,60$$

Adotando-se um nível de significância $\alpha = 5\%$, com $r = 7 - 1 - 2 = 4$ graus de liberdade, tem-se da tabela de qui-quadrado, a constante $C = 9,488$.

Como $D^2 < C$ não se rejeita a hipótese de distribuição normal do parâmetro de resistência.

10.4.2.2.2. Aplicação do Teste de Pearson - Eucalipto Tereticornis

QUADRO LXXXVII-Intervalos de Classe e Frequência de Resultados

$A_1:$	$x \leq 81 \rightarrow 3$
$A_2:$	$81 < x \leq 91 \rightarrow 7$
$A_3:$	$91 < x \leq 101 \rightarrow 8$
$A_4:$	$101 < x \leq 111 \rightarrow 8$
$A_5:$	$x > 111 \rightarrow 7$

Com $\bar{x} = 100,06$ MPa e $s = 14,095$, e com auxílio da tabela de distribuição normal são calculadas as probabilidades:

QUADRO LXXXVIII Cálculo das Probabilidades p_i

p_1	$= (x \leq 81)$	$= 0,0885$
p_2	$= (81 < x \leq 91)$	$= 0,1726$
p_3	$= (91 < x \leq 101)$	$= 0,2628$
p_4	$= (101 < x \leq 111)$	$= 0,2555$
p_5	$= (x > 111)$	$= 0,2240$

Obtem-se D^2 , através de (10.2):

$$D^2 = \sum_{i=1}^7 \frac{(n_i - 33p_i)^2}{33p_i} = 0,40$$

Adotando-se $\alpha = 5\%$, com $r = 2$ graus de liberdade, tem-se da tabela de qui-quadrado, a constante $C = 5,991$.

Como $D^2 < C$ não se rejeita a hipótese de distribuição normal do parâmetro de resistência.

10.4.2.2.3. Aplicação do Teste de Pearson - Jatobá

QUADRO LXXXIX-Intervalos de Classe e Frequência de Resultados

$A_1:$	$x \leq 117 \rightarrow n_1 = 5$
$A_2:$	$117 < x \leq 133 \rightarrow n_2 = 6$
$A_3:$	$133 < x \leq 149 \rightarrow n_3 = 8$
$A_4:$	$149 < x \leq 163 \rightarrow n_4 = 8$
$A_5:$	$x \geq 163 \rightarrow n_5 = 6$

Com $\bar{x} = 142,42$ MPa; $s = 20,04$ MPa e com auxílio da tabela de distribuição normal são calculadas as probabilidades:

QUADRO XC - Cálculo das Probabilidades p_i

p_1	=	$P(x \leq 117)$	=	0,1020
p_2	=	$P(117 < x < 133)$	=	0,2172
p_3	=	$P(133 < x \leq 149)$	=	0,3063
p_4	=	$P(149 < x < 163)$	=	0,2158
p_5	=	$P(x \geq 163)$	=	0,1587

Obtem-se D^2 , através de (10.2):

$$D^2 = \sum_{i=1}^7 \frac{(n_i - 33p_i)^2}{33p_i} = 1,65$$

Adotando-se $\alpha = 5\%$, com $r = 2$ graus de liberdade, tem-se da tabela de qui-quadrado, a constante $C = 5,991$.

Como $D^2 < C$ não se rejeita a hipótese da distribuição normal do parâmetro de resistência.

10.4.2.3. Função NSCORE - Teste de Normalidade

A função NSCORE, da subrotina estatística MINITAB, faz o teste de normalidade de um conjunto de observações, ou seja, de uma amostra.

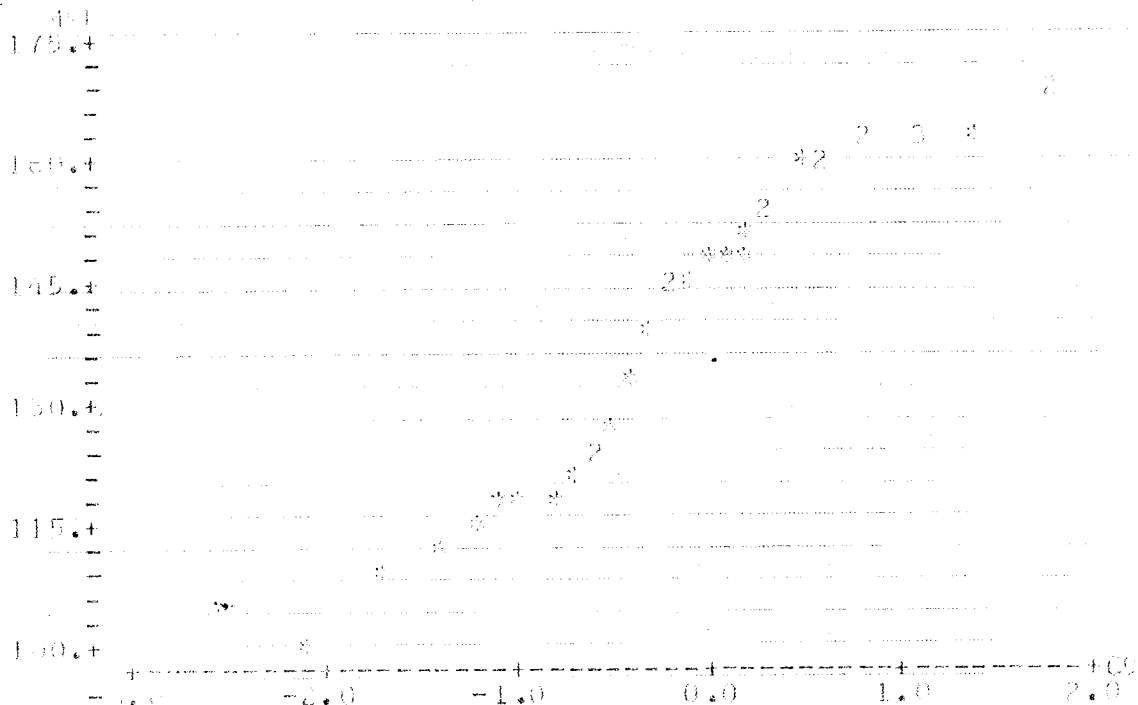
O teste consiste em analisar um gráfico no qual são plotados os resultados observados contra os valores normalizados pela função NSCORE.

A hipótese de normalidade se justifica pelo aspecto linear do gráfico, com um coeficiente de correlação linear (R^2) próximo de 1. Este coeficiente é indicado no gráfico por "CORRELATION OF" com seu valor apresentado a seguir.

ESPÉCIE: Jatobá

ESCORRE OI 09

PLU1 OI 09



CORRELATION OF ESCORRE OI 09 AND PLU1 OI 09 = 0.966

10.4.2.3.2. Conclusão do teste de normalidade

Através dos gráficos apresentados e dos valores de R^2 , o conjunto de resultados experimentais obtidos revela tendência para distribuição normal.

10.5. Conclusão

Pela análise realizada, conclui-se pela aceitação da hipótese de distribuição normal do $MRF_{14,1f}$, parâmetro de resistência componente do campo amostral estudado.

11. DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE LONGITUDINAL À FLEXÃO ESTÁTICA DA MADEIRA

11.1. Objetivos

Neste capítulo é apresentado um estudo desenvolvido para a determinação da distribuição de frequência dos módulos de elasticidade longitudinais à flexão estática.

A partir de um conjunto de resultados experimentais, foi realizada análise estatística com o objetivo de se definir a função densidade de probabilidade mais representativa do campo amostral existente. Similarmente ao capítulo 10, o estudo agora apresentado objetivou introduzir discussão a respeito dos valores referentes ao módulo de elasticidade longitudinal característico da madeira à flexão estática

11.2. Considerações a respeito da amostragem utilizada

As considerações a respeito da aleatorização das amostras empregadas na experimentação, assim como das espécies de madeira e da quantidade de peças, são idênticas às mencionadas no item 10.2., do capítulo 10.

11.3. Apresentação dos resultados

Os resultados experimentais relativos ao módulo de elasticidade longitudinal, utilizados na obtenção da respectiva função densidade de probabilidade, estão mostrados nos QUADROS XVIII, XIV, XXIII do capítulo 3.

É oportuno ressaltar: foram empregados os valores de $E_{21,2f}$ por serem equivalentes aos de $E_{21,1f}$ e por haver um número maior de resultados.

11.4. Análise dos resultados

A análise empregada neste item apresenta as mesmas características da análise feita no item 10.4., do capítulo 10.

11.4.1. Histogramas dos resultados e Diagrama "ramo e folhas"

Para traçado dos histogramas dos resultados e do diagrama "ramo e folhas", utilizou-se a subrotina MINITAB, através dos comandos HIST e STEM (ver item 10.4.1.)

11.4.1.1. Histograma de resultados e Diagrama "ramo e folhas" para Peroba Rosa

MIDDLE OF INTERVAL	NUMBER OF OBSERVATIONS		
		3	6* 334
		5	6. 58
		7	7* 22
		11	7. 6799
		15	8* 0113
6000.	3	15	8. 5666678
7000.	4	22	9* 0111344
8000.	8	29	9. 66779
9000.	14	34	10* 011113344
10000.	14	(9)	10. 567
11000.	7	27	11* 0234
12000.	15	24	11. 6666899
13000.	4	20	12* 000333
14000.	2	13	12. 69
15000.	1	7	13* 13
		5	13. 7
		3	14* 4
		2	14. 7
		1	

11.4.1.2. Histograma de resultados e Diagrama "ramo e folhas"- Jatobá

MIDDLE OF INTERVAL	NUMBER OF OBSERVATIONS		
		1	15 7
		3	16 23
		7	17 2209
		12	18 01445
		15	19 788
		16	20 5
		(2)	21 00
		15	22 25
		13	23 0024079
		6	24 0456
		2	25 5
		1	26 7
16000.	3		
17000.	2		
18000.	6		
19000.	1		
20000.	3		
21000.	3		
22000.	1		
23000.	5		
24000.	5		
25000.	2		
26000.	1		
27000.	1		

11.4.1.3. Histograma de resultados e Diagrama "ramo e folhas" para Eucalipto Tereticornis

MIDDLE OF INTERVAL	NUMBER OF OBSERVATIONS		
		1	7. 3
		2	8* 3
		3	8. 5
		5	9* 04
		9	9. 7789
		13	10* 0022
		16	10. 557
		(2)	11* 33
		15	11. 69
		13	12* 1224
		9	12. 55573
		4	13* 012
		1	13. 9
5000.	1		
6000.	2		
7000.	1		
8000.	3		
9000.	5		
10000.	3		
10500.	4		
11000.	0		
11500.	3		
12000.	2		
12500.	3		
13000.	5		
13500.	1		
14000.	1		

11.4.2. Distribuição normal e teste de aderência

Como constatado para a resistência, no item 10.4.1. uma observação preliminar dos histogramas e diagrama "ramo e folhas" revela tendência dos resultados apresentarem distribuição normal.

Analogamente, admite-se \bar{x} e s , como bons estimadores de μ e σ , para a amostra da espécie Peroba Rosa, estendendo-se a hipótese para as amostras de Eucalipto Tereticornis e de Jatobá.

Para se garantir esta hipótese foram, identicamente, utilizados os testes de aderência de Kolmogorov-Smirnov e de Pearson.

11.4.2.1. Método de Kolmogorov-Smirnov

O método é descrito em 10.4.2.1, adotando-se também a hipótese de aderência entre as distribuições (H_0) a um nível de significância (α) igual a 5%.

11.4.2.1.1. Resultados obtidos pelo Método Kolmogorov-Smirnov

Utilizando-se o mesmo programa processado na calculadora HP-9825T, foram obtidos os valores de d e foi aplicado o teste de aderência. Os resultados obtidos são apresentados no QUADRO XCI.

QUADRO XCI-TESTE DE ADERÊNCIA - MÉTODO KOLMOGOROV-SMIRNOV

ESPECIES	Nº CP	d	d_{crit} ($\alpha = 5\%$)	CONCLUSÃO
Peroba Rosa	94	0,06135	0,14027	Não se rejeita H_0
Eucalipto Tereticornis	33	0,13284	0,23120	Não se rejeita H_0
Jatobá	33	0,13175	0,23120	Não se rejeita H_0

11.4.2.1.2. Conclusão do teste de aderência (Método Kolmogorov-Smirnov)

Com base nos resultados apresentados no QUADRO XCI, não se rejeita a hipótese de distribuição normal dos resultados de $E_{21,2f}$.

11.4.2.2. Teste de aderência de Pearson

O teste é descrito em 10.4.2.2, adotando-se também a hipótese de aderência entre as distribuições (H_0) a um nível de significância (α) igual a 5%.

11.4.2.2.1. Aplicação do teste de Pearson - Peroba Rosa

QUADRO XCII-Intervalo de Classe e Frequência de Resultados

$A_1:$	$x \leq 7000$	$\rightarrow n_1 = 5$
$A_2:$	$7000 < x \leq 8200$	$\rightarrow n_2 = 13$
$A_3:$	$8200 < x \leq 9400$	$\rightarrow n_3 = 18$
$A_4:$	$9400 < x \leq 10600$	$\rightarrow n_4 = 20$
$A_5:$	$10600 < x \leq 11800$	$\rightarrow n_5 = 20$
$A_6:$	$11800 < x \leq 13000$	$\rightarrow n_6 = 13$
$A_7:$	$x > 13000$	$\rightarrow n_7 = 5$

Com a média dos resultados $\bar{x} = 10072$ MPa, e o desvio padrão $s = 1893$ MPa, e com auxílio de tabela de distribuição normal, são calculadas as probabilidades:

QUADRO XCIII- Cálculo das Probabilidades p_i

p_1	=	$P(x \leq 7000)$	=	0,0006
p_2	=	$P(7000 < x \leq 8200)$	=	0,6360
p_3	=	$P(8200 < x \leq 9400)$	=	0,0310
p_4	=	$P(9400 < x \leq 10600)$	=	0,3580
p_5	=	$P(10600 < x \leq 11800)$	=	0,0001
p_6	=	$P(11800 < x \leq 13000)$	=	0,2747
p_7	=	$P(x > 13000)$	=	0,1123

Obtem-se o valor de D^2 , através de:

$$D^2 = \sum_{i=1}^7 \frac{(n_i - 94p_i)^2}{94p_i} = 1,42$$

Adotando-se $\alpha = 5\%$, com $r = 4$ graus de liberdade, tem-se da tabela de qui-quadrado, a constante $C = 9,488$.

Como $D^2 < C$, não se rejeita a hipótese de distribuição normal do parâmetro de elasticidade.

11.4.2.2.2. Aplicação do teste de Pearson - Eucalipto Tereticornis

QUADRO XCIV Intervalo de Classe e Frequência de Resultados

$A_1:$	$x \leq 8765 \rightarrow n_1 = 2$
$A_2:$	$8765 < x \leq 10065 \rightarrow n_2 = 8$
$A_3:$	$10065 < x \leq 11365 \rightarrow n_3 = 8$
$A_4:$	$11365 < x \leq 12675 \rightarrow n_4 = 8$
$A_5:$	$x > 12675 \rightarrow n_5 = 7$

Com $\bar{x}=11133$ MPa ; $s = 1603,7$ MPa, e com auxílio da tabela de distribuição normal, são calculadas as probabilidades:

QUADRO XCV- Cálculo das Probabilidades p_i

p_1	$= P(x \leq 8765)$	$= 0,0708$
p_2	$= P(8765 < x \leq 10065)$	$= 0,1838$
p_3	$= P(10065 < x < 11365)$	$= 0,3011$
p_4	$= P(11365 < x \leq 12675)$	$= 0,2758$
p_5	$= P(x > 12675)$	$= 0,1685$

Obtem-se D^2 , através de:

$$D^2 = \sum_{i=1}^5 \frac{(n_i - 33p_i)^2}{33p_i} = 1,62$$

Adotando-se $\alpha = 5\%$, com $r = 2$ graus de liberdade, tem-se da tabela de qui-quadrado, a constante $C = 5,991$. Como $D^2 < C$, não se rejeita a hipótese de distribuição normal do parâmetro de elasticidade.

11.4.2.2.3. Aplicação do teste de Pearson - Jatobá

QUADRO XCVI Intervalo de Classe e Frequência de Resultados

$A_1:$	$x \leq 17715 \rightarrow n_1 = 6$
$A_2:$	$17715 < x \leq 19715 \rightarrow n_2 = 6$
$A_3:$	$19715 < x \leq 21715 \rightarrow n_3 = 6$
$A_4:$	$21715 < x \leq 23715 \rightarrow n_4 = 8$
$A_5:$	$x > 23715 \rightarrow n_5 = 7$

Com $\bar{x} = 20951$ MPa ; $s = 3095$ MPa, e com auxílio da tabela de distribuição normal, são calculadas as probabilidades:

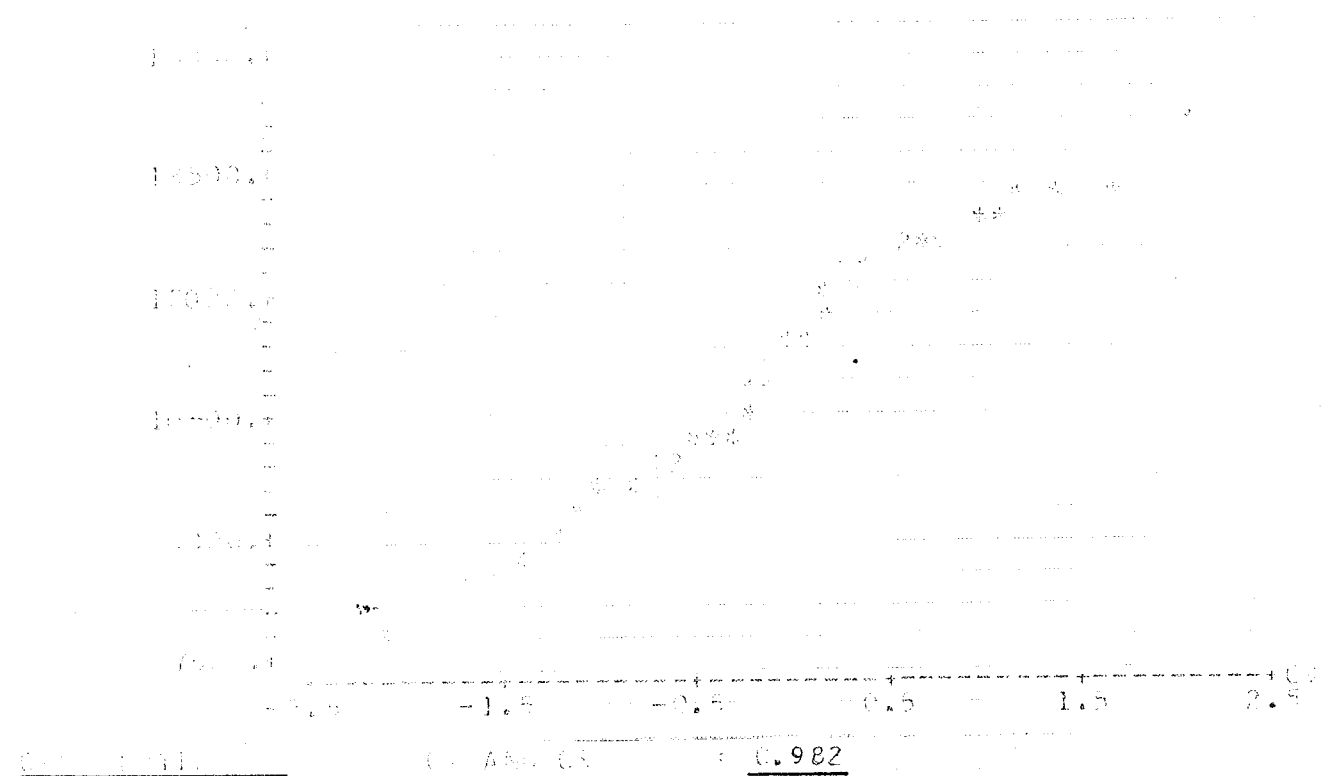
QUADRO XCVII Cálculo das Probabilidades p_i

p_1	$= P(x \leq 17715)$	$= 0,1492$
p_2	$= P(17715 < x \leq 19715)$	$= 0,0310$
p_3	$= P(19715 < x \leq 21715)$	$= 0,6785$
p_4	$= P(21715 < x \leq 23715)$	$= 0,1190$
p_5	$= P(x > 23715)$	$= 0,1122$

ESPÉCIE: Eucalipto Tereticornis

ESPECIE: Eucalipto Tereticornis

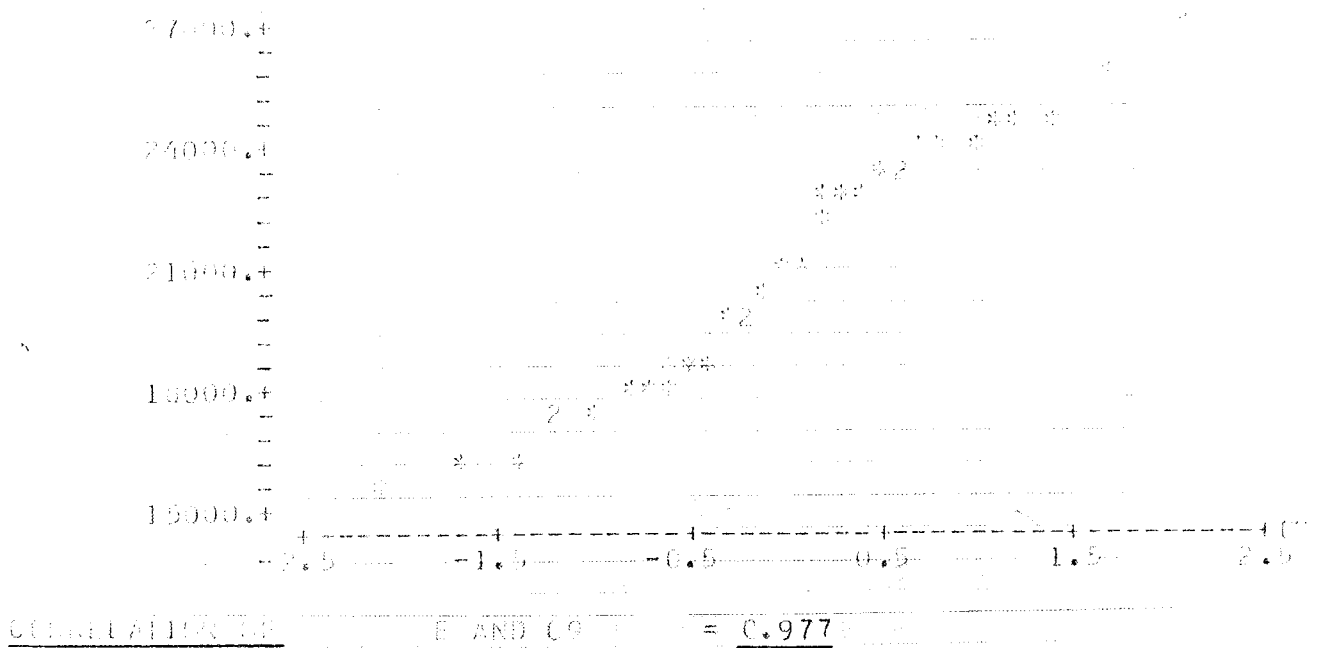
PIST (2) (9)



ESPÉCIE: Jatobã

ESPECIE: Jatobã

PIST (2) (9)



11.4.2.3.2. Conclusão do teste de normalidade

Através dos gráficos apresentados e dos valores de R², o conjunto de resultados experimentais obtidos revela

tendência à distribuição normal.

11.5. Conclusão

Pela análise realizada, conclue-se pela aceitação da hipótese de distribuição normal dos resultados de $E_{21,2f}$, componentes do campo amostral estudado.

12. VALORES CARACTERÍSTICOS DE PROPRIEDADES DA MADEIRA À FLEXÃO ESTÁTICA

12.1. Objetivos

O dimensionamento de estruturas de madeira tem sido feito, no Brasil, por método determinístico: o método das tensões admissíveis (NBR 7190).

Como contribuição para ajustar esta norma aos conceitos atuais de segurança estrutural são apresentadas, neste capítulo, sugestões para a determinação dos valores característicos de propriedades da madeira à flexão estática à luz dos critérios do método semi-probabilístico. Outros trabalhos deverão suceder a este e a abordagem se estenderá até abranger todos os aspectos do problema em questão.

12.2. Resistência característica da madeira à flexão estática

A resistência característica de materiais destinados à utilização em estruturas admitindo-se distribuição normal, é calculada através da expressão:

$$f_k = f_m - ns \quad (12.1)$$

com:

- f_k = valor característico
- f_m = valor médio da distribuição
- n = coeficiente dependente da probabilidade de serem obtidos resultados inferiores a f_k (no caso, 5% de probabilidade)
- s = desvio padrão

sendo esta expressão admitida pelo CEB, 1970 (apud FUSCO, 1976) e pelo Projeto de Norma 2:03.17-004 - AÇÕES E SEGURANÇA NAS ESTRUTURAS (1983).

A simbologia para estes parâmetros está baseada na norma "Símbolos Gráficos para Projetos de Estruturas" e:

f_{wMk} = resistência característica da madeira à flexão estática

f_{wMm} = resistência média à flexão estática (valor médio da distribuição)

s_{wM} = desvio padrão

A equação (12.1) pode ser utilizada se forem conhecidos os valores da média e do desvio padrão das resistências.

A resistência da madeira à flexão estática, como foi visto no capítulo 10, segue uma lei de distribuição normal.

Considerando os conceitos estatísticos a respeito das grandes amostras, apresentados na literatura, admite-se o número de trinta e dois corpos de prova, no mínimo, para se obter uma estimativa satisfatória para a média e o desvio padrão. É conveniente salientar a condição de que, com 95% de probabilidade, o erro relativo da estimativa do desvio padrão não supere 25% .

HELLMEISTER (1973), demonstra ser estatisticamente aceitável para a caracterização de uma espécie de madeira, o mínimo de três árvores, obtidas por amostragem ocasional.

Com base no exposto e na amostragem adotada, são determinados os valores característicos da resistência da madeira à flexão estática.

No QUADRO XCVIII são apresentados os valores característicos da resistência da madeira à flexão estática.

QUADRO XCVIII Resistência característica da madeira à flexão estática

ESPECIE	nº de elementos	f_{wMm} (MPa)	s_{wM} (MPa)	n	f_{wMk} (MPa)
Peroba Rosa	94	81,42	16,66	1,645	54,11
Eucalipto Tereticornis	33	100,06	14,09	1,645	76,87
Jatobá	33	142,42	20,00	1,645	109,52

12.3. Módulo de elasticidade característico da madeira à flexão estática

12.3.1. Generalidades

Atualmente, ao se referirem ao módulo de elasticidade da madeira à flexão estática, como visto no item 2.5.5, do capítulo 2, as normas admitem, para efeito de cálculo, o valor médio das amostras consideradas para caracterização da espécie. Algumas normas como a americana (NDS), a inglesa (CP112) entre outras, apresentam valores característicos do módulo de elasticidade longitudinal, e vão além, introduzindo fatores de correções para umidade, temperatura, defeitos, entre outros.

Outro pormenor a ser considerado nesta apresentação, se refere à observação de deformações excessivas, além das calculadas, em elementos estruturais de madeira (terças-deformações devidas à flexão) e mesmo em estruturas de madeira (treliças-deformações devidas à compressão, à tração e até às lixações) projetadas segundo a NBR 7190. Isto evidencia, entre outros aspectos, as consequências negativas do emprego do valor médio da amostra para o módulo de elasticidade longitudinal, em contraposição com valores característicos e ajustados.

São apresentados, a seguir, alguns valores para o módulo de elasticidade longitudinal característico das espécies estudadas neste trabalho. Estes resultados devem servir de ponto de partida para futuras investigações a respeito do assunto e para um estudo mais amplo com vistas à apresentação de proposta de revisão da NBR 6130 e NBR 7190, no que se refere à determinação do módulo de elasticidade longitudinal da madeira à flexão estática.

12.3.2. Cálculo do módulo de elasticidade longitudinal característico da madeira à flexão estática

De acordo com as conclusões do capítulo 11, os resultados obtidos na experimentação para os módulos de elasticidade longitudinais à flexão estática, se ajustam a uma distribuição normal. As amostras estudadas têm número de elementos superior a 32, conseqüentemente se adaptam à teoria das grandes amostras. Calcula-se o valor característico, como no item 12.2, pela expressão (12.1).

Sugere-se a seguinte simbologia, baseada na norma de "Símbolos Gráficos para Projetos de Estruturas":

E_{wMk} = módulo de elasticidade longitudinal característico da madeira à flexão estática

E_{wMm} = módulo de elasticidade longitudinal médio da madeira à flexão estática

s_{wM} = desvio padrão

No QUADRO XCIX, são apresentados os valores característicos do módulo de elasticidade longitudinal da madeira à flexão estática.

QUADRO XCIX Módulo de Elasticidade Longitudinal Característico da Madeira à Flexão Estática

ESPÉCIE	Nº de elementos	E_{wMm} (MPa)	s_{wM} (MPa)	n	E_{wMk} (MPa)
Peroba Rosa	94	10072	1893	1,645	6958
Eucalipto Tereticornis	33	11133	1603,7	1,645	8494
Jatobá	33	20951	3095	1,645	15859

12.4. Estudo comparativo entre os valores característicos de resistência e de elasticidade e aqueles indicados pela NBR 7190

A partir dos resultados dos QUADROS XCVIII e XCIX é possível estabelecer uma comparação entre os valores característicos de resistência e de elasticidade com os valores indicados pela NBR 7190, no tocante às tensões de ruptura (σ_F) e admissível ($\bar{\sigma}_F$) à flexão estática e ao módulo de elasticidade longitudinal da madeira verde (E_m , NBR 7190-item 2).

Torna-se conveniente expor que os resultados adotados pela NBR 7190, são extraídos do Boletim nº 31-IPT (1956), isto é, σ_F corresponde ao valor $MRF_{12,1f}$ e o valor E_m corresponde

ao valor $E_{14,1f}$.

Para comparar os módulos de elasticidade longitudinal resultantes da mesma razão $l/d = 21$, foram estimados os valores de E_m através da equação (7.8);

$$E_{21,2f} = 371 + 1,11 E_{14,1f}$$

obtendo-se $E_{m,est}$, cuja notação segue a norma "Símbolos Gráficos para Projetos de Estruturas".

Por fim, são apresentados dois quadros, relativos aos parâmetros de resistência e de elasticidade da madeira.

QUADRO C RESULTADOS DA RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA, DA TENSÃO DE RUPTURA E ADMISSÍVEL

ESPÉCIE	f_{wMk} (MPa)	σ_F (MPa)	$\bar{\sigma}_f$ (MPa)	$\frac{f_{wMk}}{\bar{\sigma}_f}$
Peroba Rosa	54,1	89,8	13,4	4,03
Eucalipto Tereticornis	76,8	127,0	19,0	4,04
Jatobá	109,5	134,1	20,1	5,44

QUADRO CI RESULTADOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE CARACTERÍSTICO, INDICADO PELA NBR 6230 E O ESTIMADO

ESPÉCIE	E_{wMk} (MPa)	E_m (MPa)	$E_{m,est}$ (MPa)	$\frac{E_{wMk}}{E_{m,est}}$
Peroba Rosa	6958	9425	10832	0,64
Eucalipto Tereticornis	8494	13320	15156	0,56
Jatobá	15859	18043	20398	0,77

12.5. Conclusões

Para o dimensionamento através do Método Semi Probabilístico, os valores de f_{wMk} devem ser ajustados, através de coeficientes de ponderação, aos valores de cálculo. Estes poderão ser comparados com os valores das tensões admissíveis adotadas pela NBR 7190.

Em relação aos valores característicos do módulo de elasticidade longitudinal, estes são bem menores que os adotados pela NBR 7190, para carga de curta duração (E_m). Entretanto, ainda há necessidade de serem estabelecidos fatores de ajuste para a umidade, a densidade, a temperatura, a duração de carga, entre outros, que naturalmente surgirão nesta área de pesquisa, não sendo objetivo do presente trabalho.

13. VALORES DE CÁLCULO PARA RESISTÊNCIA DA MADEIRA À FLEXÃO ESTÁTICA

13.1. Generalidades

Devido a possíveis imprecisões no cálculo dos esforços solicitantes nos elementos estruturais, da variabilidade das características mecânicas e de deformabilidade dos materiais utilizados em laboratório e da variabilidade das características mecânicas e de deformabilidade dos materiais utilizados no laboratório e para os utilizados na construção, os métodos atuais de segurança estrutural recomendam para o projeto a adoção dos valores de cálculo para a resistência obtidos a partir dos valores característicos correspondentes, pela sua divisão por coeficientes de ponderação adequados para garantir a segurança das estruturas.

13.2. Resistências de cálculo

As resistências de cálculo dos materiais, indicadas por f_d , são expressas segundo o projeto de norma 2:03.17-004 - AÇÕES E SEGURANÇA NAS ESTRUTURAS (1983) por:

$$f_d = \frac{f_m}{\gamma_m} \quad (13.1)$$

sendo: f_m = resistência característica do material

γ_m = coeficiente de ponderação

O coeficiente γ_m é obtido a partir da multiplicação de outros três coeficientes:

$$\gamma_m = \gamma_{m1} \gamma_{m2} \gamma_{m3} \quad (13.2)$$

com γ_{m1} medindo a variabilidade da resistência efetiva, transformando a resistência característica num valor extremo de menor probabilidade de ocorrência; γ_{m2} considerando as diferenças entre a resistência efetiva do material da estrutura e a resistência medida convencionalmente em corpos de prova padronizados e

γ_{m3} considerando as incertezas existentes na determinação das solicitações resistentes, seja pelos métodos construtivos ou do cálculo empregado.

13.3. Objetivos

Tendo examinado, no capítulo anterior, a resistência característica da madeira à flexão estática, torna-se objetivo efetuar uma avaliação preliminar dos coeficientes γ_{m1} , γ_{m2} e γ_{m3} , e consequentemente de f_d para a madeira, ou precisamente para a amostra ensaiada no trabalho desenvolvido.

13.4. Estudo dos coeficientes γ_{m1} , γ_{m2} e γ_{m3} para a madeira

13.4.1. Estudo de γ_{m1}

Considerando-se uma minoração da resistência característica como valor correspondente ao quantil inferior de 5% da distribuição de frequência das resistências características das amostras retiradas do universo original, o parâmetro z , de uma distribuição normal vale 1,645. Com ele, é possível se determinar o valor característico da distribuição normal das resistências características obtidas com base em grandes amostras provenientes do universo original.

No caso da flexão estática em peças de madeira, pode ser considerado o seguinte aspecto: os resultados do QUADRO XCVIII, do item 12.2., permitem observar que os valores de f_{wMk} podem ser obtidos a partir de f_{wMm} pela divisão por um fator α , como indicado a seguir:

$$f_{wMm} - 1,645 s_{wM} = \frac{f_{wMm}}{\alpha} \quad (13.3)$$

Assim, para a Peroba Rosa: $f_{wMk} = f_{wMm}/1,50$, para o Eucaliptus Tereticornis: $f_{wMk} = f_{wMm}/1,30$ e para o Jatobá: $f_{wMk} = f_{wMm}/1,30$. De modo análogo, pode-se pensar num coeficiente $\gamma_{m1} = 1,50$, como ponto de partida para novas considerações a respeito deste coeficiente, não se restringindo entretanto na utilização à flexão estática.

13.4.2. Estudo de γ_{m2}

O coeficiente γ_{m2} objetiva levar em conta as diferenças existentes entre a resistência do material de dimensões estruturais, efetivamente utilizado nas obras, e a resistência do material, de dimensões padronizadas, utilizada nos ensaios de laboratório.

No capítulo 9, foram realizados ensaios de flexão estática em corpos de prova de Peroba Rosa (dicotiledônea), de pequenas dimensões - $2 \times 2 \times 30 \text{ cm}^3$, padronizadas pela NBR 6230, em corpos de prova de dimensões - $5 \times 5 \times 120 \text{ cm}^3$, (adotadas no LAMEM) e em peças de grandes dimensões - $6 \times 6 \times 360 \text{ cm}^3$, de uso corrente em estruturas de madeira, tendo em vista estimar a variação da resistência em função da variação das dimensões.

Neste caso a redução verificada na resistência chegou a quase 20%. As razões ℓ/d adotadas foram 12 e 21, porém para este tipo de comparação seria conveniente estabelecer uma única razão, em vista da variação da resistência com ℓ/d , como mostrado por Baumann.

SILVA (1942), estudando o problema da variabilidade da resistência em função das dimensões das peças de madeira, fez ensaios de flexão estática seguindo o método da ASTM D198, com peças de Pinho do Paraná (conífera), de dimensões $7,62 \times 15,24 \times 200 \text{ cm}^3$ e comparou os resultados obtidos com os de peças de $2 \times 2 \times 30 \text{ cm}^3$, de acordo com a NBR 6230.

Constatou redução na resistência de 31,5%. É conveniente destacar que as razões ℓ/d adotadas por Silva, não são iguais para os dois tamanhos de corpos de prova e esta diferença pode ter introduzido alguma perturbação no valor da redução 31,5%. No QUADRO LXXIII, do item 9.4., são apresentados os resultados obtidos por Silva.

Neste trabalho, é adotado para γ_{m2} o valor 1,20, prevendo-se possíveis e naturais sugestões para discussão e futuras investigações.

13.4.3. Estudo de γ_{m3}

Os aspectos considerados para adoção de γ_{m3} foram apresentados no item 13.2.

A partir daquelas considerações, pensou-se em estabelecer uma abordagem inicial a respeito de γ_{m3} , com base na experiência do LaMEM, em experimentação de elementos estruturais tipicamente sujeitos à flexão estática (vigas de pontes, terças, etc).

MIWA e HELLMEISTER (1973), LARA PINTO (1983), entre outros, estudando o comportamento de peças de madeira à flexão estática, em peças de Pinho do Paraná e Peroba Rosa, admittiram e constataram linearidade das deformações e das tensões normais até o limite de proporcionalidade. Após este limite, foi obtido um diagrama linear na parte tracionada e parabólico na parte comprimida. Como conclusão final, houve acréscimo de cerca de 20% no valor da resistência quando comparada com a obtida através da equação clássica da teoria da elasticidade.

Todavia, analisando-se a literatura, observou-se que ZAKIC (1973), investigando a razão entre o momento fletor da ruptura em peças de madeira da espécie poplar (*Populus Euroamericana*) obtido por um equacionamento próprio e o momento obtido pela formulação clássica da teoria da elasticidade, constatou que esta razão poderia chegar a 1,76. A respeito das deformações e tensões normais, estas seguem, na fase elástica, comportamento similar ao indicado pelo estudo no LaMEM e, após esta fase, seguem lei linear-parabólica (ver item 2.2.1.1.).

Com base nestas constatações, por ora, admite-se para γ_{m3} o valor 1,76.

13.5. Estimativa da resistência de cálculo para as espécies estudadas

Neste item é apresentada uma estimativa da resistência à flexão estática para a Peroba Rosa, Eucalipto Tereticornis e Jatob , fundamentada nas considerações dos itens 13.4.1, 13.4.2 e 13.4.3. Naturalmente, trata-se de apenas uma estimativa, com base em coeficientes estabelecidos na análise de resultados de coníferas (γ_{m3}) e em outras observações fundadas em resultados até certo ponto de vista isolados, compatíveis com esta primeira aproximação para estimar f_{wMd} .

A seguir é apresentado um quadro com os valores estimados de f_{wMd} para as espécies estudadas neste trabalho.

QUADRO CII Resistências de Cálculo para as Espécies Estudadas

ESPÉCIE	f_{wMk} (MPa)	γ_{m1}	γ_{m2}	γ_{m3}	γ_m	f_{wMd} (MPa)
Peroba Rosa	54,0	1,50	1,20	1,76	3,16	17,0
Eucalipto Tereticornis	76,8	1,50	1,20	1,76	3,16	24,2
Jatobá	109,5	1,50	1,20	1,76	3,16	34,6

13.6. Comparação entre os valores da resistência de cálculo e das tensões admissíveis (NBR 7190)

Para efeito de comparação, se fôr considerado o critério da NBR 7190, para a determinação da tensão admissível à flexão estática $\bar{\sigma}_f$, das espécies de madeira estudadas, utilizando os valores $\bar{\sigma}_f$ apresentados no Boletim nº 31, do IPT, tem-se o seguinte quadro:

QUADRO CIII Resistência de Cálculo e Tensões Admissíveis para as Espécies Estudadas

ESPÉCIE	f_{wMd} (MPa)	$\bar{\sigma}_f$ (MPa)	$\frac{f_{wMd}}{\bar{\sigma}_f}$
Peroba Rosa	17,0	13,4	1,27
Eucalipto Tereticornis	24,2	19,0	1,27
Jatobá	34,5	20,1	1,69

Observam-se resultados próximos para f_{wMd} e $\bar{\sigma}_f$. A diferença existente não pode, entretanto, ser cogitada como definitiva, devido à não perfeita adequação das estimativas de γ_{m1} , γ_{m2} e γ_{m3} , não obstante ter ocorrido $f_{wMd} > \bar{\sigma}_f$, de acordo expectativa geral dos estudiosos da madeira aplicada estruturalmente. A tendência, no futuro, é analisar o coeficiente γ_m a partir de um número de resultados experimentais bem maior, outras espécies de madeiras (incluindo coníferas) e sob a ótica de uma formulação específica para o cálculo da resistência à flexão estática da madeira, fixando-se os conceitos para a determinação de γ_m .

14. INTRODUÇÃO À IDEIA DA ACEITAÇÃO OU REJEIÇÃO DE UM LOTE DE MADEIRA

14.1. Generalidades

No capítulo 12 foram estimados os valores característicos da madeira à flexão estática, a partir de uma grande amostra obtida aleatoriamente, de modo a caracterizar uma espécie de madeira.

Em decorrência deste fato, no capítulo 13, foram estudados os valores de cálculo, os quais serão utilizados na definição dos parâmetros de cálculo dos elementos estruturais e de estruturas com peças desta espécie.

Todavia, em relação ao porte da obra projetada, pode ser necessário o conhecimento das propriedades, inerentes à madeira, do lote a ser empregado na respectiva construção. Disto, surgem questões típicas, como:

- a madeira recebida apresenta qualidade dentro dos padrões requeridos pelo projeto?

- os valores das resistências utilizadas no projeto estão representados no lote considerado?

Estas questões surgem do fato de não existirem, no país, prescrições de norma para se proceder à classificação das peças de madeira usadas estruturalmente. Se esta prescrição fosse disponível e seu uso obrigatório, o construtor teria condições de garantir a segurança de sua estrutura.

No LaMEM, já foram desenvolvidos trabalhos no sentido de se sugerir um procedimento expedito para a classificação das peças estruturais para emprego em determinada obra. Fundamentalmente, não se trata da ideia de aceitação ou rejeição de um lote de madeira, e sim da estimativa, através de ensaios não destrutivos, do módulo de elasticidade longitudinal à flexão estática das peças. Conhecidos estes valores, as peças com módulo mais elevado são, adequadamente, colocadas nas regiões mais solicitadas e vice-versa. (ver item 2.3)

Entretanto, nestas condições, a ideia da aceitação ou da rejeição de um lote de madeira, ainda está associada à necessidade da realização de ensaios de laboratório. (ver item 4.1).

No capítulo 4, foram estudadas e analisadas estas considerações, com a determinação de relações entre parâmetros de ruptura e de elasticidade, através de um pequeno número de corpos de prova (seis).

A seguir, são apresentadas definições básicas, necessárias para a estimativa, em primeira instância, de valores característicos de um lote de madeira e da sua consequente aceitação ou rejeição.

14.2. Intervalo de confiança da média

O intervalo de confiança da média de uma população, com desvio padrão conhecido, é determinado por:

$$\bar{x} - u(P\%) \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + u(P\%) \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (14.1)$$

sendo: \bar{x} = média aritmética da amostra

n = número de elementos da amostra

$u(P\%)$ = valor de u associado à probabilidade especificada (distribuição normal)

σ = desvio padrão da população

A determinação das propriedades à flexão estática de uma espécie de madeira é feita a partir de um número de elementos suficientes para caracterizar uma grande amostra. Como constatado no capítulo 10, as resistências à flexão estática apresentam distribuição normal, possibilitando-se assumir para uma grande amostra seu desvio padrão (s) como sendo bom estimador do desvio padrão do universo original.

Assim:

$$\bar{x} - u(P\%) \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + u(P\%) \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (14.2)$$

14.3. Número mínimo de corpos de prova

No item 4.3.2. , do capítulo 4, já foi estudada a importância da utilização de um número mínimo de corpos de prova, sua representatividade estatística, e sua aplicação para a revisão da NBR 6230, no item relativo à flexão estática.

Determinou-se através da expressão (4.10), o número mínimo de corpos de prova, sendo igual a seis (6).

É aceito desta maneira, como suficiente o ensaio de 6 corpos de prova para determinação da média da resistência da madeira à flexão estática de um lote e seu intervalo de confiança é dado por:

$$\bar{x} - t (P\%) \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + t (P\%) \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (14.3)$$

sendo: $t(P\%)$ = valor de t com uma probabilidade específica (distribuição de Student).

14.4. Determinação do f_{WMk} com o número mínimo de corpos de prova

Com a utilização de seis corpos de prova, pode-se estimar a média aritmética da resistência da madeira à flexão estática em estudo, não se devendo estimar o desvio padrão, devido ao tamanho da amostra (seis elementos).

À vista disto, não é possível a determinação de f_{WMk} através da expressão:

$$f_{WMk} = f_{WMm} - t (5\%) s_{WM} \quad (14.4)$$

pois, de acordo com FUSCO (1977): "a baixa precisão da estimativa s_x do desvio padrão não pode ser compensada por uma alteração da função que rege a distribuição de probabilidades do universo considerado". Com efeito, se a amostra é pequena não permite uma estimativa adequada ao desvio padrão das resistências, surgem considerações a respeito de estimar f_{WMk} por outros processos.

14.5. Estimador para o f_{WMk} de um lote

Em primeira aproximação, sugere-se (prevendo-se o prosseguimento da discussão e posteriores estudos) o emprego de um estimador para a madeira, análogo ao da NBR 6118 (Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado), item 15.1.2., no qual o valor estimado da resistência característica à compressão é expresso por:

$$f_{ck,est} = \psi_6 f_1 \quad (14.5)$$

quando as resistências $f_1 \leq f_2 \leq \dots \leq f_n$, de n exemplares ensaiados, são conhecidas, e com ψ_6 tabelado em função do número de exemplares.

Relativamente à resistência da madeira à flexão estática, foi determinado o número mínimo de seis (6) corpos de prova obtidos aleatoriamente. Com os resultados ordenados: $f_{WM1} \leq f_{WM2} \dots \leq f_{WM6}$, a resistência é estimada por:

$$f_{WMk,est} = \psi_6 f_{WM1} \quad (14.6)$$

sendo para $\delta = 0,175$ e 6 corpos de prova: $\psi_6 \cong 0,89$.

14.6. Um critério de decisão

Realizada a estimativa de f_{WMk} de um lote de madeira e tendo o conhecimento de f_{WMk} da espécie utilizada no projeto, há necessidade de um critério de decisão que possibilite rejeitar ou não o lote de madeira a ser empregado na obra.

Uma primeira idéia para esse critério seria: realizar seis (6) ensaios com os corpos de prova obtidos aleatoriamente do lote de madeira, obtendo-se uma estimativa da resistência média do lote. Se a resistência média do lote não estiver dentro do intervalo de confiança da média da população, o lote deve ser rejeitado.

Entretanto, se a resistência estiver dentro do intervalo da média da população, estima-se o valor da resistência característica da madeira à flexão estática por: $f_{WMk,est} = \psi_6 f_{WM1}$, não se tomando, em primeira aproximação, valor maior que 0,85 da média aritmética das resistências dos n exemplares.

Como no caso de controle assistemático, com seis exemplares (NBR 6118, item 15.1.2.1).

Estando $f_{WMk,est}$ dentro do especificado acima, o lote não será rejeitado se:

$$f_{WMk,est} \geq \alpha f_{WMk} \quad (14.7)$$

sendo o valor de $\alpha = 0,9$, segundo FUSCO (1977), e com a ressalva de ser uma primeira estimativa proposta, com a previsão de possíveis alterações.

No caso de $f_{wMk,est} < 0,9 f_{wMk}$, \bar{e} rejeitado o lote ou alterado o projeto, com $f_{wMk,est}$ no lugar de f_{wMk} até então utilizado.

14.7. Exemplo de aplicação

A partir dos resultados de $MRF_{14,1f}$ (item 3.5.2), \bar{e} apresentado, no quadro a seguir, o intervalo de confiança da resistência média, utilizando-se a expressão (14.1):

QUADRO CIV Estimativa do Intervalo de Confiança da Resistência Média à Flexão Estática com $\Delta P\% = 90\%$

ESPÉCIE	nº de elementos	Intervalo de confiança (MPa)
Peroba Rosa	94	$78,6 \leq \mu x \leq 84,2$
Eucalipto Tereticornis	33	$96,0 \leq \mu x \leq 104,1$
Jatobá	33	$136,7 \leq \mu x \leq 148,1$

Tomando-se, aleatoriamente, seis resultados da população de Peroba Rosa e, analogamente, para o Eucalipto Tereticornis e para o Jatobá, obtém-se o quadro:

QUADRO CV Valores de f_{wMi} ($i = 1, \dots, 6$) para as espécies estudadas

ESPÉCIE:	Peroba Rosa	Eucalipto Tereticornis	Jatobá
f_{wM1}	69,0	71,0	112,0
f_{wM2}	70,0	75,0	115,0
f_{wM3}	75,0	97,0	134,0
f_{wM4}	82,0	100,0	148,0
f_{wM5}	88,0	118,0	159,0
f_{wM6}	110,0	128,0	169,0
Média	82,3 MPa	98,2 MPa	139,5 MPa

Comparando-se as médias apresentadas nos QUADROS CIV e CV, nota-se que elas se encontram no intervalo de confiança das médias da população. Em seguida, estima-se o valor de f_{wMk} através de $f_{wMk,est} \approx 0,89 f_{wM1}$, comparando-se o valor com:

$$f_{wMk,est} \leq \frac{0,85 \sum_{i=1}^6 f_{wMi}}{6} \quad (14.8)$$

Os valores são apresentados no quadro a seguir:

QUADRO CVI Verificação do Critério de Decisão para as Espécies de Madeira Estudadas

ESPÉCIES	$f_{wMk,est}$ (MPa)	$0,9 f_{wMk}$ (MPa)	Conclusão
Peroba Rosa	61,4	48,7	Lote não rejeitado, projeto não modificado
Eucalipto Tereticornis	63,2	69,2	Lote rejeitado ou projeto alterado com $f_{wMk,est}$ no lugar de f_{wMk}
Jatobá	99,7	98,6	Lote não rejeitado; projeto não modificado

14.8. Comentários

Este capítulo objetiva lançar a idéia da aceitação ou rejeição de um lote de madeira, visto não existirem prescrições nas normas brasileiras no assunto.

Esta primeira sugestão para exposição da idéia baseada em um dos critérios da NBR 6118, pois trata-se de tópico amplamente discutido e estudado para o concreto. Optou-se por ele como ponto de partida para estudo e discussão do problema aplicado à madeira.

15. CONCLUSÕES E PROPOSTAS

No transcorrer desta pesquisa, a respeito de alguns tópicos da Flexão Estática em peças de madeira, muitas observações (conclusões e proposições) foram realizadas, entre as quais são ressaltadas, aqui, as mais significativas.

- Os parâmetros de elasticidade longitudinal são bons estimadores do parâmetro de ruptura à flexão estática. O modelo linear para correlacionar estes parâmetros foi considerado o mais satisfatório entre aqueles testados.

- A abordagem geral da madeira para a determinação de suas propriedades envolve o estudo de várias espécies componentes do respectivo universo, ocupando cada espécie um intervalo numérico de resultados.

- A adoção de seis corpos de prova para estabelecer uma função estimadora dos valores médios de resistência através do parâmetro de elasticidade E ($E_{21,2f}$, $E_{21,1f}$ e $E_{14,1f}$) revela-se estatisticamente adequada.

- O parâmetro de elasticidade E não é, isoladamente, um bom estimador do parâmetro de elasticidade G , havendo a necessidade da consideração de outras variáveis nesta análise. Isto evidencia a ortotropia da madeira.

- Os parâmetros de elasticidade $E_{21,2f}$ e $E_{21,1f}$ são estatisticamente equivalentes.

- A aplicação da expressão simplificada da flecha $a = F\ell^3/48EI$ é aconselhada para os valores de E , obtidos com carga central e $\ell/d = 21$. Para valores de E obtidos a partir de razões $\ell/d < 21$, é conveniente a aplicação da expressão completa da flecha ou a transformação deste valor de E para $E_{21,1f}$, através de expressão do tipo (7.6): $E_{21,1f} = 371,0 + 1,11 E_{14,1f}$.

- Com base na análise estatística aplicada aos resultados da experimentação, o Módulo de Ruptura à Flexão independe das dimensões do corpo de prova: $2 \times 2 \times 30 \text{ cm}^3$ (NBR 6230) ou $5 \times 5 \times 120 \text{ cm}^3$ (adotado).

- O Módulo de Ruptura à Flexão apresentou uma redução de 20%, dos corpos de prova $5 \times 5 \times 120 \text{ cm}^3$ para os de $6 \times 16 \times 360 \text{ cm}^3$.

- Através da análise estatística dos resultados

experimentais obtidos e de resultados apresentados na literatura consultada, tornou-se evidente o fato das resistências à flexão estática revelarem distribuição normal. Com efeito, foi possível estabelecer o valor característico da resistência à flexão estática para as espécies de madeira estudadas. De modo análogo, foi possível estender este conceito ao módulo de elasticidade longitudinal da madeira.

- Os conceitos referentes aos valores de cálculo, com base na adoção do coeficiente de ponderação γ_m , como produto dos coeficientes γ_{m1} , γ_{m2} e γ_{m3} , e referentes a idéia da aceitação ou rejeição de um lote de madeira, devem continuar em discussão. Estudos deverão ser conduzidos a respeito da distribuição efetiva de tensões normais na flexão estática, principalmente na fase posterior à elástica; das condições de exposição da peça na estrutura, da variabilidade dos parâmetros de resistência e elasticidade obtidos em laboratório e em obras, e da variabilidade dos resultados obtidos em ensaios de laboratório para outras espécies de dicotiledôneas, além das aqui estudadas, bem como para as coníferas.

- É proposta a seguinte metodologia para ensaio de peças de madeira à flexão estática:

. Dimensões nominais de corpo de prova $5 \times 5 \times 120 \text{ cm}^3$, com direção ocasional das camadas de crescimento.

. Umidade igual ou superior ao ponto de saturação.

. Apoios articulados (sistema estaticamente determinado), com forma cilíndrica de 1,5 cm de raio. (NBR 6230)

. Aplicação de carga através de um cutelo central com 8,5 cm de raio. (NBR 6230)

. Placa de aço entre o apoio e o corpo de prova de $0,15 \times 2 \times 5 \text{ cm}^3$.

. Placa de aço para os apoios (fixo e móvel), de $1,5 \times 15 \times 20 \text{ cm}^3$.

. Velocidade de carga: 10 MPa/min e flechas medidas por meio de um relógio comparador posicionado de forma a registrar o deslocamento de um ponto situado na linha neutra. As leituras são realizadas com a aproximação de 0,01 mm. (NBR 6230)

- 1º Ensaio: carga central, $l/d = 14$, carregamento (F) conduzido na fase elástica. Determinação da flecha no ponto médio do vão, em função de E e G. (Ver fig. 65)

— 2º Ensaio: carga central, $l/d = 21$, carregamento até a ruptura. Determinação da flecha, até o limite de proporcionalidade, em função de E, e da carga de ruptura, F_{max} . (ver Fig. 61)

. Cálculos:

$$E = \frac{2315,25 F}{ab} \quad (15.1)$$

$$G = \frac{4,2 FE}{abE - 686F} \quad (15.2)$$

$$MRF = \frac{31,5 F_{max}}{bd} \quad (15.3)$$

sendo: b = largura do corpo de prova (cm)

d = altura do corpo de prova (cm)

a = flecha (cm)

F = carga no limite de proporcionalidade (N)

F_{max} = carga na ruptura (N)

E, G e MRF em N/cm^2 .

Para conversão em MPa, basta dividir os resultados por 100.

. Número de corpos de prova:

Para caracterização de uma espécie: mínimo 32 corpos de prova.

Os corpos de prova devem ser obtidos ao acaso de pelo menos 3 árvores de uma região.

. Para caracterização de um lote: mínimo 6, obtidos aleatoriamente.

16. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- JAYNE, B.A. & SUDDARTH, S.K. - Matrix tensor mathematics in orthotropic elasticity. In: ASTM - Orientation effects in the mechanical behavior of anisotropic structural materials. Philadelphia, ASTM, 1966. p.39-58. (ASTM STP 405).
- HEARMON, R.F.S. - The elastic constants of wood. In: _____ - The elasticity of wood and plywood. London, His Majesty's Stationery Office, 1948. p.5-44. (Forest Products Research - Special Report, 7) part. I.
- ETHINGTON, R.L. & HILBRAND, H.C. - Anisotropy in wood. In: ASTM - Orientation effects in the mechanical behavior of anisotropic structural materials. op. cit. p.21-38.
- KOLLMANN, Franz F.P. & CÔTÉ JR., Wilfred A. - Mechanics and Rheology of wood. In: _____ - Principles of wood science and technology: solid wood. Berlin, Springer-Verlag, 1968. p.292-419. V.I.
- BODIG, Jozsef & JAYNE, Benjamin A. - Orthotropic elasticity. In: _____ - Mechanics of wood and wood composites. New York, Nostrand Reinhold, 1982. cap. 3, p.87-126.
- JAYNE, B.A. & SUDDARTH, S.K. - loc., cit.
- BODIG, J. & JAYNE, B.A. - loc., cit.
- Loc., cit.
- LAHR, Francisco Antonio Rocco - Sobre a determinação de propriedades de elasticidade da madeira. São Carlos, LaMEM -EESC-USP, 1983. 221p. (Tese de Doutorado).
- TIMOSHENKO, Stephen P. - Deformação das vigas carregadas transversalmente. In: _____ - Resistência dos materiais. Rio de Janeiro, Livro Técnico, 1971. p.147-182. cap. V.

SCHIEL, Frederico - Introdução à resistência dos materiais.
6.ed. São Carlos, EESC-USP, 1976. 137p, fasc. I.

Loc., cit.

Loc., cit.

KOLLMANN, F.F.P. & CÔTÉ JR., W.A. - loc., cit.

TIMOSHENKO, S.P. & GOODIER, J.N. - Problemas bidimensionais em coordenadas polares. In: _____ - Teoria da elasticidade.
3.ed. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1980. p.63-146.
cap.4.

LIU, Jen Y. - Shear strength of wood beams: a weibull analysis.
Journal of the Structural Division, 106 (10) : 2035-2052,
Oct. 1980.

BODIG, J. & JAYNE, B.A. - Application of elastic theory to simple systems. op. cit. cap.4. p.127-175.

KOLLMANN, F.F.P. & CÔTÉ JR., W.A. - loc., cit.

NEWLIN, J.A. & TRAYER, G.W. - Deflection of beams with special reference to shear deformations: the influence of the form of a wooden beam on its stiffness and strength. - I. Madison, USDA-FS-FPL, 1956. 19p.

KRAHNER, R.L. & SLEBEN, H.U. - Effect of span-to-depth ratio on modulus of elasticity of Douglas fir joists. Forest Products Journal, 18 (1) : 81-83, Jan. 1968. (Technical Note).

BODIG, J & JAYNE, B.A. - op. cit. cap.4, p.127-175.

LAHR, F.A.R. - loc., cit.

BODIG, J. & JAYNE, B.A. - op. cit. cap.4, p.127-175.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. - Standard methods of testing small clear specimens of timber - D 143-52. In: _____ - 1981 Annual Book of ASTM Standards. - Part. 22 : Wood; adhesives. Philadelphia, ASTM, 1981. p.59-116.

BODIG, J & JAYNE, B.A. - op. cit. cap.4, p.127-175.

NEWLIN, J.A. & TRAYER, G.W.- loc., cit.

KRAHNER, R.L. & SLEBEN, H U. - loc., cit.

LAHR, F.A.R. - loc., cit.

BODIG, J. & COODMAN, James R.- Prediction of elastic parameters for wood. Wood Science, 5 (4) : 249-264, Apr. 1973.

KOLLMANN, F.F.P. & CÔTÉ JR., W.A. - loc., cit.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM-D 143-52.
loc., cit.

Loc., cit.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Ensaio físicos e mecânicos de madeiras - NBR 6230/80. Rio de Janeiro, ABNT, 1980. 16p.

Id. - Cálculo e execução de estruturas de madeira -NBR 7190/82. Rio de Janeiro, ABNT, 1982. 23p.

Id. - NBR 6230/80. loc., cit.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG - Prüfung Von Holz Biegeversuch-
DIN 52-186. Berlin, Springer-Verlag, 1978. 3p.

BRITISH STANDARD - Methods of tests for determination of certain physical and mechanical properties of timber in structural sizes - BS 5820. s.l., BS, 1979. 6p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM - D 143-52.
loc., cit.

Id. - Standard methods of static tests of timbers in structural sizes. - D 198-76. In: _____ - 1981 Annual Book of ASTM Standards - Part 22 : Wood; Adhesives. Philadelphia, ASTM, 1981. p.121-146.

BRITISH STANDARD - loc., cit.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. - ASTM - D 198-76.
loc., cit.

TIMOSHENKO, S.P. - Deformação das vigas carregadas transversalmente. loc., cit.

RAMOS JR., Agustin N. - Stress-strain distribution in Douglas-fir beams within the plastic range. Madison, USDA, FS, FPL, 1961. 30p.

ZAKIC, Borislav D. - Inelastic bending of wood beams. Journal of the Structural Division, 99 (10) : 2079-2095, Oct. 1973.

KOLLMANN, F.F.P. & CÔTÉ JR., W.A. - loc., cit.

Loc., cit.

L'ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION - Bois (méthodes d'essais UF) : essai de flexion statique. - B5 - 28. Paris, AFNOR, 1942. 4p.

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL - Especificações (E 74-1960) : madeiras - ensaio de flexão estática. Lisboa, LNEC, 1961. 5p. (série B - secção 5).

KOLLMANN, F.F.P. & CÔTÉ JR., W.A. - loc., cit.

BROCHARD, François-Xavier - Caractéristiques mécaniques. In: _____ - Bois et charpentes en bois : le matériaux et son utilisation. Paris, Eyrolles, 1960. p.81-132. (Collection de L'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics).

RAMOS JR., A.N. - loc., cit.

KARLSEN, G.G. - The mechanical properties of wood and the quality requirements of timber for the members of wooden structures. In: _____ - Wooden Structures. Moscou, Mir, 1967. p.22-40.

ZAKIC, B.D. - loc., cit.

PINTO, Márcio de Lara - Flexão em peças de madeira. São Carlos, LaMEM-EESC-USP, 1983. 132p. (Dissertação de Mestrado).

KOLLMANN, F.F.P. & CÔTÉ JR., W.A. - loc., cit.

BREGHTEL, S.C. & NORRIS, Charles B. - Strength of wood beams of rectangular cross section as affected by span-depth ratio. Madison, USDA,FS,FPL, 1959. 42p.

BOHANNAN, Billy - Structural engineering research in wood. Journal of the Structural Division, 94 (2) : p.403-415, Feb. 1968.

NEWLIN, J.A. & TRAYER, G.W. - loc., cit.

BOHANNAN, B. - loc., cit.

NATIONAL FOREST PRODUCTS ASSOCIATION - National design specification for wood constructions. Washington, N.F.P.A., 1977. 78p.

AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION - Timber construction manual. 2.ed. New York, John Wiley & Sons, 1974.

BOHANNAN, B. - loc., cit.

SILVA, Hugo Cardoso da - Ensaio estáticos de madeiras em dimensões estruturais. Rio de Janeiro, Instituto Nacional de Tecnologia, 1942. 35p.

MIWA, Roberto T. - Flexão em peças de madeira. São Carlos, LaMEM-EESC-USP, 1973. 122p. (Relatório nº1, Bolsa de Aperfeiçoamento I - FAPESP).

BODIG, J. & JAYNE, B.A. - Failure. op. cit. cap.7, p.280-334.

Loc., cit.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 6230/80
loc., cit.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG - DIN 52-186. loc., cit.

BRITISH STANDARD - BS 5820. loc., cit.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D 143-52
loc., cit.

Id. - ASTM - D 198-76 - loc., cit.

L'ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION - B 5-28. loc., cit.

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL - loc., cit.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - Standard methods for establishing structural grades and related allowable properties for visually graded lumber - D 245-74. In: _____ - 1981 Annual Book of ASTM Standards - Part. 22 : wood; adhesives. Philadelphia, ASTM, 1981. p.147-170.

WALTERS, C.S. & REISS, W.L. - Predicting modulus of rupture from modulus of elasticity for small, clear specimens of oak and cottowood. Forest Products Journal, 27 (6) : 51-53, June, 1977.

GALLIGAN, W.L. ; SNODGRASS, D.V. ; CROW, G.W. - Machine stress rating: practical concerns for lumber producers. USDA-FS-FPL, Mad., Wis., 1977. 82p. (Gen. Tech. Rep. FPL-7).

KOLLMANN, F.F.P. & CÔTÉ JR., W.A. - loc., cit.

JOHNSON, J.W. - Relationships among moduli of elasticity and rupture: seasoned and unseasoned coast-type Douglas-fir and seasoned western hemlock. In: SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD, 2, Proc's., April, 1965. p.419-459.

WALTERS, C.S. & REISS, W.L. - loc., cit.

GALLIGAN, W.L. ; SNODGRASS, D.V. ; CROW, G.W. - loc., cit.

FREITAS, Amantino Ramos de - Probabilistic approach in the design of wood structures in Brazil based on the variability of 23 species. São Paulo, IPT Divisão de Madeiras, 1978. 77p. (Publicações IPT nº 1198).

ATHERTON, George H. - Preliminary study of proportional limit as a predictor of ultimate strength in bending. Forest Products Journal, 30 (11) : 47-53, Nov. 1980.

HOOLEY Roy F. & HIBBERT, P.D. - Stress concentration in timber beams. Journal of the Structural Division, 93 (2): 127-139, Apr. 1967.

PINTO, M.L. - loc., cit.

LAHR, F.A.R. - loc., cit.

FURIATI, Marcos - Classificação estrutural de peças de madeira. São Carlos, LaMEM-EESC-USP, 1981. 131p. (Dissertação de Mestrado).

MELO, Júlio Eustáquio de - Classificação mecânica de peças estruturais de madeira. São Carlos, LaMEM-EESC-USP, 1984. 84p. (Dissertação de Mestrado).

MATEUS, Tomãs I.E. - Os fatores de que depende a resistência mecânica da madeira. In: _____ - Bases para o dimensionamento de estruturas de madeira. Lisboa, LNEC, 1962. p.57-118. cap.VI. (Memória nº 179).

JOHNSON, J.W. - loc., cit.

OZELTON, E.C. & BAIRD, J.A. - Stress levels for solid timber. In: _____ - Timber designers' manual. London, Erosby Lock-Wood Staples, 1976. p.24-37. cap.2.

FREITAS, A.R. - loc., cit.

BODIG, J. & JAYNE, B.A. - Determination of mechanical properties. op.cit. cap.9, p.394-460.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. - NBR 7190/82.
loc., cit.

Id. - NBR 6230/80. loc., cit.

MADSEN, Borg - Strength values for wood and limit states design.
Canadian Journal of Civil Engineering, 2 : 270-279, 1975.

NATIONAL FOREST PRODUCTS ASSOCIATION - loc., cit.

AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION - loc., cit.

CONSEIL INTERNATIONAL DU BATIMENT - Structural timber design code. 5.ed. — CIB, Aug. 1980. 42p. (Working Group W18 - Timber Structures) 9 cap.

OZELTON, E.C. & BAIRD, J.A. - loc., cit.

MADSEN, B. - loc., cit.

MATEUS, T.I.E. - loc., cit.

NATIONAL FOREST PRODUCTS ASSOCIATION - loc., cit.

BOHANNAN, B. - loc., cit.

NATIONAL FOREST PRODUCTS ASSOCIATION - loc., cit.

AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION - loc., cit.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D 245-74.
loc., cit.

ALLEN, D.E. - Limit states design: a probabilistic study. Canadian Journal of Civil Engineering, 2 (1) : 36-49, 1975.

FUSCO, Péricles Brasiliense - Estruturas de concreto: fundamentos do projeto estrutural. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil & EDUSP, 1976. 274p. v.1.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Ações e segurança nas estruturas: procedimento - Projeto 2 : 03. 17-004. Rio de Janeiro, ABNT, 1983. 26p.

Id. - NBR 7190/82. loc., cit.

Id. - NBR 6230/80. loc., cit.

NATIONAL FOREST PRODUCTS ASSOCIATION - loc., cit.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM - D 143-52.
loc., cit.

Id. - ASTM - D 198-76. loc., cit.

Id. - Standards methods for establishing clear wood strength values - D 2555-78. In: _____ - 1981 Annual Book of ASTM Standards - Part 22 : Wood; adhesives. Philadelphia, ASTM, 1981. p.742-763.

OZELTON, E.C. & BAIRD, J.A. - loc., cit.

MATEUS, T.I.E. - loc., cit.

NATIONAL FOREST PRODUCTS ASSOCIATION - loc., cit.

BODIG, J. & JAYNE, B.A. - Assignment of design stress. op. cit. cap.12, p.613-658.

OZELTON, E.C. & BAIRD, J.A. - loc., cit.

KARLSEN, G.G. - Calculation and design of wooden structures.
In: _____ - Wooden structures. Moscou, Mir, 1967.
p.76-103 Part.III.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 7190/82.
loc., cit.

Id. - NBR 6230/80. loc., cit.

Loc., cit.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Símbolos gráficos para projetos de estruturas: simbologia - Projeto 2:03.12-001. Rio de Janeiro, ABNT, 1981. 11p.

Loc., cit.

Id. - NBR 6230/80. loc., cit.

HELLMEISTER, João Cesar - Sobre a determinação das características físicas da madeira. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, 1973. 161p. (Tese de Doutorado).

BODIG, J. & GOODMAN, J.R. - loc., cit.

HOOLEY, R.F. & HIBBERT, P.D. - loc., cit.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 6230/80. loc., cit.

Loc., cit.

Loc., cit.

Id. - Ações e segurança nas estruturas: procedimento - Projeto 2:03.17-004. loc., cit.

SILVA, H.C. - loc., cit.

COSTA NETO, Pedro Luiz de Oliveira - Testes não-paramétricos. In: _____ - Estatística. São Paulo, Edgard Blücher, 1977. p.130-151. cap.6.

MEYER, Paul L. - Probabilidade: aplicações à estatística. Rio de Janeiro, Livro Técnico, 1972. 391p.

FUSCO, P.B. - Estruturas de concreto: fundamentos do projeto estrutural. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil & EDUSP, 1977. 298p. v.1.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Projeto 2:03.17-004.
loc., cit.

Id. - Projeto 2:03.12-001. loc., cit.

HELLMEISTER, J.C. - loc., cit.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 6230/80.
loc., cit.

Id. - NBR 7190/82. loc., cit.

Id. - Projeto 2:03.12-001. loc., cit.

Id. - NBR 7190/82. loc., cit.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - Tabelas de resultados obtidos para madeiras nacionais. 2.ed. São Paulo, IPT, 1956 (Boletim, 31).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Projeto 2:03.17-004.
loc., cit.

KOLLMANN, F.F.P. & CÔTÉ JR., W.A. - loc., cit.

SILVA, H.C. - loc., cit.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM - D 198-76.
loc., cit.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 7190/82.
loc., cit.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - loc., cit.

MIWA, R.T. - loc., cit.

PINTO, M.L. - loc., cit.

ZAKIC, B.D. - loc., cit.

FUSCO, P.B. - op. cit. v.2.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Projeto e execução de obras de concreto armado: procedimento - NB 1/78 (NBR 6118/82)
Rio de Janeiro, ABNT, 1978. 76p. (item 15: controle da resistência do concreto, p.60-62).

Loc., cit.

FUSCO, P.B. - op. cit. v.2.

17. BIBLIOGRAFIAS

AFANASIEV, A.M. & MARIEN, V.A. - Práticas de laboratório sobre resistencia de materiales. Moscou, vir, 1978. 325p.

ALLEN, D.E. - Limit states design: a probabilistic study. Canadian Journal of Civil Engineering, 2(1): 36-49, 1975.

AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION. - Timber construction manual. 2.ed. New York, John Wiley & Sons, 1974.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - 1981 Annual Book of ASTM Standards. - Part 22 : wood ; adhesives. Philadelphia, ASTM, 1981.

_____ - Orientation on effects in the mechanical behavior of anisotropic structural materials. Philadelphia, ASTM, 1966. (ASTM STP 405).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Ações e segurança nas estruturas : procedimento - Projeto 2:03.17-004. Rio de Janeiro, ABNT, 1983. 26p.

_____ - Cálculo e execução de estruturas de madeira. - NBR 7190/82. Rio de Janeiro, ABNT, 1982. 23p.

_____ - Ensaio físico e mecânico de madeiras - NBR 6230/80. Rio de Janeiro, ABNT, 1980, 16p.

_____ - Projeto e execução de obras de concreto armado : procedimento - NB-1/78 (NBR 6118/82). Rio de Janeiro, ABNT, 1978. 76p.

_____ - Referências bibliográficas - NBR 6023/80. Rio de Janeiro, ABNT, 1980.

_____ - Resumos : procedimentos - NBR 6033/80. Rio de Janeiro, ABNT, 1980. 4p.

- Simbolos gráficos para projetos de estruturas: simbologia Projeto 2:03.12-001. Rio de Janeiro, ABNT, 1981. 11p.
- ATHERTON, George H. - Preliminary study of proportional limit as a predictor of ultimate strength in bending. Forest Products Journal, 30 (11) : 47-53, Nov. 1980.
- BEGHTEL, S.C. & NORRIS, Charles B. - Strength of wood beams of rectangular cross section as affected by span - depth ratio. Madison, U.S. Dept. Agriculture, Forest Service, Forest Products Lab. 1959. 42p.
- BODIG, Jozsef & GOODMAN, James R. - Prediction of elastic parameters for wood. Wood Science, 5 (4) : 249-264, Apr. 1973.
- BODIG, Jozsef & JAYNE, Benjamin A. - Mechanics of wood and wood composites. New York, Van Nostrand Reinhold, 1982.
- BOHANNAN, B lly - Structural engineering research in wood. Journal of the Structural Division, 94 (2) : 403-415, Feb. 1968.
- BOX, G.E.P. ; HUNTER, W.G. ; HUNTER, I.S. - Statistics for experimenters. s.n.t. 653p.
- BRITISH STANDARD - Methods of test for determination of certain physical and mechanical properties of timber in structural sizes. - BS 5820. s.l., BS., 1979. 6p.
- BROCHARD, François - Xavier - Bois et charpentes en bois : le materiaux et son utilisation. Paris, Eyrolles, 1960.
(Collection de L'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics)
- CAMARGO, Wander Miranda de - Uma tentativa de estabelecer um modelo de comportamento da madeira como material elastofrágil anisotrôpo. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 1, São Carlos-SP, 20-22, julho de 1983. São Carlos, LaMEM-EESC-USP, 1984. v.1, p.1-93.
- CONSEIL INTERNATIONAL DU BATIMENT - Structural timber design code. 5.ed.

- COSTA NETO, Pedro L. de Oliveira - Estatística. São Paulo, Edgard Blücher, 1977. 264p.
- COUTINHO, A. de Souza - Fabrico e propriedades do betão. Lisboa, LNEC, 1974.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG - Prüfung von Holz Biege versuch - DIN 52-186. Berlin, Springer-Verlag, 1978. 3p.
- DRAPER, N.R. & SMITH, H. - Applied Regression analysis. New York, John Wiley & Sons, 1966. 407p. (Wiley series in Probability and Mathematical Statistics).
- ECKELMAN, Carl A. - Effect of holes on the bending strength of wood and particle board parts. West Lafayette (Indiana, Purdue Univ., 1975. 8p. (Research Bulletin, 922).
- FOREST PRODUCTS LABORATORY - Wood handbook : wood as an engineering material. Washington, D.C., U.S. Dept. Agriculture, Forest Service, FPL, 1974. 528p. (Agriculture Handbook, 72).
- FREITAS, Amantino Ramos de - Probabilistic approach in the design of wood structures in Brazil based on the variability of 23 species. São Paulo, IPT, Divisão de Madeiras, 1978. 77p. (Publicação IPT nº 1198).
- FURIATI, Marcos - Classificação estrutural de peças de madeira. São Carlos, LaMEM-EESC-USP, 1981. 131p. (Dissertação de Mestrado).
- FUSCO, Péricles Brasiliense - Estruturas de concreto : fundamentos estatísticos da segurança das estruturas. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil & EDUSP, 1976. 274p. v.2.
- _____ - Estruturas de concreto : fundamentos do projeto estrutural. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil & EDUSP, 1977. 298p. v.1.

- _____ - Estruturas de concreto : solicitações normais. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1981. 464p.
- GALLIGAN, W.L. ; SNOD GRASS, D.V. ; GROW, G.W. - Machine stress rating: practical concerns for lumber producers. USDA-FS-FPL, Mad., Wis., 1977. 82p. (Gen. Tech. Rep. FPL - 7).
- HEARMON, R.F.S. - The elasticity of wood and plywood. London. His Majesty's Stationery Office, 1948. p.5-44 (Forest Products Research - Special Report, 7 - part I).
- HELLMEISTER, João Cesar - Sobre a determinação das características físicas da madeira. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, 1973. 161p. (Tese de Doutorado).
- HOOLEY, Roy F. & HIBBERT, P.D. - Stress concentration in timber beams. Journal of the Structural Division, 93 (2) : 127-139, Apr., 1967.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - Tabelas de resultados obtidos para madeiras nacionais. 2.ed. São Paulo, IPT, 1956. (Boletim 31).
- JOHNSON, J.W. - Relationships among moduli of elasticity and rupture : seasoned and unseasoned coast - type Douglas-fir and seasoned Western hemlock. In: SYMPOSIUM ON NON DESTRUCTIVE TESTING OF WOOD, 2, Proc's., spr. 1965. p.419-459.
- KARLSEN, G.G. - Wooden Structures. Moscow, Mir, 1967. 638p.
- KOLLMANN, Franz F.P. & CÔTÉ JR., Wilfred A. - Principles of wood science and technology. Berlin, Springer-Verlag, 1968. p. v.I - solid wood.
- KRAHMER, R.L. & SLEBEN, H.U. - Effect of span-to-depth ratio on modulus of elasticity of Douglas-fir joists. Forest Products Journal, 18 (1) : 81-83, Jan. 1968.

- KUENZI, E.W. - Methods for determining the elastic constants of non metallic materials. Philadelphia, ASTM, 1952. 10p. (ASTM STP 160).
- LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL - Especificações (E 74-1960) : Madeiras - ensaio de flexão estática. Lisboa, LNEC, 1961. 5p. (série B - secção 5).
- LAHR, Francisco Antonio Rocco - Arco treliçado de madeira. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, 1978. 112p. (Dissertação de Mestrado)
- _____ - Sobre a determinação de propriedades de elasticidade da madeira. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, 1983. 221p. (Tese de Doutorado).
- _____ - Tesouras de Madeira : otimização de sua aplicação na construção civil brasileira. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, 1974. 112p. (Relatório nº 3, Bolsa de Iniciação Científica - FAPESP).
- LANGENDONCK, Telemaco van - Resistência dos materiais : II - de formações. São Paulo, Edgard Blücher & EDUSP, s.d.
- L'ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION - Bois (méthodes d'essais U F) : essai de flexion statique. Paris, AFNOR, 1942. 4p.
- LIU, Jen Y. - Shear strength of wood beams : a weibull analysis. Journal of the Structural Division, 106 (10) : 2035-2052, Oct. 1980.
- MADSEN, Borg - Strength values for wood and limit states design. Canadian Journal of Civil Engineering., 2 : 270-279, 1975.
- MASCIA, Nilson Tadeu - Flexo-compressão em peças de madeira. São Carlos, LAMEM-EESC-USP, 1983-85. (Bolsa de Mestrado I e II - Relatórios nº1 a 4 - FAPESP).

- MATEUS, Tomás I.E. - Bases para o dimensionamento de estruturas de madeira. Lisboa, LNEC, 1962. 312p. (Memória nº 179).
- MELO, Júlio Eustáquio de - Classificação mecânica de peças estruturais de madeira. São Carlos, LaMEM-EESC-USP, 1984. 84p. (Dissertação de Mestrado).
- MEYER, Paul L. - Probabilidade : aplicações à estatística. Rio de Janeiro, Livro Técnico, 1972. 391p.
- MIWA, Roberto T. - Flexão em peças de madeira. São Carlos, LaMEM-EESC-USP, 1973. 122p. (Relatório nº 1, Bolsa de Aperfeiçoamento I - FAPESP)
- MORETTI FILHO, Justo - Redação de dissertações e teses. Piracicaba, ESALQ-USP, 1982. 67p.
- NATIONAL FOREST PRODUCTS ASSOCIATION - National design specification for wood construction. Washington, NFPA, 1977. 78p.
- _____ - Design values for wood construction. Washington, NFPA, 1981. 32p. (A suplement of the 1977 ed. National Design Specification for Wood Construction).
- NEWLIN, J.A. & TRAYER, O.W. - Deflection of beams with special reference to shear deformations : the influence of the form of a wooden beam on its stiffness and strength - I. Madison, U.S. Dept. Agriculture, Forest Service, Forest Products Lab., 1956. 19p.
- OLIVEIRA, Luiz C. de Sampaio - Perguntas e respostas em secagem de madeiras. São Paulo, IPT, 1981. 36p. (Publicação Interna nº 9).
- OZELTON, E.C. & BAIRD, J.A. - Timber designers' manual. London, Crosby Lock-wood staples, 1976. 518p.
- PARRATT, Lyman G. - Probability and experimental errors in science : an elementary survey. New York, John Wiley & Sons, 1961. 255p.

- PEARSON, R.G. ; KLOOT, N.H. ; BOYD, J.D. - Timber engineering design handbook. Australia, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Melbourne Univ., 1958. 248p.
- PEREIRA, José A. & MANIERI, Calvino - Nomenclatura das madeiras nacionais. 2.ed. São Paulo, IPT, 1956. 31p. (Boletim nº 31)
- PINTO, Márcio de Lara - Flexão em peças de madeira. São Carlos, LAMEM-EESC-USP, 1983. 132p. (Dissertação de Mestrado).
- PISARENKO, G.S. ; YÁKOVLEV, A.P. ; MATVĚEV, V.V. - Manual de resistência de materiais. Moscow, Mir, 1979. 694p.
- RAMOS JR., Agustin N. - Stress-strain distribution in Douglas-Fir beams within the plastic range. Madison, U.S. Dept. Agriculture, Forest Service, Forest Products Lab., 1961. 30p.
- RYAN JR., Thomas A. - Minitab reference manual. Pennsylvania, The Pennsylvania State Univ., Park, 1981.
- RYAN JR., T.A. ; JOINER, B.L. ; RYAN, B.F. - Minitab student handbook. North Scitnate, Massachussetts, Duxbury, 1976. 338p.
- ROCHA, Aderson Moreira da - Comentários sobre as recomendações do CEB. Rio de Janeiro, Científica, 1975. 218p.
- SANTOS, Lauro Modesto dos - Cálculo de concreto armado : segundo a nova NB-1 e o CEB. 2.ed. São Paulo, Ed. LMS, 1983. 540p. v.1.
- SCHIEL, Frederico - Introdução à resistência dos materiais. 6.ed. São Carlos, 1976. 137p. fasc. I.
- SCHULTE, H. & YAGUI, T. - Estruturas de aço : elementos básicos. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, 1981. 347p.

- SILVA, Hugo Cardoso da - Ensaio estatísticos de madeiras em dimensões estruturais. Rio de Janeiro, Instituto Nacional de Tecnologia, 1942. 35p.
- SNEDECOR, G.W. & COCHRAN, W.G. - Métodos estatísticos. México, Continental, 1977. 703p.
- STAMM, Alfred J. - Wood and cellulose science. New York, The Ronald Press, 1964. 549p.
- TAYLOR, George - La madera. Trad. de : Concepción Rigau. Barcelona, Blume, 1980. 274p.
- TIMOSHENKO, Stephen P. - History of strength of materials. New York, McGraw-Hill, 1953. 452p.
- _____ - Resistência dos materiais. Rio de Janeiro, Livro Técnico, 1971.
- _____ - Teoria da elasticidade. 3.ed. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1980. 545p.
- WAGNER M., Mario & MONGE. E., Joaquim - Critérios modernos para el diseño estructural en madera. Santiago, Chile, Universidad de Chile, 1983. p.246-269. (Curso del Programa de Educación Continuada - Aprientes de clases).
- WALTERS, C.S. & REISS, W.L. - Predicting modulus of rupture from modulus of elasticity for small clear specimens of oak and cottonwood. Forest Products Journal, 27 (6) : 51-53, June, 1977.
- ZAGOTTIS, Décio de - Pontes e grandes estruturas : IV - introdução da segurança no projeto estrutural. São Paulo, Escola Politécnica - USP, 1978. 102p.
- ZAKIC, Borislav D. - Inelastic bending of wood beams. Journal of the Structural Division, 93 (10) : 2079-2095, Oct. 1973.