

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

RESISTÊNCIA DA MADEIRA
AO CISALHAMENTO

Eng.º ANTONIO PAULO MENDES

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

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. João Cesar Hellmeister - Orientador (EESC-USP)
Prof. Dr. Pericles Brasiliense Fusco (POLI-USP)
Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr (EESC-USP)



SÃO CARLOS, 1984

"RESISTÊNCIA DA MADEIRA AO CISALHAMENTO"

Engº ANTONIO PAULO MENDES

Prof. Dr. JOÃO CESAR HELLMEISTER

A G R A D E C I M E N T O S

. Ao Prof. Dr. João Cesar Hellmeister, pelo apoio e dedicação na orientação deste trabalho.

. À Universidade Católica de Goiás, Escola Técnica Federal de Goiás e à CAPES-MEC, pelo incentivo e apoio financeiro.

. À Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, pela oportunidade de desenvolvimento do meu programa de mestrado.

. Aos colegas de pós-graduação e professores do Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM), pela colaboração e amizade.

. Aos funcionários do LaMEM, pela ajuda durante a realização deste trabalho.

Aos meus pais
Artur de Oliveira Mendes (in memorian)
e
Luzia Silveria Mendes

ã minha esposa e filhos
Celi Lopes Mendes
Antonio Paulo Mendes Junior
Paulicelli de Oliveira Mendes
Rodrigo de Oliveira Mendes
e
Paulienne de Oliveira Mendes

pela dedicação demonstrada
durante a realização deste trabalho

R E S U M O

Foram objetivos do presente trabalho obter uma compreensão va quantidade de informações a respeito do cisalhamento na madeira e contribuir para a revisão do Método Brasileiro de Ensaio e da Norma Brasileira para o Cálculo e a Execução de Estruturas de Madeira.

Uma revisão da literatura foi apresentada para uma análise crítica dos fundamentos teóricos do cisalhamento na madeira. Cada um dos temas estudados foi também considerado experimentalmente, após projeto estatístico e com análise estatística final.

Atenção especial foi dada às camadas de crescimento, aos planos naturais de cisalhamento na madeira e à influência da compressão perpendicular às fibras, da umidade, da densidade, da velocidade de ensaio, nas tensões de ruptura por cisalhamento na madeira.

Para uma aproximação ao projeto de estruturas de madeira considerando os estados limites, foi definida a tensão característica de cisalhamento.

Algumas propostas, como amostragem ocasional para os ensaios e o ensaio livre de tensões de flexão, foram inseridas nas conclusões.

Houve a preocupação de obter um texto didaticamente reduzido.

ABSTRACT

The aim of the present work was to obtain a comprehensive amount of information about shear in wood and to contribute to the revision of the Brazilian Testing Methods and Standard Design Specifications.

A critical analysis of the theoretical basic about shear in wood followed the bibliografic review. All the studied were experimentally considered too, after previous statistical design and final statistical analysis.

Special attention was given to the growing laiers, the natural shear planes in wood, and the influence of: compression perpendicular to grain, moisture content, density and speed of testing on the shear failure stresses in wood.

In order to obtain an approach to the design of wooden structures considering limit states, it was defined the shear carachteristic stress.

A few proposals, like random sampling for testing and a shear test free of bending stresses, were inserted in the conclusions.

It was intended to have a didatically written text.

S U M Á R I O

	pg.
1. INTRODUÇÃO.....	01
2. REVISÃO TEÓRICA E BIBLIOGRÁFICA.....	03
2.1 - Cisalhamento Puro.....	03
2.2 - Cisalhamento Simples.....	04
2.3 - Cisalhamento na Flexão.....	12
2.4 - Métodos de Ensaio.....	22
3. CISALHAMENTO PARALELO E NORMAL.....	28
3.1 - Introdução.....	28
3.2 - Conceitos e Classificação.....	29
3.3 - Experimentação Realizada.....	30
3.4 - Conclusão.....	48
4. INFLUÊNCIA DA COMPRESSÃO NORMAL NO CISALHAMENTO.....	50
4.1 - Introdução.....	50
4.2 - Experimentação.....	51
4.2.1 - Ensaio à Compressão Inclínada.....	51
4.2.2 - Cisalhamento Paralelo Combinado à Compressão Normal.....	65
5. CISALHAMENTO E DENSIDADE APARENTE A 15% DE UMIDADE.....	77
5.1 - Introdução.....	77
5.2 - Análise de Resultados.....	77
5.3 - Conclusão.....	81

6. INFLUÊNCIA DA UMIDADE E DA DENSIDADE NA RESISTÊNCIA DA MADEIRA AO CISALHAMENTO.....	82
6.1 - Introdução.....	82
6.2 - Metodologia de Ensaio.....	83
6.2.1 - Material Ensaiado.....	83
6.2.2 - Climatização.....	83
6.3 - Apresentação dos Resultados.....	84
6.4 - Análise de Resultados.....	90
6.4.1 - Tipo de Ruptura.....	90
6.4.2 - Tensão de Ruptura, Umidade e Densidade.....	90
6.4.3 - Correção da Tensão de Ruptura em Função do Teor de Umidade.....	104
6.4.4 - Relação Entre Tensão de Ruptura da Madeira Seca ao Ar e da Madeira Verde.....	105
6.5 - Conclusão.....	109
7. CISALHAMENTO E COMPRESSÃO PARALELA.....	110
7.1 - Introdução.....	110
7.2 - Apresentação dos Resultados.....	110
7.3 - Análise dos Resultados.....	115
7.4 - Conclusão.....	118
8. INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CARREGAMENTO NO ENSAIO DE CISA LHAMENTO:.....	119
8.1 - Introdução.....	119
8.2 - Metodologia de Ensaio.....	119
8.3 - Apresentação dos Resultados.....	119
8.4 - Análise de Resultados.....	122

8.5 - Conclusão.....	125
9. TENSÃO CARACTERÍSTICA DE CISALHAMENTO DA MADEIRA.....	126
9.1 - Introdução.....	126
9.1.1 - Método das Tensões Admissíveis.....	126
9.1.2 - Método dos Estados Limites.....	127
9.1.3 - Tensão Limite Inferior.....	128
9.2 - Determinação da Tensão Característica.....	129
9.2.1 - Apresentação dos Resultados.....	129
9.2.2 - Análise dos Resultados.....	131
9.3 - Conclusão.....	134
10. MODELOS PARA ENSAIOS DE CISALHAMENTO.....	135
10.1 - Introdução.....	135
10.2 - Experimentação Realizada.....	137
10.2.1 - Comparação Entre as Tensões de Ruptura por Cisalhamento num Plano e Cisalhamento em Dois Planos.....	137
- Ensaio.....	137
- Apresentação de Resultados.....	138
- Análise de Resultados.....	140
- Comparação de Médias.....	142
- Análise de Variância.....	142
- Conclusão.....	144
10.2.2 - Comparação Entre as Tensões de Ruptura Ob tidas no Ensaio Padrão do MB-26 e no Ensaio de Corpos de Prova não Sujeitos à Flexão..	144
- Ensaio.....	144
- Apresentação dos Resultados.....	146
- Análise de Resultados.....	147

- Conclusão.....	149
11. PROPOSTAS E PESQUISAS FUTURAS.....	150
11.1 - Propostas.....	150
11.2 - Pesquisas Futuras.....	153
BIBLIOGRAFIA.....	154

S I M B O L O G I A

Os símbolos utilizados neste trabalho são os seguintes:

- LETRAS MINÚSCULAS ROMANAS

a.....	=	Posição de uma garga
b.....	=	Largura da seção de uma viga
d.....	=	Altura da seção
f.....	=	Resistência do material
f_{wvk}	=	Tensão característica da madeira ao cisalhamento
i.....	=	Índice
k.....	=	Coeficiente da influência da umidade no cisalhamento
l	=	Vão de uma viga
l_v	=	Comprimento de corte
n.....	=	Número de amostras e Índice para indicar esforço normal
s.....	=	Desvio padrão de uma amostra
t.....	=	Indica a distribuição t - Student
t_0	=	Valor da distribuição t - Student para 0% de probabilidade
u.....	=	Teor de umidade
v.....	=	Velocidade de carregamento
x, y, z.	=	Coordenadas

- LETRAS MAIÚSCULAS ROMANAS

A.....	=	Área
A_v	=	Área cisalhada
D.....	=	Densidade
D_{12}	=	Densidade da madeira a 12% de Umidade
D_0	=	Densidade da madeira a 0% de umidade
E.....	=	Módulo de elasticidade longitudinal da madeira

G.....	= Módulo de elasticidade ao cisalhamento
H.....	= Força horizontal
I.....	= Momento de Inércia
N.....	= Força normal
P.....	= Probabilidade
S.....	= Momento estático de uma área
U.....	= Teor de umidade
V.....	= Força vertical
N_r	= Norma radial
N_T	= Norma tangencial
P_R	= Paralelo radial
P_T	= Paralelo tangencial
T L I ..	= Tensão limite inferior
L L S ..	= Tensão limite superior

- LETRAS GREGAS MINÚSCULAS

β	= Coeficiente
γ	= Deformação por cisalhamento
ϵ	= Deformação normal específica
θ	= Ângulo de inclinação das fibras da madeira
μ	= Média de uma população
σ	= Tensão normal, desvio padrão de uma população
σ_c	= Tensão de ruptura à compressão paralela às fibras
σ_x e σ_y	= Tensões normais na direção x e y, respectivamente
$\sigma_{n\theta}$	= Tensão normal reduzida pela compressão inclinada às fibras
τ	= Tensão de ruptura por cisalhamento paralela às fibras
τ_{adm}	= Tensão admissível de cisalhamento paralelo às fibras
τ_{12}	= Tensão de ruptura por cisalhamento paralelo às fibras, para umidade de 12%
τ_u	= Tensão de ruptura por cisalhamento para um teor de umidade qualquer
τ_{sat} ...	= Tensão de ruptura por cisalhamento para madeira saturada
τ_{pr}	= Tensão de ruptura paralela às fibras e radial aos anéis de crescimento
τ_{pt}	= Tensão de ruptura paralela às fibras e tangente aos anéis de crescimento

- τ_{nr} = Tensão de ruptura por cisalhamento normal às fibras e radial aos anéis de crescimento
- τ_{nt} = Tensão de ruptura por cisalhamento normal às fibras e tangente aos anéis de crescimento
- τ_{θ} = Tensão de cisalhamento induzida na compressão oblíqua
- $\tau_{\theta \text{ exp}}$.. = Idem ; experimental
- $\tau_{\theta \text{ calc}}$.. = Ibidem; calculada

Nota: A barra colocada sobre o símbolo indica a média.

A B R E V I A Ç Õ E S

As abreviaturas utilizadas neste trabalho são as seguintes:

Adm	=	Admissível
Cal	=	Calculado
Cis	=	Cisalhamento
Dens	=	Densidade
EESC	=	Escola de Engenharia de São Carlos
exp	=	Experimental
LaMEM	=	Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira
MAD	=	Madeira

NOTA

Na medida do possível tentou-se utilizar a simbologia e as abreviaturas de acordo com a Norma Brasileira de Símbolos Gráficos para projetos de Estruturas; porém existem símbolos já consagrados no meio técnico das estruturas de madeira, os quais necessitam de um tempo maior para se enquadrarem nos moldes da ABNT.

CAP 01 INTRODUÇÃO

O estudo do comportamento da madeira às tensões de cisalhamento, no Brasil, se encontra numa fase embrionária. Os únicos estudos existentes referem-se apenas à determinação das tensões médias de ruptura, realizadas para cerca de 500 toras, de mais de 400 espécies, pelo IPT-SP (1), que, desde 1930, já utiliza o método de ensaio, adotado pela ABNT somente em 1940 (2).

As recomendações da Norma Brasileira para o Cálculo e Execução de Estruturas de Madeira (3) se baseiam em estudos experimentais realizados noutros países. Entretanto, muitas recomendações já não se justificam, tais como: a fixação das tensões admissíveis do material pelo método determinístico e a utilização de elevados coeficientes de redução das tensões médias de ensaio para fixar as tensões admissíveis.

As primeiras referências a respeito do estudo do cisalhamento na flexão são devidas a Jourawski (1821-1891) (4), o qual projetou e construiu uma ponte ferroviária metálica com vãos de 54m, a 51 m da superfície da água. Concluiu corretamente a respeito do cisalhamento na flexão, mesmo sem ter encontrado referências na literatura, chegando a deduzir a equação de distribuição de tensões.

Estudos realizados na Alemanha, por volta de 1955, apresentados por Kollmann (5), trouxeram contribuição significativa para o conhecimento do comportamento da madeira ao cisalhamento.

Mais recentemente, estudos realizados nos Estados Unidos e Canadá mostraram a preocupação dos pesquisadores quanto ao conhecimento mais racional do cisalhamento na madeira.

(1) INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - Madeiras Nacionais: tabela de resultados de ensaios físicos e mecânicos - Boletim nº 31.

(2) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Ensaio físicos e mecânicos de madeiras MB-26.

(3) _____ - Cálculo e Execução de Estruturas de Madeira NB-11.

(4) TIMOSHENKO, S.P. - History of strength of materials - p.142.

(5) KOLLMANN, F. - Technologie des holzes und der holzwerkstoffe, p.887-903.

É finalidade deste trabalho melhorar o conhecimento da resistência da madeira ao cisalhamento, tanto teórica como experimentalmente, com o intuito de valorização dos resultados já obtidos no Brasil.

Este estudo abrange, fundamentalmente, o cisalhamento simples, base para o estudo do cisalhamento na flexão. Para isso, apresentou-se a contribuição dos pesquisadores sobre o cisalhamento simples e o cisalhamento na flexão, bem como os principais métodos de ensaio pertinentes. Inclui, ainda, a experimentação necessária ao esclarecimento das questões que mais têm despertado atenção sobre o assunto, tais como:

1^a) Variação da resistência ao cisalhamento em função da posição dos anéis de crescimento da madeira;

2^a) Influência da compressão normal na resistência da madeira ao cisalhamento;

3^a) A correção da tensão de cisalhamento em função do teor de umidade e da densidade da madeira;

4^a) A influência da velocidade de carregamento no ensaio de cisalhamento;

5^a) Definição e obtenção da tensão característica de cisalhamento, como contribuição para o dimensionamento das estruturas de madeira, considerando os estados limites;

6^a) Estudo comparativo entre alguns modelos de ensaio de cisalhamento e o ensaio padrão do MB-26 (2);

7^a) Apresentar sugestões para melhorar o método de ensaio e a norma de cálculo e execução de estruturas de madeira e ainda sugerir novas pesquisas sobre a resistência da madeira ao cisalhamento.

CAP 02 REVISÃO TEÓRICA E BIBLIOGRÁFICA

2.1 - CISALHAMENTO PURO - MÓDULO DE ELASTICIDADE TRANSVERSAL

Considere-se o caso particular de tensões normais agindo em duas direções ortogonais, sendo numericamente $\sigma_x = \sigma_y$ como na figura 2.1a. O círculo das tensões está traçado na figura 2.1b. O ponto D representa as tensões que atuam nos planos ab e cd perpendiculares ao plano xy e inclinados de 45° com eixo x. O ponto D representa as tensões que atuam nos planos ab e bc perpendiculares a ab e cd. Pelo círculo das tensões, vê-se que a tensão normal em cada um desses planos é zero e que a tensão de cisalhamento nos mesmos é numericamente igual à tensão normal σ , de modo que:

$\tau = \sigma_x = \sigma_y$. Este é o caso do chamado cisalhamento puro.

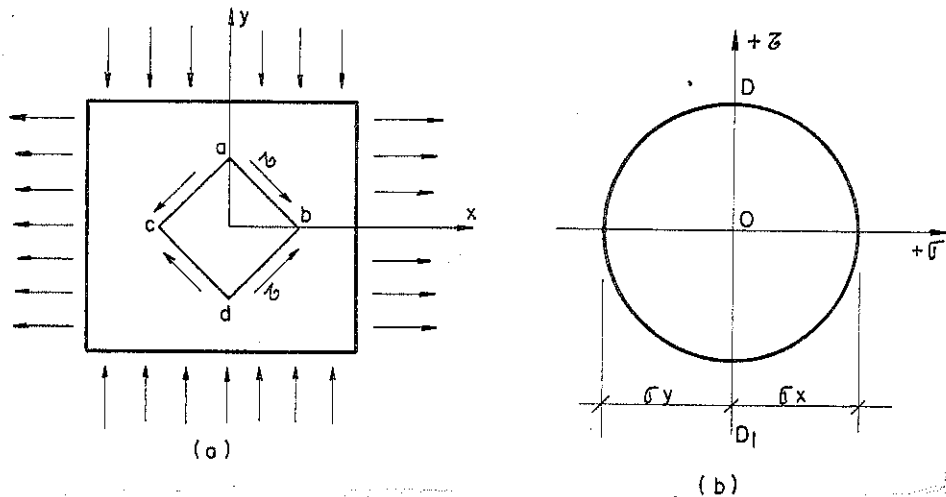


Fig. 2.1 - Estado de cisalhamento puro

O elemento abcd com a atuação das tensões de cisalhamento se deformará, transformando-se num losango a b'cd' como indicado na fig. 2.2

O ângulo b se torna $\pi/2 - \gamma$ e o ângulo a se torna $\pi/2 + \gamma$. O ângulo pequeno γ determina a distorção do elemento abcd e é chamado de deformação de cisalhamento. Se o material obedece à lei de Hooke, esta deformação é proporcional à tensão τ e pode-se

escrever:

$$\gamma = \frac{\tau}{G} \dots \dots \dots (2.1)$$

Na qual G é uma constante do material, denominado $m\bar{o}$ dulo de elasticidade transversal.

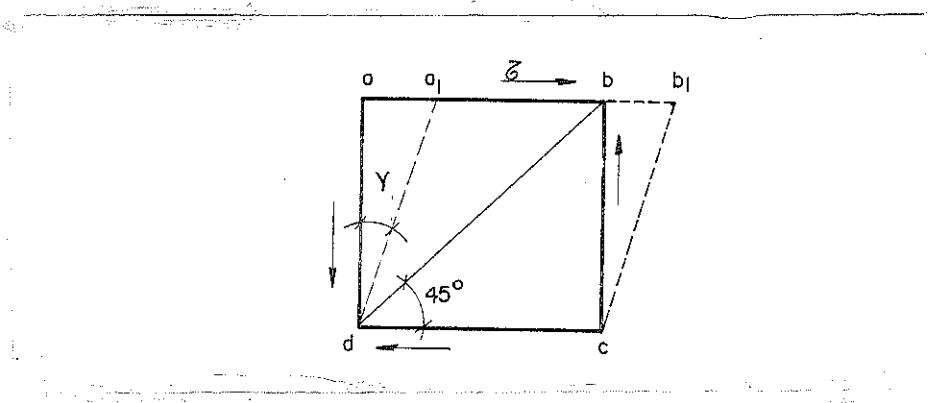


Fig. 2.2 - Deformação por cisalhamento

2.2 - CISALHAMENTO SIMPLES

Vários pesquisadores estudaram o cisalhamento simples na madeira através de pequenos corpos de prova isentos de defeitos. Dentre eles se destacam os seguintes:

Brotero (6) em 1931, realizou ensaios de cisalhamento usando o corpo de prova indicado na fig. 2.3 e o corpo de prova padrão da ASTM (7), e encontrou resultados compatíveis, adotando a seguir o corpo de prova da ASTM, devido à maior facilidade de execução e secagem.

(6) BROTERO, F.A. - Estudo dos caracteres físicos e mecânicos das madeiras
P. 38.

(7) AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - Standard Method of Small Clear specimens of timber

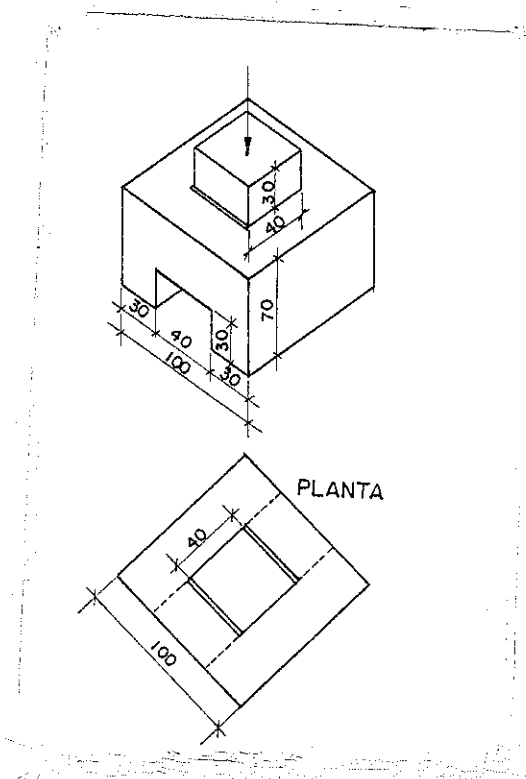


Fig. 2.3 - Esquema do corpo de prova de cisalhamento

Utilizando os resultados obtidos, traçou empiricamente uma curva para relacionar a tensão de ruptura por cisalhamento da madeira verde com o peso específico a 15% de umidade, fig.2.4. Mas não teve oportunidade de determinar a expressão analítica desta relação.

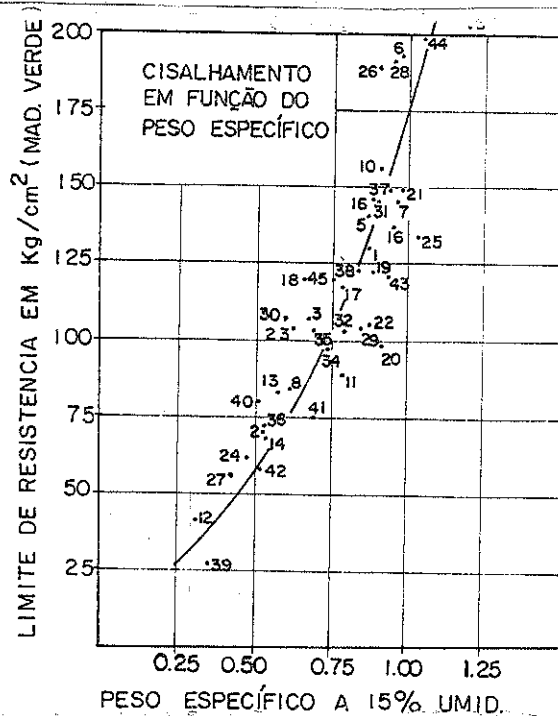


Fig. 2.4 - Variação da resistência ao cisalhamento em função do peso específico.

Kollmann e Keylwerth (8), em 1944, realizaram ensaios de cisalhamento seguindo diferentes métodos apresentados graficamente nas figuras 2.5, 2.6 e 2.7. Na tabela 2.1 é apresentado o resultado da comparação dos valores obtidos através do esquema da figura 2.7 e dos esquemas das figuras 2.7a, 2.6d, 2.5f e 2.5d.

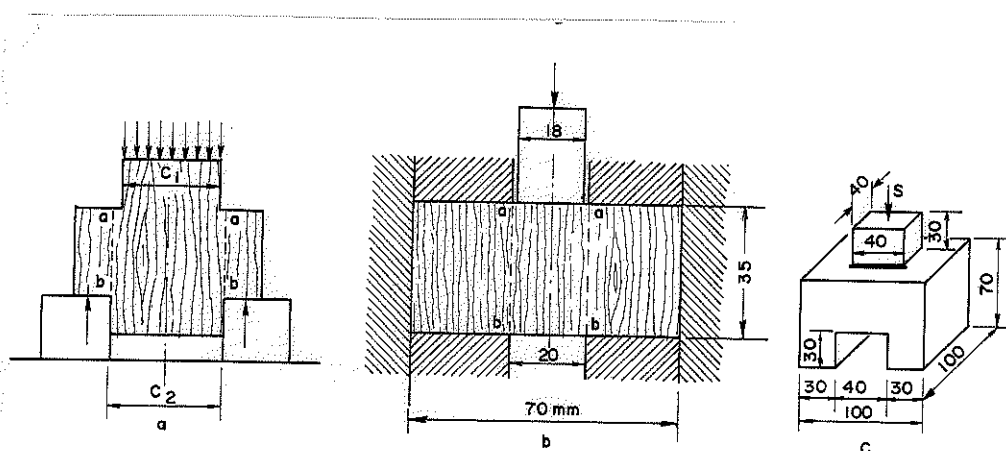


Figura 2.5 - Corpos de prova para cisalhamento em dois planos.

- a) de acordo com INOCUTY
- b) de acordo com LANG
- c) de acordo com BROTERO

(8) KOLLMANN, F. - *Technologie des holzes und der holzwerkstoffe*, p. 888

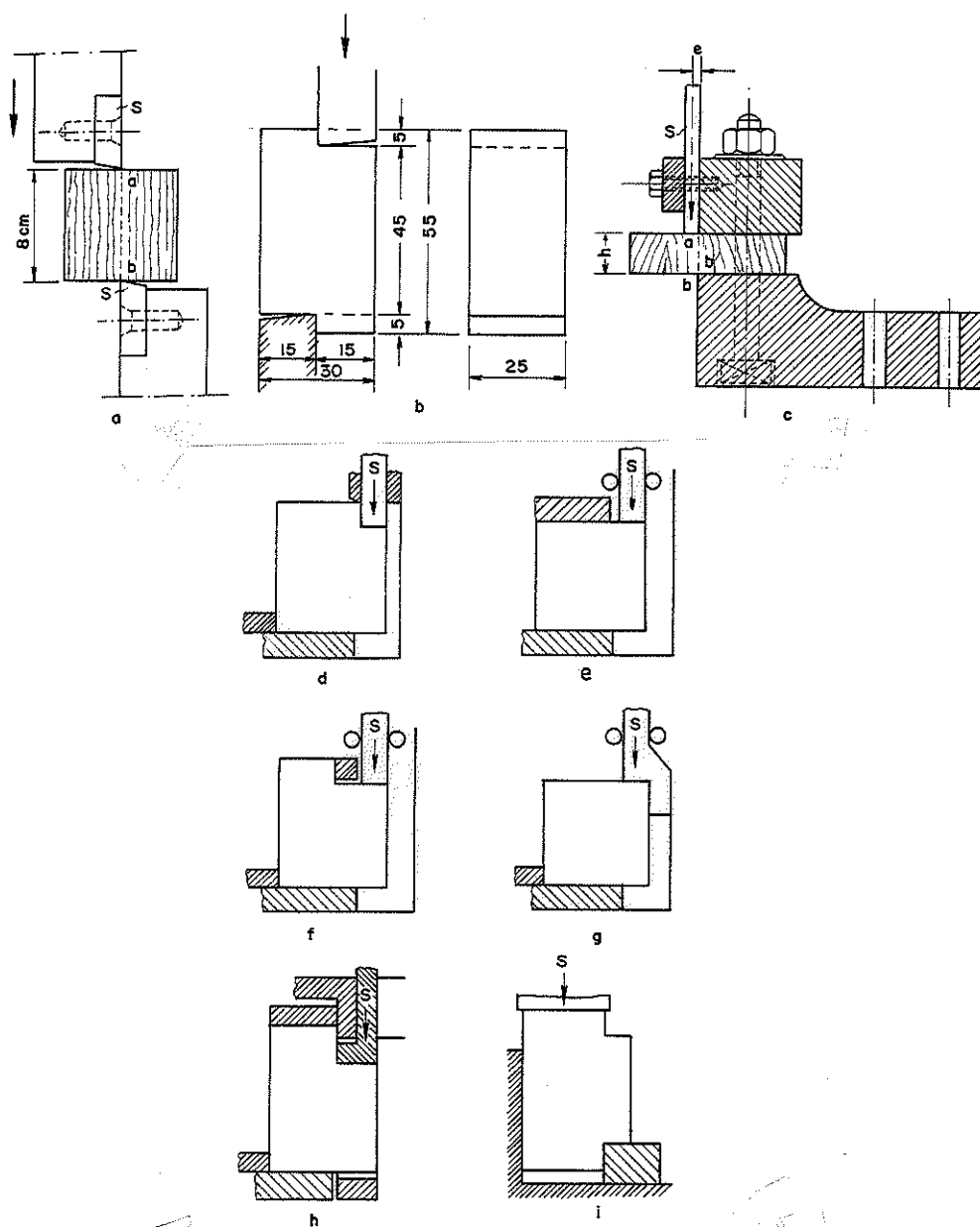


Figura 2.6 - Corpos de prova de cisalhamento e esquemas de ensaio.

- a) Corpo de prova cúbico de Bauschinger (1983)
- b) Corpo de prova prismático de Bauschinger
- c) Corpo de prova de Rudeloff (1899)
- d) Corpo de prova da ASTM D. 143-27
- e) Corpo de prova cúbico preso entre chapas de Chaplin
- f) Corpo de prova da BSI Spec. 337-1938
- g) Corpo de prova cúbico de Chaplin
- h) Corpo de prova da norma sueca
- i) Corpo de prova com dois cortes em um único lado.

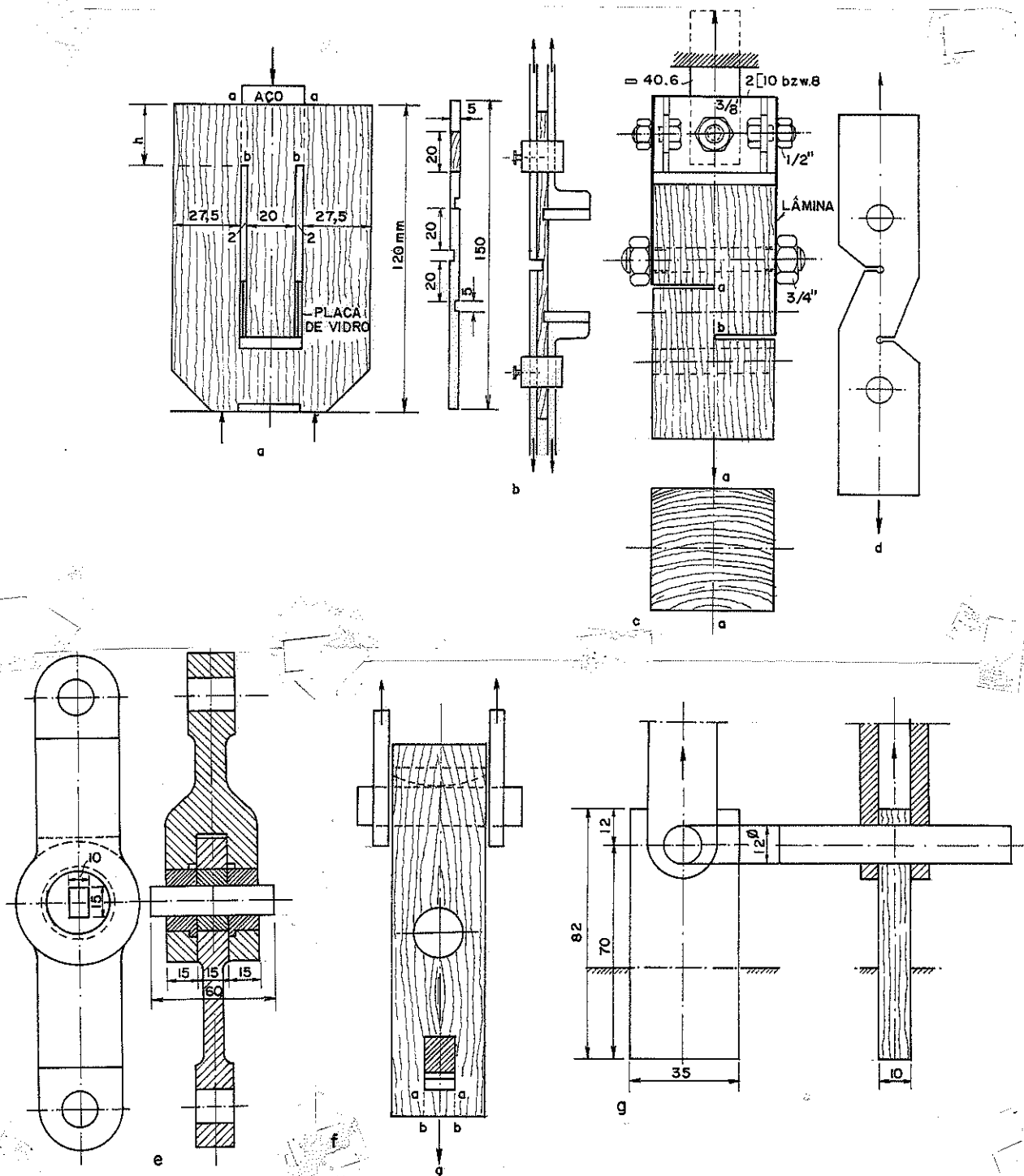


Figura 2.7 - Corpos de prova especiais de cisalhamento

- a) de acordo com Gaber (1929)
- b) de acordo com a norma francesa (AFNOR B 5-32.1942)
- c) e d) de acordo com Petermann (1941)
- e) para cisalhamento em dois planos
- f) de acordo com Johnson
- g) de acordo com Junkers - Flugzeugbau

FIG.2.5e	FIG. 2.7a			FIG. 2.6d			FIG. 2.5f			FIG. 2.5d		
média	min	med	max	min	med	max	min	med	max	min	med	max
1,00	0,53	0,68	0,85	0,52	0,66	0,83	0,47	0,63	0,85	0,33	0,43	0,65

Tabela 2.1 - Relações entre as tensões de ruptura por cisalhamento nos diversos esquemas de ensaios.

O comitê britânico para ensaios mecânicos da madeira(9), recomenda para o ensaio de cisalhamento um carregamento simétrico em corpos de prova cúbicos, figura 2.7h.

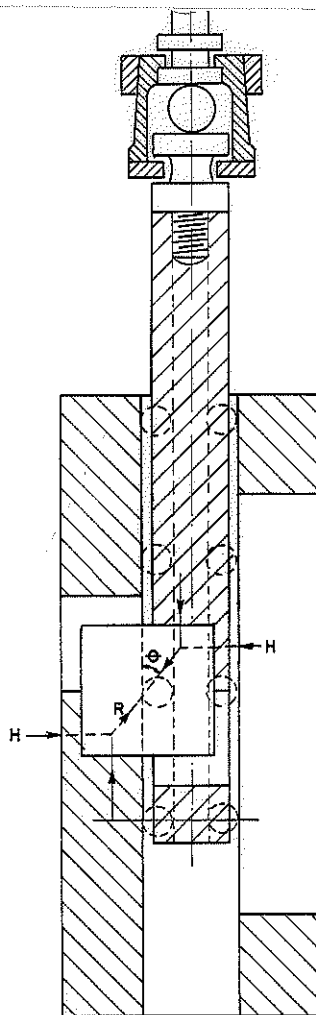


Figura 2.7h - Carregamento simétrico em corpos de prova cúbicos.

(9) Apud - KOLLMANN, F. - op.cit. - p. 888

Coker e Coleman (10) em 1930, usando foto-elasticidade mostraram a distribuição das tensões normais e de cisalhamento num corpo de prova cúbico, carregado simetricamente (fig. 2.8).

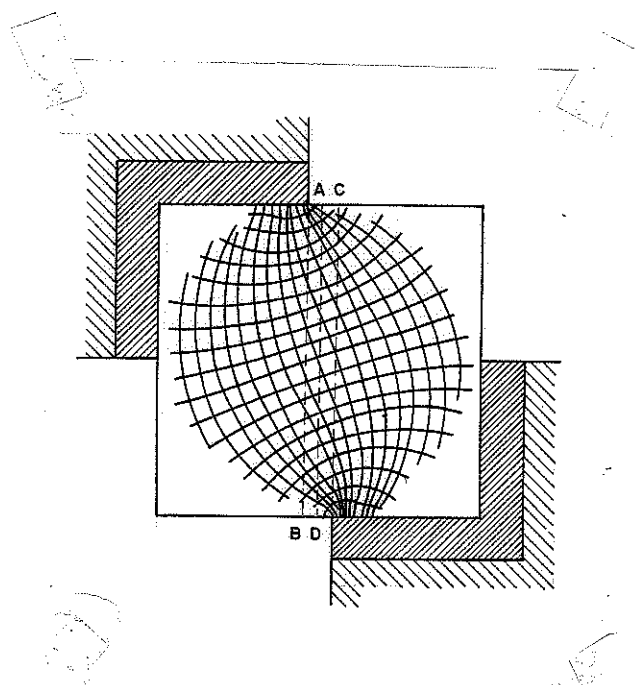


Figura 2.8 - Distribuição de tensões num cubo de madeira carregado simetricamente.

A tensão vertical é distribuída uniformemente nos planos AB e CD, mas ocorrem consideráveis desvios perto dos suportes.

Radcliff e Suddarth (11), em 1955, realizaram uma análise de tensões no corpo de prova de cisalhamento da ASTM e no corpo de prova denominado por eles como modificado. Determinando as tensões de cisalhamento, encontraram distribuição de tensões no corpo de prova da ASTM e no corpo de prova modificado, fig. 2.9.

A distribuição das tensões no corpo de prova modificado se aproxima melhor da distribuição constante presumida teoricamente quando se considera a madeira como um material isotrópico para a determinação das tensões de cisalhamento.

(10) Apud - KOLLMANN, F. - *op.cit.* - p. 893

(11) RADCLIFF, B. M. & SUDDARTH, S.K. - The notched beam shear test for wood. p. 682

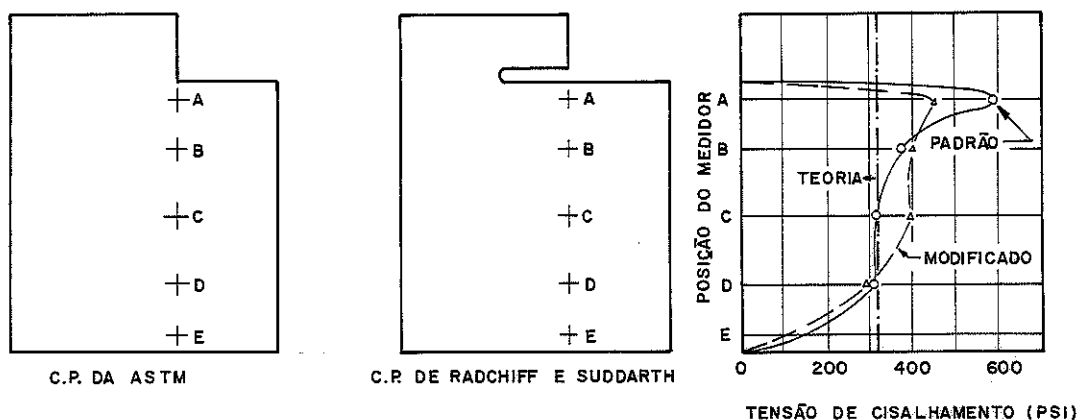


Figura 2.9 - Distribuição das tensões de cisalhamento

Bendton e Porter (12), em 1978, realizaram uma série de ensaios de cisalhamento utilizando dois tamanhos de corpos de prova ($1 \frac{1}{2}$ ou 2") e três planos de cisalhamento.(fig. 2.10).

A análise dos dados mostrou não haver diferença significativa devido ao tamanho do corpo de prova nas três direções, mas mostrou a existencia de diferença significativa entre o cisalhamento radial e o tangencial. Este estudo foi realizado para uma única espécie de madeira.

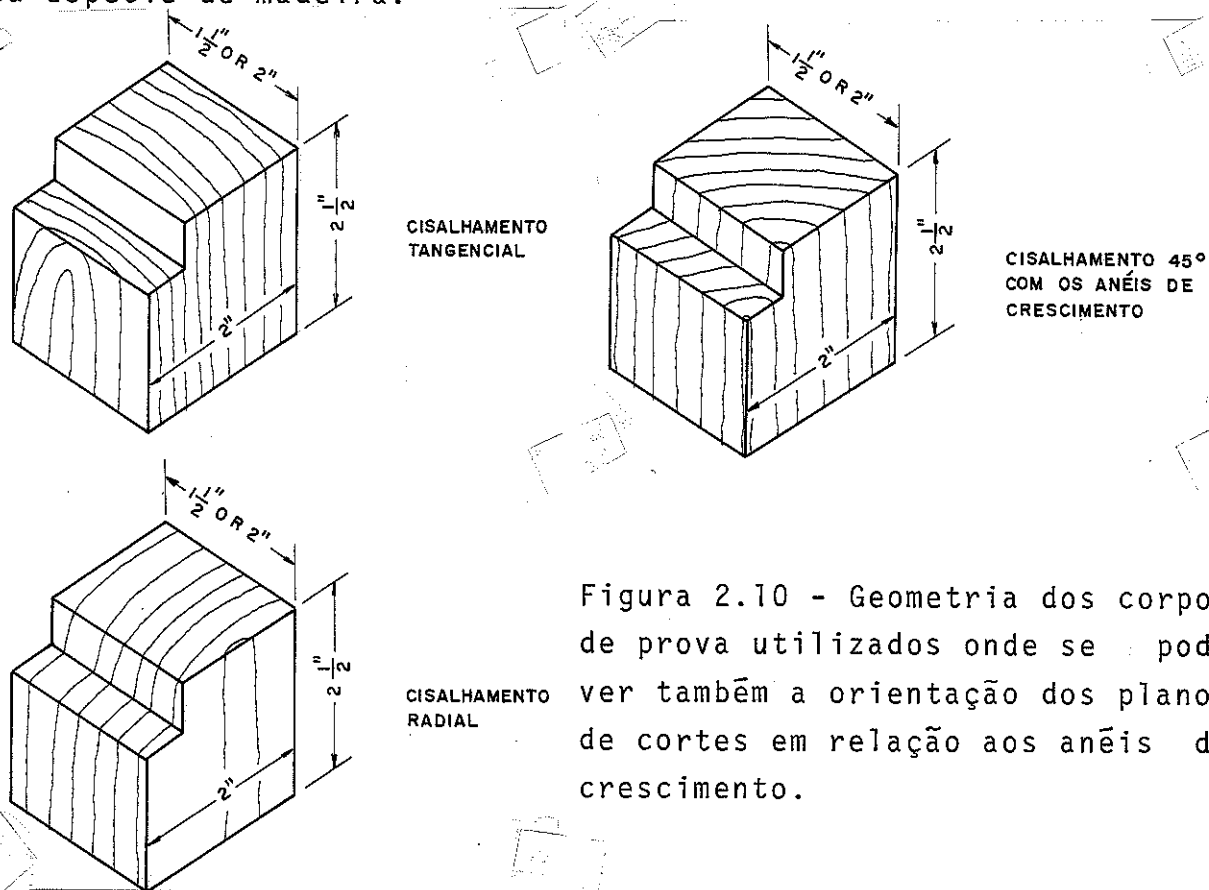


Figura 2.10 - Geometria dos corpos de prova utilizados onde se pode ver também a orientação dos planos de cortes em relação aos anéis de crescimento.

(12) BENDTSEN, B.A. & PORTER, S. - Comparison of results from standard - P.54-56

Zander (13), em 1979, estudou a variação da tensão de ruptura por cisalhamento em corpos de prova colados (fig. 2.11), em função do teor de umidade e da densidade aparente da madeira para o Pinho do Paraná. A equação obtida pelo ajuste seguindo o método dos mínimos quadrados é:

$$\tau = -1362,32 - 6,11U + 5110,58D + 16,03 UxD - 0,13U^2 - 4.432.73D^2 \quad (2.2)$$

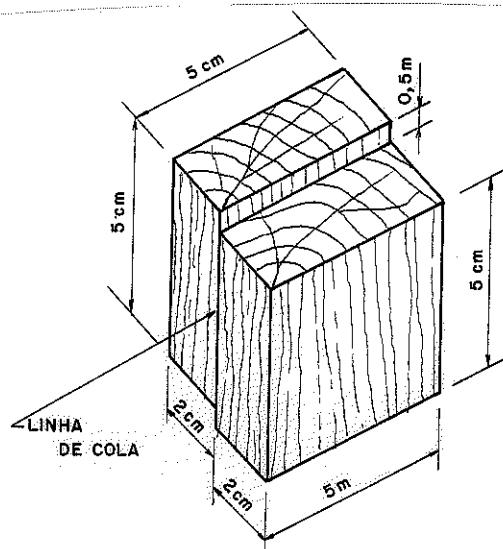


Figura 2.11 - Corpo de prova usado para avaliar a resistência ao cisalhamento da colagem.

2.3 - CISALHAMENTO NA FLEXÃO

Em uma viga sujeita a flexão simples, as tensões de cisalhamento numa seção transversal são dadas pela seguinte expressão:

$$\tau = \frac{V \cdot S}{b \cdot I} \quad (2.3)$$

sendo:

- τ = tensão de cisalhamento
- V = esforço cortante
- S = momento estático
- b = largura da peça
- I = momento de inércia

(13) TORRES ZANDER, J.R. - Cálculo e fabricação de peças de madeira laminada.
São Carlos, EESC - USP, 1979 - Orientação: Joao Cesar Hellmeister.

A distribuição das tensões de cisalhamento ao longo da altura da viga é parabólica. Figura 2.12

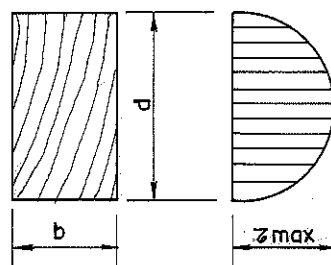


Figura 2.12 - Distribuição das tensões de cisalhamento numa seção retangular.

Para o caso da madeira, a distribuição das tensões na proximidade dos apoios e das cargas têm sido questionada devido ao efeito da compressão normal exercida pelas reações de apoio ou pelas cargas atuantes.

Vários trabalhos têm sido realizados para mostrar que a distribuição de tensões, nessas áreas, não se apresenta na forma convencional da resistência dos materiais.

Cowan, 1962(14) estudou o cisalhamento em vigas de madeira contínuas e simplesmente apoiadas e admitiu uma distribuição de tensões retilínea nas seções próximas dos apoios, dada pela seguinte expressão:

$$\tau = \frac{2V}{bd^2} \left(\frac{d}{2} - y \right) \quad (2.4)$$

Sendo:

y = a posição da fibra em relação à linha neutra.

Para o caso da viga de seção retangular, a ordenada máxima corresponde a :

$$\tau = \frac{2V}{bd} \quad (2.5)$$

Os resultados experimentais obtidos por Cowan estão resumidamente indicados nas figuras 2.13, 2.14 e 2.15.

(14) COWAN, W.C. - Shear stress in two wood beams over wood block supports.

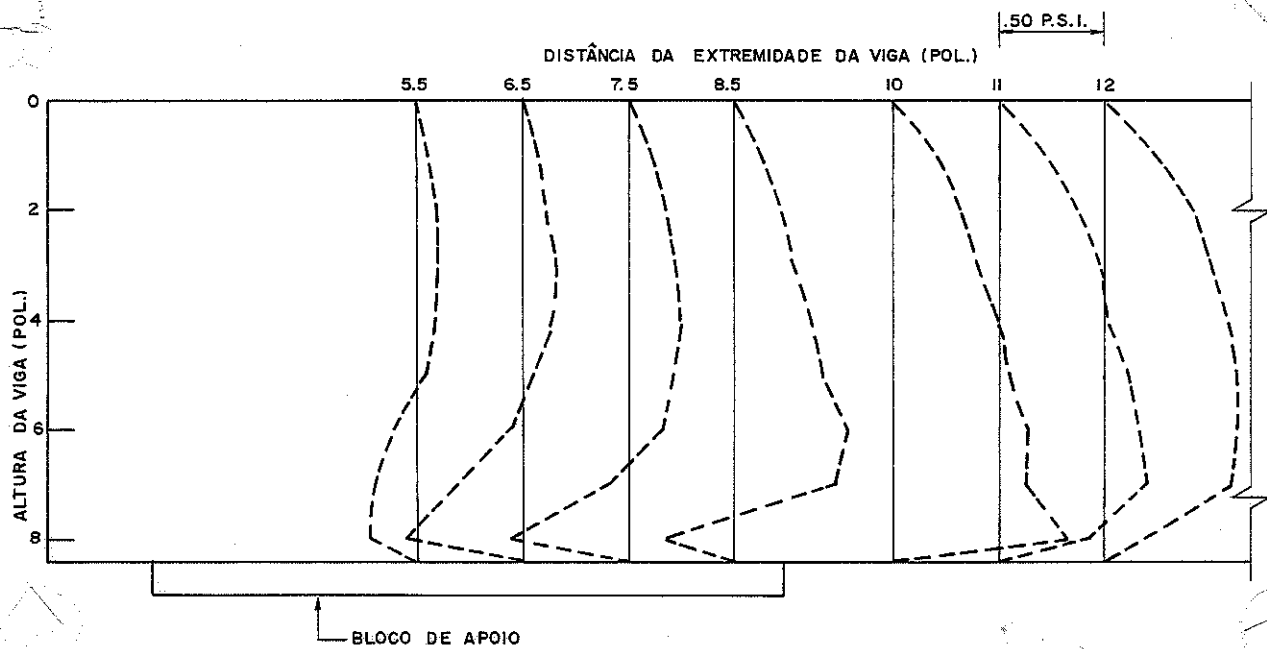


Figura 2.13 - Distribuição das tensões de cisalhamento nas seções próximas do apoio.

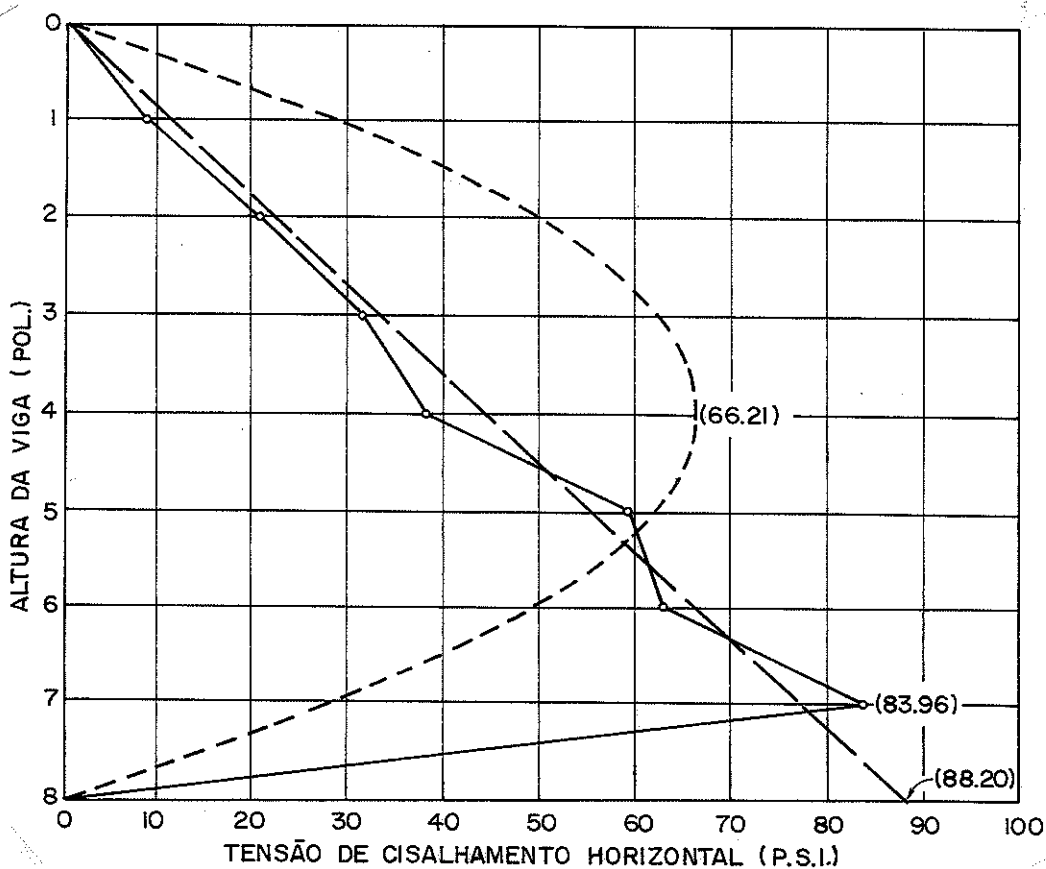


Figura 2.14 - Distribuição das tensões teórica, experimental e proposta na seção 10 da Fig.2.13.

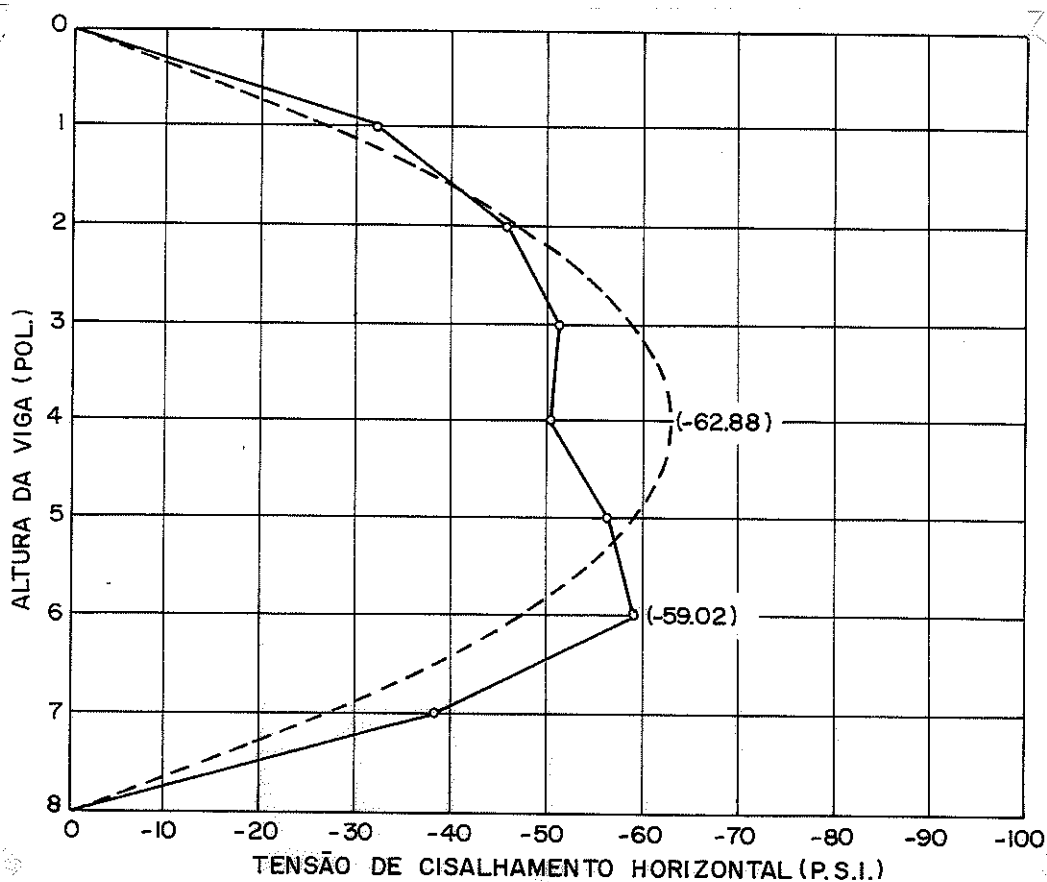


Figura 2.15 - Distribuição das tensões teóricas e experimentais na seção II da Fig. 2.13

Keenan, 1974 (15), estudou a influência da compressão perpendicular no cisalhamento em vigas de madeira e traçou as linhas de iguais tensões normais e de cisalhamento no apoio. Figura 2.16 (a), (b) e (c).

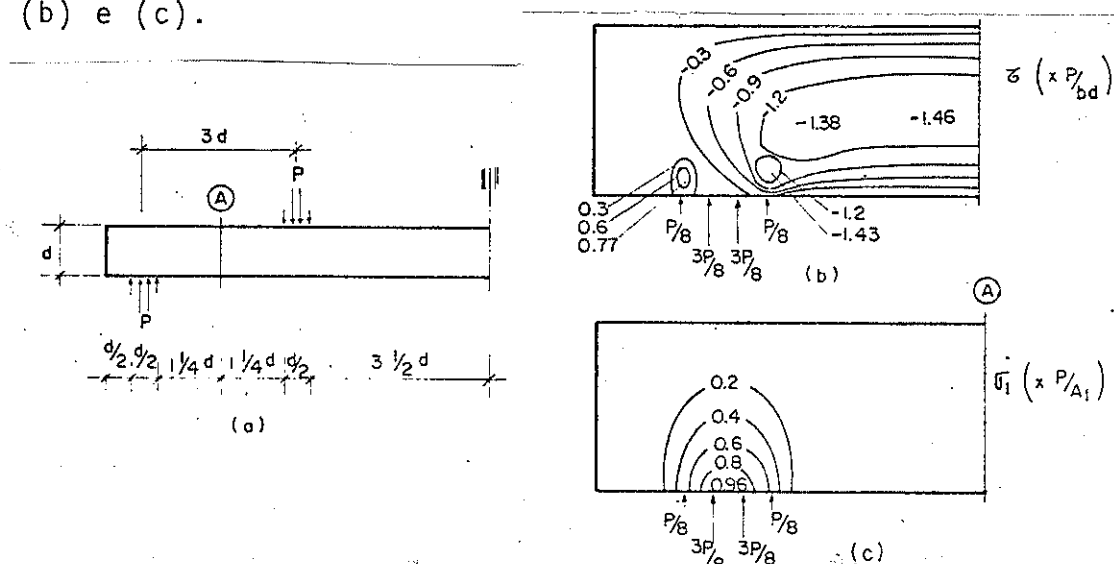


Figura 2.16 - Linhas de iguais tensões normais e de cisalhamento no apoio de vigas de madeira

(15) KEENAN, F.J. - *Shear strength of wood beams*. p. 63

Longworth, 1977 (16) realizou o estudo do cisalhamento em vigas de Douglas-fir laminadas e coladas e relacionou a tensão máxima de cisalhamento com a chamada área de corte e volume de corte, como indicam as figuras 2.17 (a) e (b).

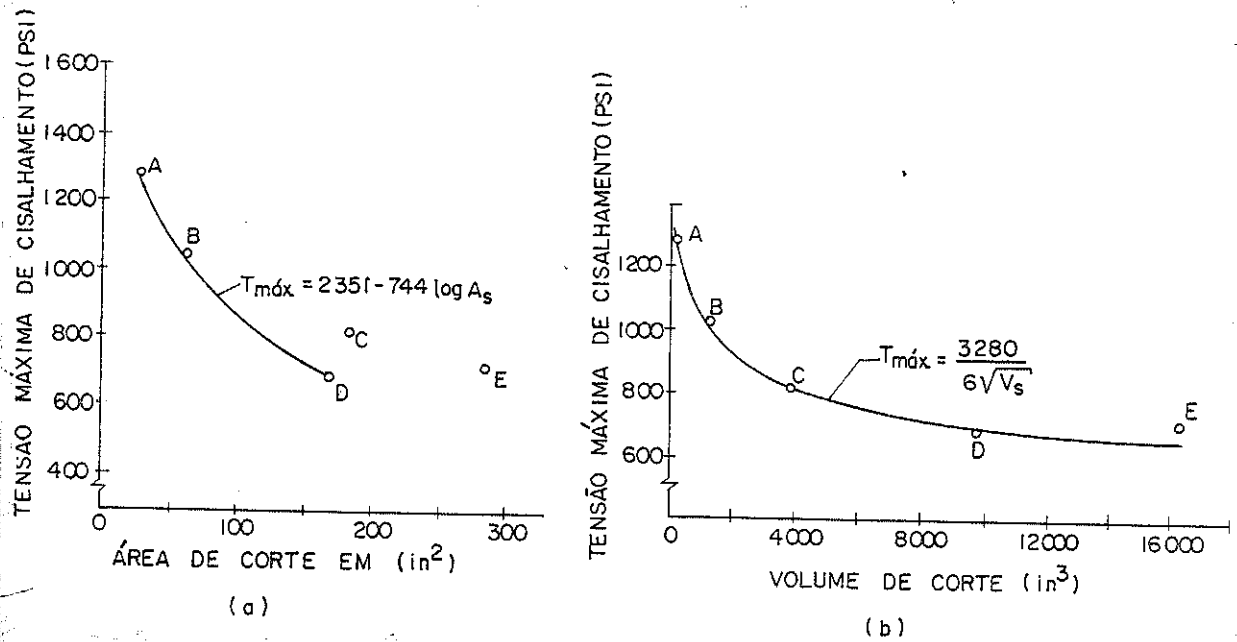


Figura 2.17 - Relações entre as tensões de cisalhamento e a área de corte e o volume de corte.

Radcliff e Suddarth (17), em 1955, obtiveram a distribuição de tensões de cisalhamento na linha neutra do corpo de prova da Figura 2.18 (b) e chegaram à conclusão que a distribuição de tensões obtidas se aproxima bastante da teórica e sugerem o ensaio de cisalhamento na flexão utilizando o corpo de prova da Figura 2.19, dimensionado para romper por cisalhamento. Também no trabalho de Radcliff e Suddarth a madeira foi considerada como material isotrópico, para obtenção das tensões de cisalhamento.

(16) LONGWORTH, J. - Longitudinal shear strength of timber beams. p. 19-23

(17) RADCLIFF, B.M. et alli - *op. cit.*

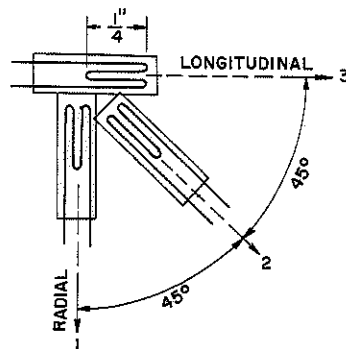
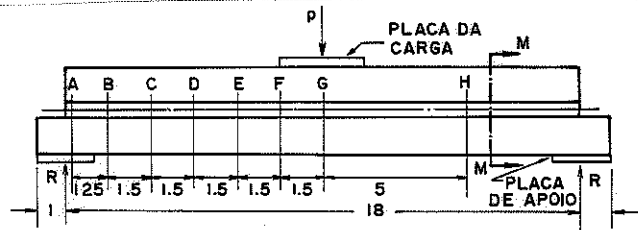
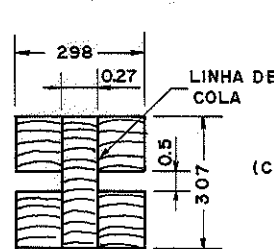


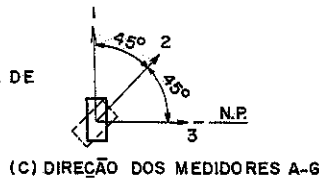
Figura 2.18 (a)-Disposição dos medidores



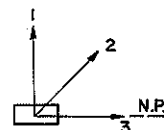
(a) VIGA EM I COLADA



(b) SECÃO M-M



(c) DIREÇÃO DOS MEDIDORES A-6



(d) DIREÇÃO DO MEDIDOR H

Figura 2.18 (b)-Detalhes da viga colada para se obter a distribuição de tensões.

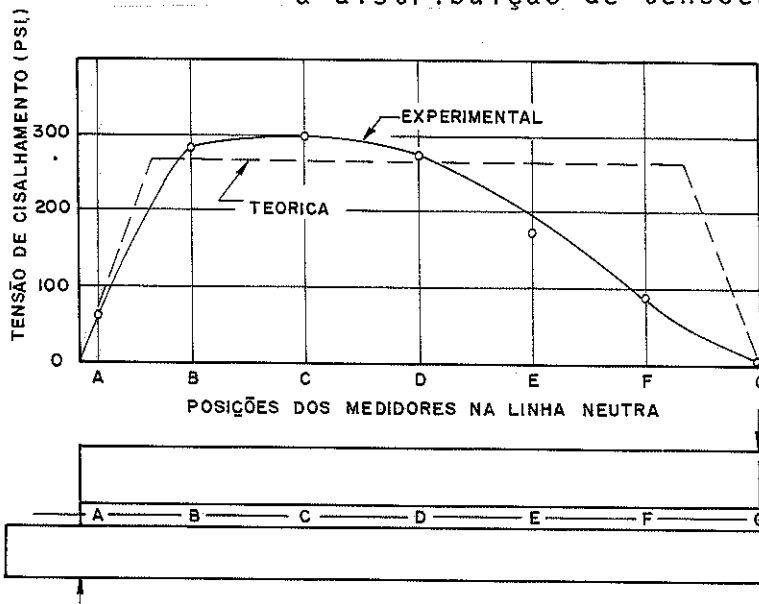


Figura 2.18 (c)-Distribuição de tensões teóricas e experimentais do modelo da Fig.10 (b).

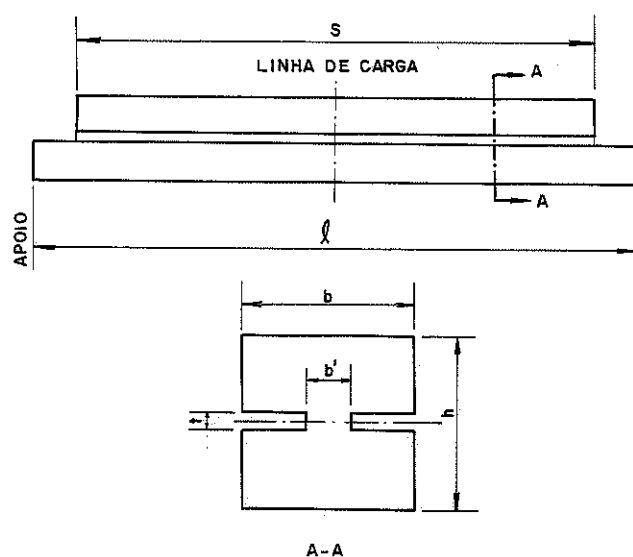


Figura 2.19 - Modelo de corpo de prova para ruptura por cisalhamento na flexão.

Newlin, Heck e March (18), em 1944, realizaram uma análise matemática do cisalhamento em vigas de madeira partidas longitudinalmente, figura 2.20, tendo por base as equações diferenciais de equilíbrio (2.6) e (2.7).

$$\frac{\partial X_x}{\partial x} + \frac{\partial X_y}{\partial y} = 0 \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial X_y}{\partial x} = 0 \quad (2.7)$$

Sujeitas às condições de contorno (2.8), (2.9) e (2.10)

$$X_y = 0, \text{ quando } y = c \quad (2.8)$$

$$X_y = \tau_0, \text{ constante, quando } y = -c \quad (2.9)$$

$$2t \int_{-c}^c X_y dy = W \quad (2.10)$$

(18) NEWLIN, J.A., et alli - New method of calculating longitudinal shear. p.739-744

Sendo:

X_x e X_y = as componentes das tensões

τ_0 = tensão de cisalhamento na flexão na L.N. de uma viga de seção retangular.

Esta análise matemática realizada resultou nos diagramas de tensões indicados na Figura 2.21, para uma viga de $(2\ 1/2" \times 4\ 1/2" \times 45")$ com vão de 42" e alma de $1/2"$ de largura.

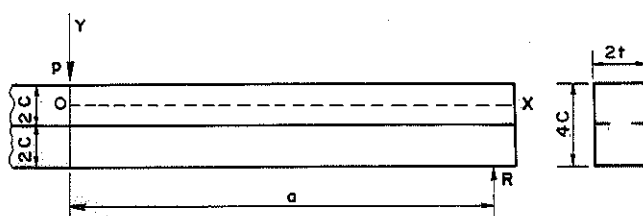


Figura 2.20 - Esquema da viga analisada com a respectiva notação empregada.

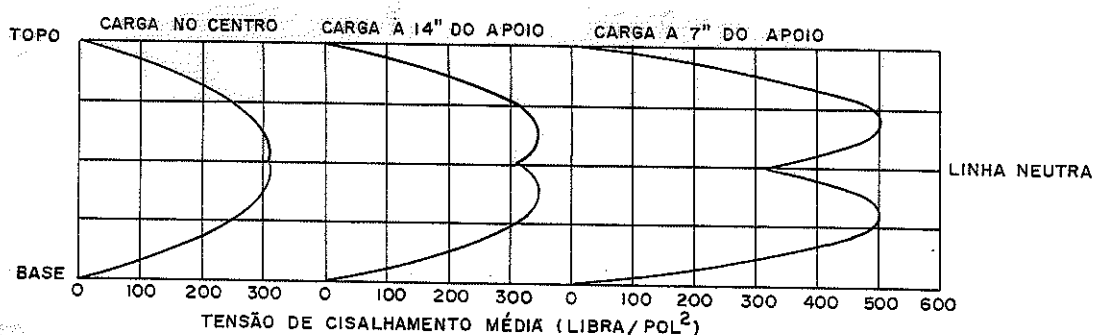


Figura 2.21 - Distribuição de tensões nas seções indicadas resultantes da análise matemática realizada.

Em seguida, realizaram ensaios com a referida viga para várias dimensões e posições diferentes de carregamentos e levaram até a ruptura por cisalhamento, obtendo os gráficos da figura 2.22 e, através das equações obtidas na análise matemática, concluíram que os resultados das análises, matemática e experimental, são compatíveis.

Deve-se lembrar, contudo, que não levaram em conta a concentração de esforços devidos as reações de apoio e aos pontos de aplicação das cargas, e isso implica em que as tensões de cisalhamento na linha neutra não são constantes como foi considerado

no trabalho dos eminentes pesquisadores.

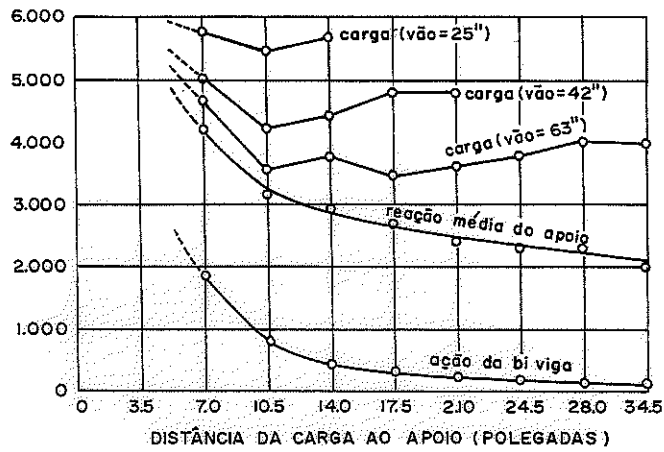


Figura 2.22 - Representação gráfica dos resultados dos ensaios.

Foschi e Barret (19), em 1976, realizaram um estudo sobre o cisalhamento longitudinal em vigas de Douglas-fir sob diversas condições de carregamento e concluíram que as tensões de ruptura por cisalhamento seguem a distribuição desenvolvida por Weibull para ruptura frágil. Eles analisaram também a pior posição da carga concentrada para o cisalhamento em função da relação l/d (vão/altura da viga) como indica a figura 2.23.

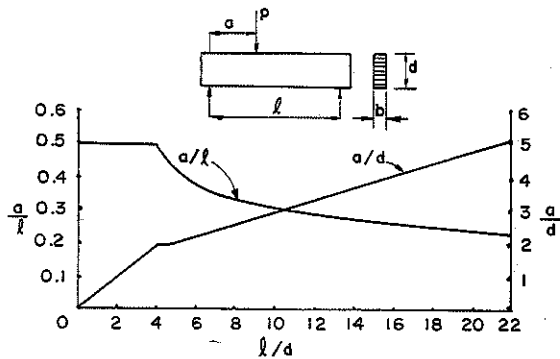


Figura 2.23 - Pior posição da carga concentrada em função de l/d

(19) FOSCHI, R.O., and BARRET, J.D. Longitudinal shear strength of Douglas-fir. p. 198 - 208.

Liu (20), em 1980, fez análise do cisalhamento em vigas de madeira, denominando-a "Análise Weibull". Ele considerou que o esforço cortante na extensão das placas de apoio e das placas de carregamento se distribui uniformemente como indica a figura 2.24. As tensões atuantes em qualquer seção foram consideradas como distribuídas parabolicamente. Deve-se lembrar contudo que, nas seções próximas dos apoios, a distribuição das tensões não segue a lei parabólica devido ao efeito da compressão normal.

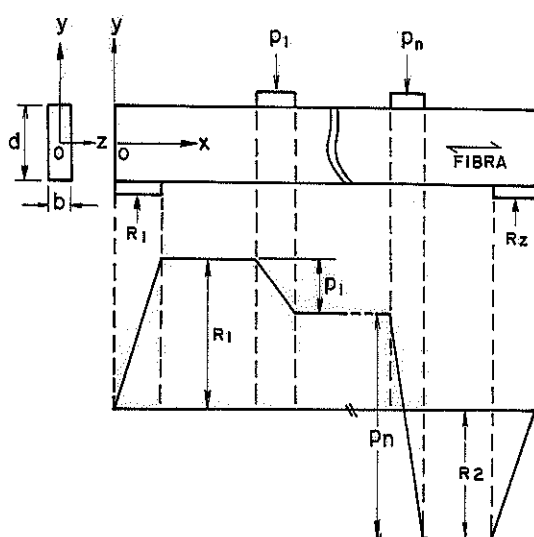


Figura 2.24 - Diagrama de esforço cortante.

Liu realizou uma análise estatística baseada na distribuição de Weibull, apoiado nos resultados experimentais obtidos por Longwort, em 1977 (21), em vigas laminadas e coladas sob várias condições de carregamento. Concluiu que a influência da compressão exercida pelos blocos de apoio é relativamente pequena.

(20) LIU, J. Y. - Shear strength of wood beams. p. 2035-2052

(21) LONGWORT, J. - Longitudinal shear strength of timber beams. p. 19-23

2.4 - MÉTODOS DE ENSAIO

Os métodos de ensaio de cisalhamento das principais normas internacionais estão indicados a seguir:

2.4.1 - LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL (PORTUGAL)

A especificação E 78-1960, (22), prescreve o ensaio de cisalhamento na madeira nas direções radial e tangencial conforme o dispositivo da Figura 2.25 e o corpo da Figura 2.26.

Esta norma prevê a correção da tensão de ruptura por cisalhamento em função da umidade de acordo com a expressão 2.1, para a umidade de 12%.

$$\tau_{12} = \tau H [1 + K_S (H - 12)] \quad (2.1)$$

O valor K_S é o coeficiente angular da reta tangente ao diagrama tensão de ruptura versus o teor de umidade, obtido no ensaio de 10 corpos de prova em diversas umidades, no ponto correspondente a umidade H .

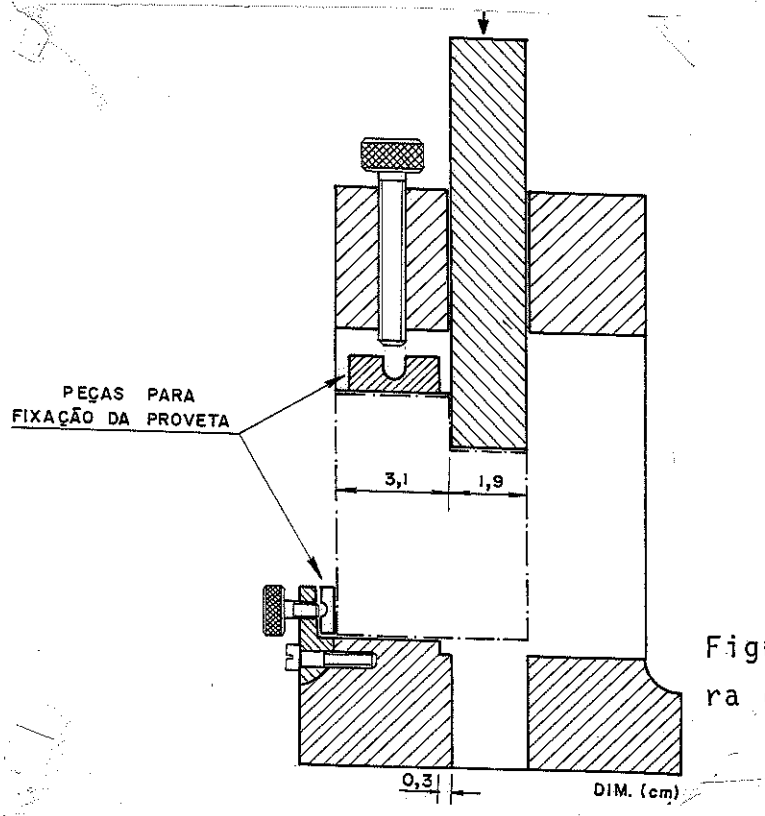


Figura 2.25 - Dispositivo para ensaio de corte.

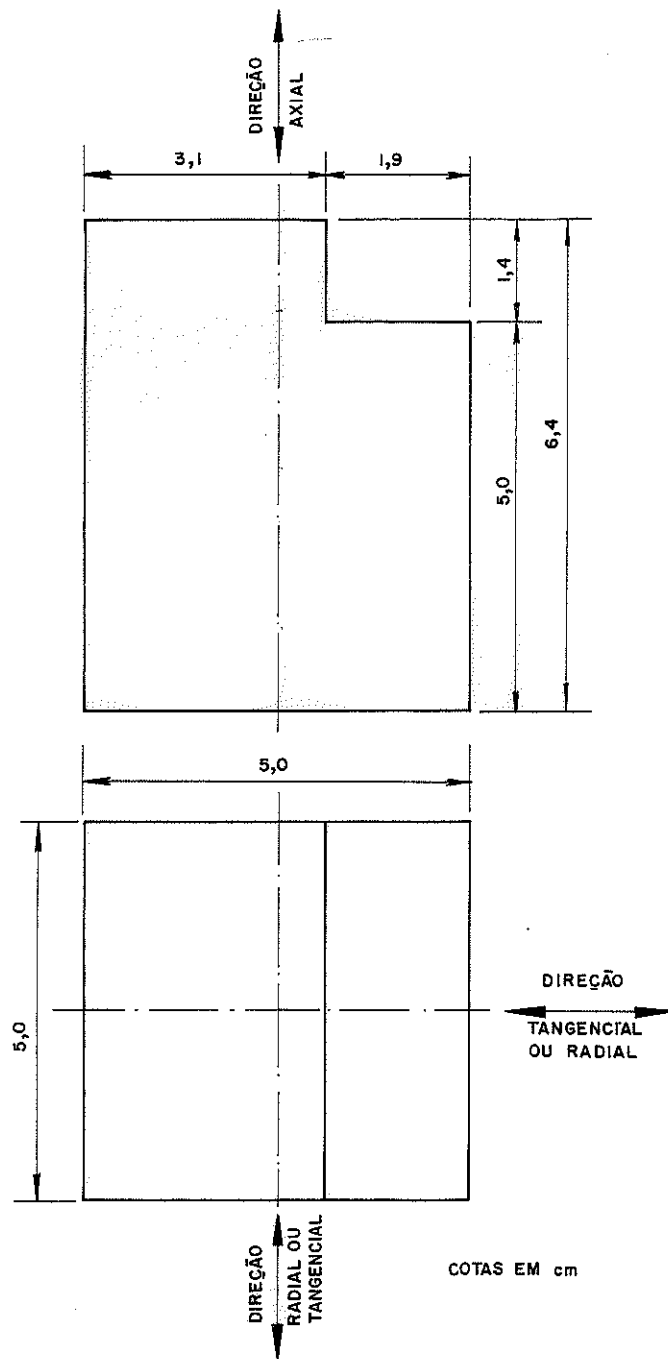


Figura 2.26 - Corpo de prova para o ensaio de corte.

2.4.2 - MÉTODO BRASILEIRO PARA O ENSAIO DE MADEIRAS (MB-26)

O MB-26, (23), prescreve o ensaio de cisalhamento em 48 corpos de prova, sendo 24 de madeira verde e 24 para madeira seca ao ar. O corpo de prova deve ser extraído para o cisalhamento no plano tangente aos anéis de crescimento como indica a Figura 2.27. As dimensões, indicando décimos de milímetros, e o número de corpos de prova exigem uma reavaliação do método.

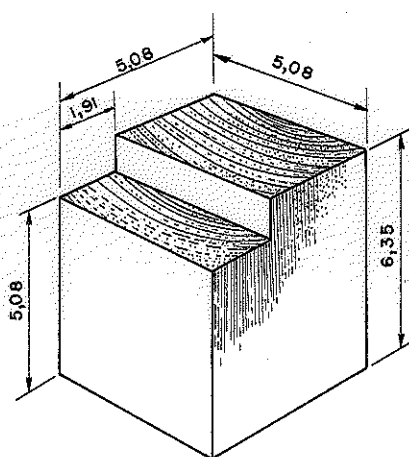


Figura 2.27 - Corpo de prova de cisalhamento.

2.4.3 - NORMA FRANCESA

A norma francesa para ensaio de cisalhamento, (24), prescreve um ensaio de tração no corpo de prova da Figura 2.28, para obter a tensão de ruptura por cisalhamento. O ensaio de tração e o corpo de prova exigem uma execução mais elaborada. As áreas de cisalhamento são diminutas em relação aos corpos de prova descritos anteriormente.

(23) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Ensaio Físicos e Mecânicos da Madeira . Item 16

(24) L'ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION - Essai de Cisalhement.NFB 51-012

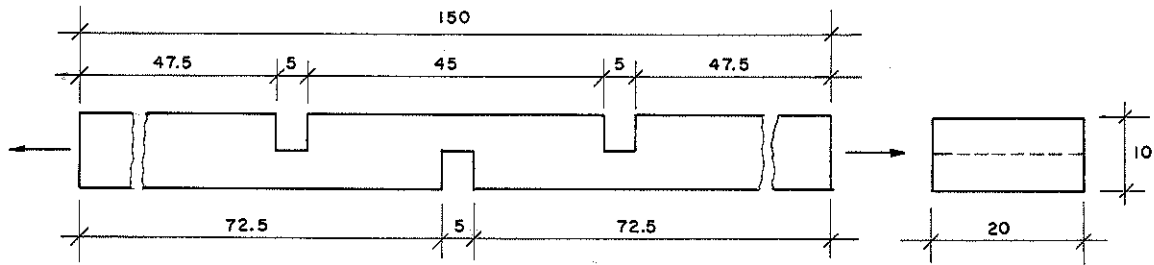


Figura 2.28 - Corpo de prova para ensaio de cisalhamento. (cotas em mm)

2.4.4 - ASSOCIAÇÃO AMERICANA DE ENSAIO DE MATERIAIS (ASTM)

A ASTM, (25), adota o corpo de prova indicado na figura 2.29 e recomenda o ensaio através de amostras de seis pares de corpos de prova, metade na direção radial e metade na direção tangencial aos anéis de crescimento. O dispositivo do ensaio está representado na figura 2.30.

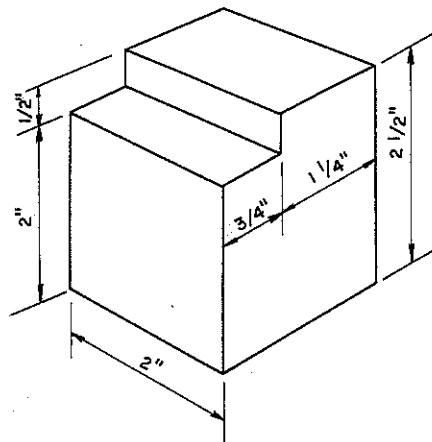


Figura 2.29 - Geometria do corpo de prova da ASTM

(25) AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - Standard Method of testing small clear specimens of timber

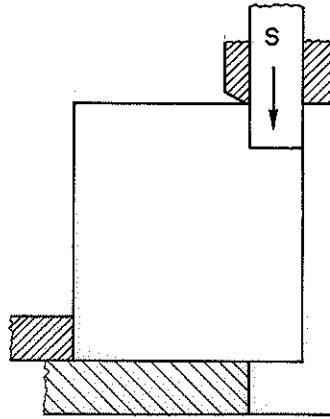


Figura 2.30 - Esquema do dispositivo da ASTM para ensaio de cisalhamento.

A norma DIN, (26), prescreve o ensaio de cisalhamento em corpos de prova cúbicos com arestas de $(50 \pm 0,5\text{mm})$, figura 2.31, e recomenda o ensaio nos planos radiais e tangenciais aos anéis de crescimento. O dispositivo do ensaio está indicado na figura 2.32.

O procedimento adotado pela norma alemã está de acordo com a Organização Internacional de Normalização ISO, (27).

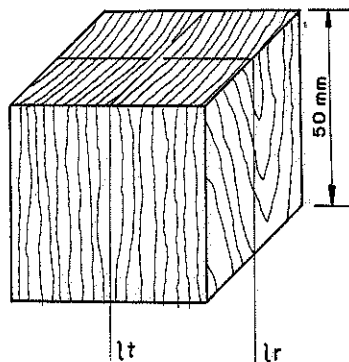


Figura 2.31 - Corpo de prova alemão para ensaio de cisalhamento.

(26) DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG - Bestimmung der Scherfestigkeit in Faserrichtung - DIN 52.187.

(27) INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - Determination of ultimate shearing stress parallel to grain

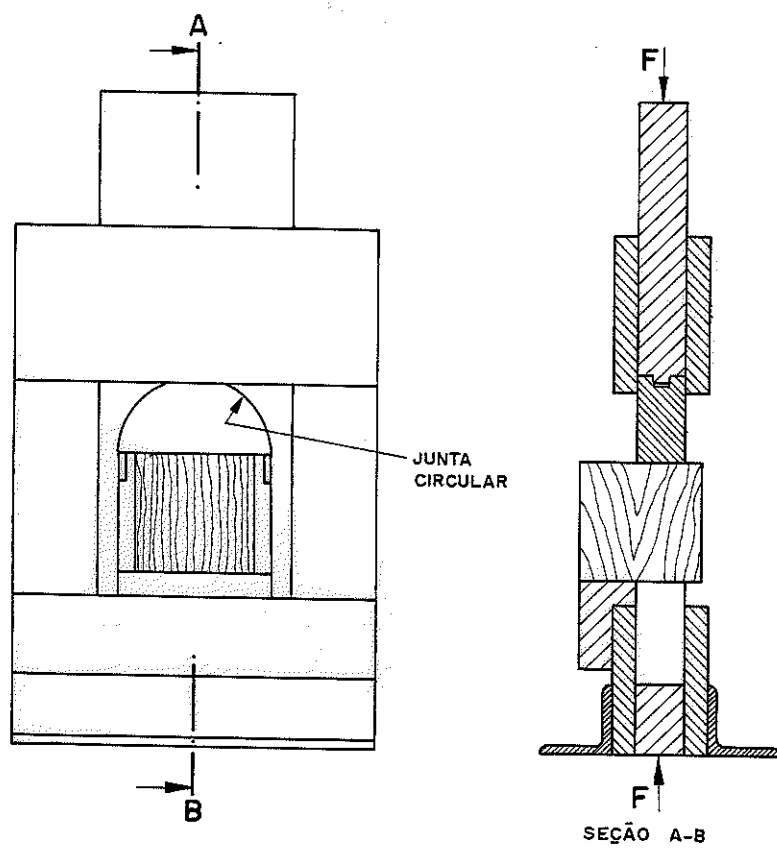


Figura 2.32 - Dispositivo alemão para ensaio de cisalhamento

3.1 - INTRODUÇÃO

A madeira é um material ortotrópico, isto é, apresenta três planos ortogonais de simetria. Neste trabalho deu-se destaque aos planos radial e tangencial, figura 3.1

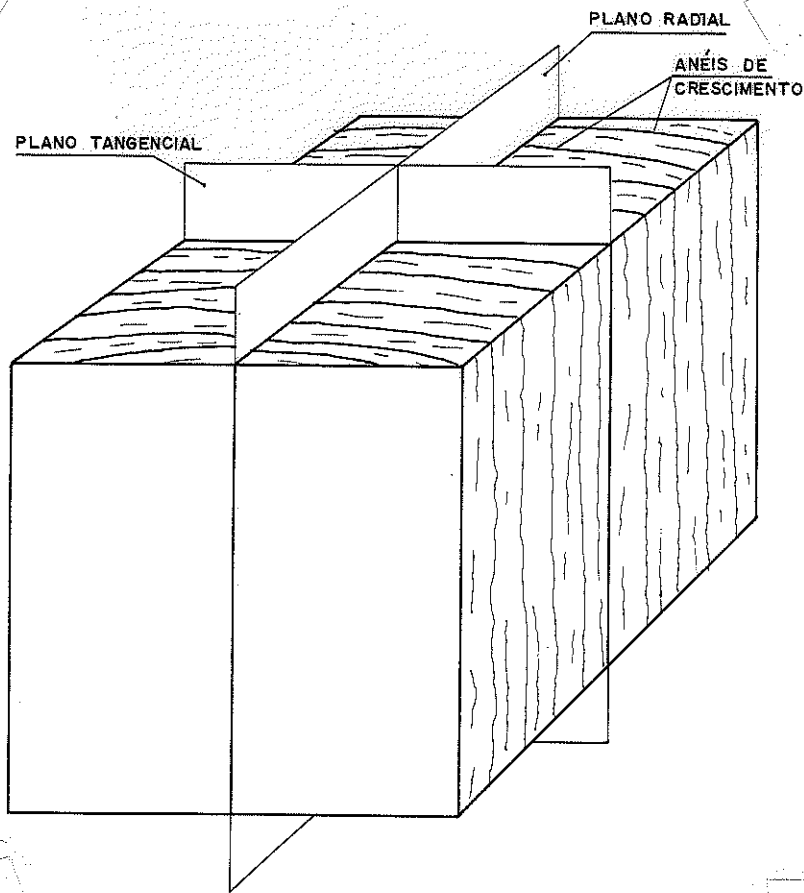


Figura 3.1 - Planos Radial e Tangencial.

O esforço cortante segundo estes planos pode ser paralelo ou normal às fibras.

As normas internacionais tratam apenas do cisalhamento paralelo tangencial e do cisalhamento paralelo radial.

Neste trabalho pretende-se tratar também do cisalhamento paralelo mas com ângulos de 0° a 90° , isto é, do cisalhamento

tangencial ao cisalhamento radial (cisalhamento intermediário).

Pretende-se ainda tratar do cisalhamento normal tangencial e do cisalhamento normal radial, denominado, nos Estados Unidos, como Rolling Shear (28).

3.2 - CONCEITOS E CLASSIFICAÇÃO

3.2.1 - Cisalhamento Paralelo

O cisalhamento paralelo às fibras resulta da aplicação da carga de cisalhamento seguindo a direção paralela às fibras da madeira.

O cisalhamento paralelo pode ser tangencial, radial e intermediário.

O Cisalhamento Paralelo Tangencial (PT) ocorre segundo um plano paralelo às fibras e tangente aos anéis de crescimento da madeira: plano tangente - ação paralela às fibras.

O Cisalhamento Paralelo Radial (PR) ocorre segundo um plano paralelo às fibras e contendo raios medulares da madeira: plano radial - ação paralela às fibras .

É de interesse também o estudo do cisalhamento paralelo segundo planos inclinados em relação ao plano tangencial o qual será designado como cisalhamento paralelo intermediário.

3.2.2 - Cisalhamento Normal

O cisalhamento normal às fibras resulta da aplicação da carga de cisalhamento segundo a direção normal às fibras da madeira.

O cisalhamento normal pode ser tangencial ou radial, não se considerando as posições intermediárias.

O Cisalhamento Normal Tangencial (NT) ocorre segundo um plano normal às fibras e tangente aos anéis de crescimento da madeira: plano tangencial - ação normal às fibras.

(28) FOREST PRODUCTS LABORATORY - Wood handbook: Wood as an engineering material
p. 4.4 .

O Cisalhamento Normal Radial (NR) ocorre segundo um plano normal às fibras e contendo raios medulares da madeira: plano radial - ação normal às fibras.

3.3 - EXPERIMENTAÇÃO REALIZADA

Para avaliar o comportamento da madeira quando submetida a esforços cisalhantes, fêz-se um estudo experimental para verificar a dependência e a correlação entre as diferentes modalidades possíveis de cisalhamento.

3.3.1 - Cisalhamento Paralelo e Normal

Tomando como primeira opção a Peroba Rosa, (*Aspidosperma polyneuron*), foram escolhidas 3 (três) barras de dimensões 6 x 6 cm tendo as camadas de crescimento paralelas a uma face. Destas barras foram cortadas 16 cubos de 5 cm de aresta e feita uma escolha ocasional de 4 a 4 corpos de prova para realizar os ensaios de cisalhamento paralelo radial e tangencial e de cisalhamento normal radial e tangencial. A figura 3.2 indica a posição das camadas de crescimento da madeira em relação ao plano escolhido para o cisalhamento.

Os ensaios foram realizados com a madeira seca ao ar, na Máquina Universal ASMLER do LaMEM, à velocidade de 2,5 MPa/min.

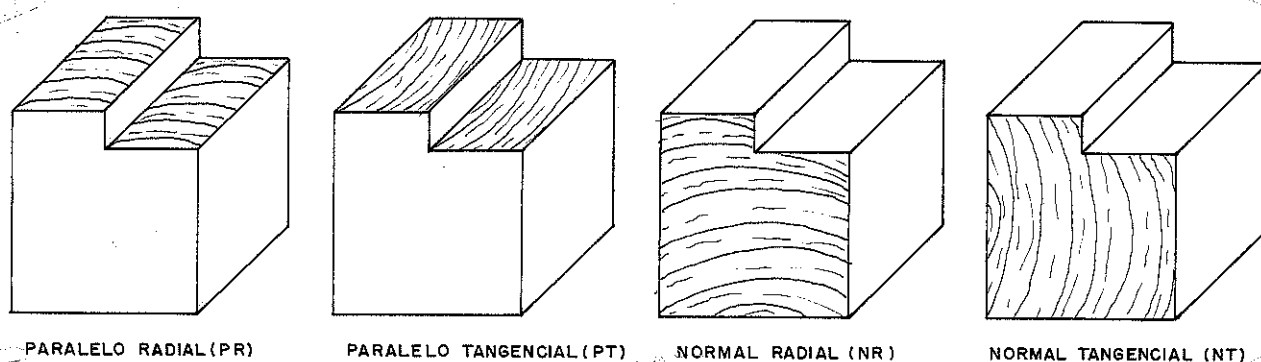


Figura 3.2 - Corpo de Prova nos quais pode-se ver a disposição das camadas de crescimento.

Os resultados obtidos são apresentados na tabela 3.1 .

Resultados equivalentes foram obtidos numa barra de Ca-
briúva Vermelha, madeira seca ao ar, e Jatobá, madeira verde, ta-
bela 3.2 .

ESPÉCIE : PEROBA ROSA - MADEIRA SECA AO AR														
BARRA 1				BARRA 2				BARRA 3						
Plano de Corte	Corpo de Prova	Teor de Umidade %	Dens. (g/cm ³)	Cisalhamento (MPa)	Plano de Corte	Corpo de Prova	Teor de Umidade %	Dens. (g/cm ³)	Cisalhamento (MPa)	Plano de Corte	Corpo de Prova	Teor de Umidade %	Dens. (g/cm ³)	Cisalhamento (MPa)
PR	1.11	14,13	0,84	16,27	PR	2.1	13,74	0,76	13,90	PR	3.2	14,33	0,79	14,34
	1.12	14,26	0,85	16,48		2.4	13,32	0,73	14,50		3.5	14,12	0,78	14,74
	1.14	13,97	0,85	15,93		2.5	13,31	0,75	15,23		3.8	14,01	0,78	15,56
	1.16	14,09	0,85	14,93		2.8	13,92	0,73	12,89		3.16	14,15	0,78	16,31
	Média	...	...	15,90		Média	...	...	14,13		Média	...	...	15,24
PT	1.2	14,35	0,83	19,91	PT	2.2	13,60	0,74	16,35	PT	3.9	14,27	0,78	15,75
	1.5	14,40	0,83	20,53		2.3	13,85	0,75	16,74		3.11	14,18	0,77	17,63
	1.6	14,63	0,84	20,00		2.6	13,31	0,76	16,65		3.14	14,14	0,79	17,62
	1.8	14,35	0,83	20,32		2.7	13,86	0,74	16,37		3.15	13,55	0,77	18,25
	Média	...	...	20,19		Média	...	...	16,53		Média	...	...	17,31
NR	1.7	14,07	0,83	9,11	NR	2.10	13,39	0,76	9,21	NR	3.4	14,20	0,79	9,21
	1.9	14,36	0,84	8,67		2.13	14,17	0,76	9,10		3.6	14,23	0,79	7,60
	1.10	13,99	0,84	8,84		2.14	14,17	0,76	8,82		3.12	14,16	0,78	8,68
	1.15	14,01	0,85	9,95		2.16	14,03	0,79	9,26		3.13	14,32	0,78	8,74
	Média	...	...	9,14		Média	...	...	9,10		Média	...	...	8,56
NT	1.1	14,33	0,84	9,57	NT	2.11	13,91	0,78	7,58	NT	3.1	14,04	0,78	9,37
	1.3	14,24	0,83	8,71		2.15	14,15	0,78	10,23		3.3	14,25	0,78	9,56
	1.4	14,22	0,85	7,94		2.9	13,86	0,77	9,40		3.7	14,06	0,79	9,94
	1.13	13,62	0,85	9,91		2.12	14,12	0,79	7,72		3.10	14,10	0,78	9,08
	Média	...	...	9,03		Média	...	...	8,73		Média	...	...	9,48

TABELA 3.1 - Tensões de Ruptura por Cisalhamento - PEROBA ROSA

ESPECIE : JATOBÁ (MADEIRA VERDE)						JATOBÁ (MADEIRA SECA AO AR)						ESPECIE: CABRIÚVA (MAD. SECA AO AR)					
BARRA 1						BARRA 2						BARRA 3					
Plano de Corte	Corpo de Prova	Teor de Umidade %	Dens. ³ (g/cm)	Cisalhamento (MPa)		Plano de Corte	Corpo de Prova	Teor de Umidade %	Dens. ³ (g/cm)	Cisalhamento (MPa)		Plano de Corte	Corpo de Prova	Teor de Umidade %	Dens. ³ (g/cm)	Cisalhamento (MPa)	
PR	1.1	45,00	1,12	11,92		PR	2.	13,95	0,95	15,73		PR	1.1	11,79	0,86	18,95	
	1.4	50,68	1,15	12,91			2.	13,81	0,90	16,36			1.4	11,91	0,86	19,96	
	1.7	53,11	1,15	12,36			2.	14,42	0,93	17,56			1.7	10,88	0,88	17,88	
	1.11	48,50	1,14	12,86			2.	14,05	0,92	15,25			1.8	11,91	0,83	19,07	
	Média	...	...	12,51			Média	...	...	16,22			Média	...	...	18,96
PT	1.9	51,75	1,17	16,14		PT	2.	14,36	0,90	21,69		PT	1.5	11,89	0,83	23,18	
	1.10	53,45	1,17	16,53			2.	14,53	0,90	18,56			1.6	11,86	0,87	23,54	
	1.15	45,59	1,11	14,40			2.	14,53	0,91	19,26			1.9	11,92	0,83	23,76	
	1.13	46,04	1,11	15,32			2.	13,90	0,90	18,49			1.14	11,86	0,84	23,59	
	Média	...	...	15,60			Média	...	...	19,50			Média	...	...	23,52
NR	1.6	52,88	1,15	6,99		NR	2.	14,80	0,91	9,20		NR	1.2	11,90	0,87	11,79	
	1.8	52,25	1,16	7,28			2.	14,40	0,90	10,50			1.13	11,91	0,83	12,25	
	1.14	46,26	1,12	6,96			2.	14,56	0,90	11,35			1.15	12,02	0,83	11,87	
	1.16	45,97	1,12	6,76			2.	14,65	0,90	9,42			1.16	10,96	0,86	13,47	
	Média	...	...	7,00			Média	...	...	10,12			Média	...	...	12,34
NT	1.2	48,82	1,14	8,78		NT	2.	15,65	0,94	12,68		NT	1.10	11,95	0,88	12,99	
	1.3	47,79	1,14	8,36			2.	15,03	0,92	11,30			1.11	12,14	0,83	12,85	
	1.5	51,98	1,17	9,40			2.	14,30	0,90	9,45			1.12	10,95	0,87	13,20	
	1.12	46,44	1,14	7,03			2.	14,10	0,90	10,20			1.13	11,95	0,83	12,98	
	Média	...	...	8,39			Média	...	...	10,91			Média	...	...	13,00

TABELA 3.2 - Tensões de Ruptura por Cisalhamento - JATOBÁ e CABRIÚVA.

3.3.1.1 - Análise de Resultados

a - Cisalhamento Paralelo Radial e Tangencial

É muito pequeno o número de ensaios realizados, mas a diferença sistemática entre o cisalhamento paralelo radial e o cisalhamento paralelo tangencial é confirmada através da análise apresentada nas tabelas 3.3, 3.4 e 3.5 para a Peroba Rosa, Jatobá e Cabriúva, respectivamente.

Para cada grupo de 4 resultados tem-se $ns^2 = \sum (\tau - \bar{\tau})^2$, sendo s a estimativa do desvio padrão do grupo.

Para a comparação dos valores médios do cisalhamento paralelo-radial e paralelo-tangencial, tem-se, conforme (29):

$$s_{\text{médio}} = \sqrt{\frac{(n_1-1)s_1^2 + (n_2-1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$$

e

$$t = \frac{\tau_{pr} - \tau_{pt}}{s_{\text{med}}} \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2}{n_1 + n_2}}$$

O nível de significância da hipótese nula é dado por $= P \left\{ t \geq t_0 \right\}$, tabelado para a distribuição t de Student (30).

Neste trabalho, a hipótese nula será considerada significativa para $\alpha \geq 10\%$, evidenciando a igualdade entre as médias.

(29) PARADINE, C. G. & RIVETT, B. H. P. - Métodos estatísticos para tecnólogos. p. 137.

(30) BOX, G. E. P. et alli - Statistics for experimenters. p. 631

ESPÉCIE : PEROBA ROSA			
TÍTULO : Comparação das Tensões nos Planos PR e PT			
Barra	Especificação	Resultados Obtidos .	Observações/ Conclusões
1	Hipótese Inicial	$\bar{\tau}_{pr} = \bar{\tau}_{pt}$	Supor igualdade entre as médias das populações.
	Desvio Padrão	$s = 0,526$	Dados : Tab. 3.1
	Valor de t_0	$t_0 = 11,53$	Dados : Tab. 3.1
	Nível de Significância	$\alpha < 0,05\%(31)$	Existe evidência da diferença das médias.
2	Hipótese inicial	$\bar{\tau}_{pr} = \bar{\tau}_{pt}$	Hipótese nula.
	Desvio Padrão	$s = 0,713$	Dados : Tab. 3.1
	Valor de t_0	$t_0 = 4,76$	Dados : Tab. 3.1
	Nível de Significância	$\alpha = 0,25\%(31)$	Existe evidência da diferença das médias.
3	Hipótese inicial	$\bar{\tau}_{pr} = \bar{\tau}_{pt}$	Hipótese nula.
	Desvio Padrão	$s = 0,985$	Dados : Tab. 3.1
	Valor de t_0	$t_0 = 2,972$	Dados : Tab. 3.1
	Nível de Significância	$\alpha = 1.4\%(29)$	Existe evidência da diferença das médias.

TABELA 3.3 - Análise Estatística do Cisalhamento Paralelo - PEROBA ROSA

(31) BOX, G.E.P. et alli - op.cit. p. 631

ESPÉCIE JATOBA			
TÍTULO : Comparação do Cisalhamento Paralelo-Radial e Paralelo-Tangencial.			
Barra	Especificação	Resultados Obtidos	Observações/Conclusões
1	Hipótese inicial	$\bar{\tau}_{pr} = \bar{\tau}_{pt}$	Supor igualdade entre as médias da população.
	Desvio Padrão	$s = 0,748$	Dados : Tab. 3.2
	Valor de t_0	$t_0 = 5,84$	Dados : Tab. 3.2
	Nível de Significância	$\alpha = 0,25\%$ (32)	Existe evidência da diferença entre as populações.
2	Hipótese nula	$\bar{\tau}_{pr} = \bar{\tau}_{pt}$	Supor igualdade das médias das populações.
	Desvio Padrão	$s = 1,275$	Dados : Tab. 3.2
	Valor de t_0	$t_0 = 3,64$	Dados : Tab. 3.2
	Nível de Significância	$\alpha = 0,25\%$ (32)	A hipótese nula não tem significância.

TABELA 3.4 - Análise Estatística do Cisalhamento Paralelo - JATOBA -

ESPÉCIE : CABRIÚVA			
TÍTULO : Comparação do Cisalhamento Paralelo-Radial e Paralelo-Tangencial			
Barra	Especificação	Resultados Obtidos	Observações/Conclusões
1	Hipótese inicial	$\bar{\tau}_{pr} = \bar{\tau}_{pt}$	Hipótese nula
	Desvio Padrão	$s = 0,641$	Tendo por base a Tab. 3.2
	Valor de t_0	$t_0 = 10,08$	Com base na Tab.3.2
	Nível de Significância	$\alpha < 0,05$ (32)	A hipótese nula não tem significância.

TABELA 3.5 - Análise Estatística do Cisalhamento Paralelo - CABRIÚVA -

(32) BOX, G.E.P. - et alli - op. cit. p. 631

b - Cisalhamento Normal-Radial e Normal-Tangencial

b.1 - Tipo de Ruptura

A ruptura dos corpos de prova ensaiados com a preocupação de avaliar o comportamento da madeira submetida ao cisalhamento normal é plástica, figura 3.3, diferenciando-se nitidamente da ruptura frágil do cisalhamento paralelo, observada em corpos de prova de madeira seca ao ar.

É possível interpretar-se a ruptura como tendo ocorrido por fendilhamento, ou seja, tração normal excêntrica.

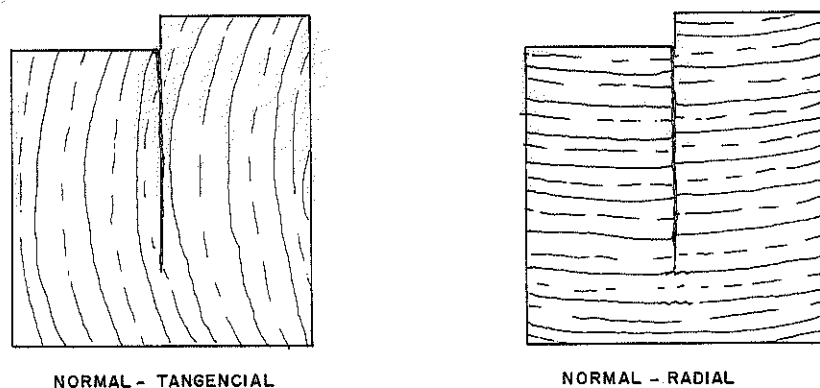


Figura 3.3 - Ruptura típica de Cisalhamento Normal Radial e Tangencial.

b.2 - Comparação das Médias

Observa-se, através das tabelas 3.1 e 3.2, não haver diferença significativa entre o cisalhamento normal-radial e o cisalhamento normal-tangencial. Esta observação é confirmada pela análise estatística apresentada nas tabelas 3.6, 3.7 e 3.8 para a Peroba Rosa, para o Jatobá e para a Cabriúva, respectivamente.

ESPÉCIE : PEROBA ROSA			
TITULO : Cisalhamento Normal Radial e Tangencial (teste t)			
Barra	Especificação	Resultados Obtidos	Observações/Conclusões
1	Hipótese inicial	$\bar{\tau}_{nr} = \bar{\tau}_{nt}$	Hipótese Nula.
	Desvio Padrão	$s = 0,734$	Dados: Tab. 3.1
	Valor de t_0	$t_0 = 0,212$	Dados: Tab. 3.1
	Nível de Significância	$\alpha = 40\%$ (33)	Existe evidência da igualdade das médias
2	Hipótese inicial	$\bar{\tau}_{nr} = \bar{\tau}_{rt}$	Hipótese Nula
	Desvio Padrão	$s = 0,927$	Dados: Tab. 3.1
	Valor de t_0	$t_0 = 0,564$	Dados: Tab. 3.1
	Nível de Significância	$\alpha = 30\%$ (33)	Existe evidência da igualdade das médias
3	Hipótese inicial	$\bar{\tau}_{nr} = \bar{\tau}_{nt}$	Hipótese Nula
	Desvio Padrão	$s = 0,758$	Dados: Tab. 3.1
	Valor de t_0	$t_0 = 0,783$	Dados: Tab. 3.1
	Nível de Significância	$\alpha = 25\%$ (33)	Existe evidência da igualdade das médias

TABELA 3.6 - Análise dos resultados obtidos no Cisalhamento Normal da PEROBA ROSA -

(33) BOX, G.E.P. - et alli - op. cit - p. 631

ESPÉCIE JATOBA			
TITULO : Cisalhamento Normal Radial e Tangencial			
Barra	Especificação	Resultados Obtidos	Observações/Conclusões
1	Hipótese inicial Desvio Padrão Valor de to Nível de Significância	$\bar{\tau}_{nr} = \bar{\tau}_{nt}$ s = 0,726 to = 1,707 $\alpha = 10\% (34)$	Hipótese nula Dados: Tab. 3.2 Dados: Tab. 3.2 Existe evidência da validade da hipótese nula.
2	Hipótese inicial Desvio Padrão Valor de to Nível de Significância	$\bar{\tau}_{nr} = \bar{\tau}_{nt}$ s = 1,218 to = 0,917 $\alpha = 20\% (34)$	Hipótese nula Dados: Tab. 3.2 Dados: Tab. 3.2 Existe evidência da validade da hipótese nula.

TABELA 3.7 - Análise Estatística dos Dados do Cisalhamento Normal - JATOBA -

ESPÉCIE : CABRIUVA			
TITULO : Cisalhamento Normal Radial e Tangencial			
Barra	Especificação	Resultados Obtidos	Observações/Conclusões
1	Hipótese inicial Desvio Padrão Valor de to Nível de Significância	$\bar{\tau}_{nr} = \bar{\tau}_{nt}$ s = 0,558 to = 1,673 $\alpha = 10\% (34)$	Hipótese nula. Dados: Tab. 3.2 Dados: Tab. 3.2 Existe evidência da validade da hipótese nula.

TABELA 3.8 - Análise dos Dados do Cisalhamento Normal - CABRIUVA.

(34) BOX, G.E.P. - et alli - op. cit - p. 631.

Relação entre o Cisalhamento Paralelo-Radial e o Cisalhamento Paralelo-Tangencial

Constatou-se, através da análise de resultados apresentada nas tabelas 3.3, 3.4 e 3.5, a existência de diferença de valores entre o cisalhamento paralelo-radial e o cisalhamento paralelo-tangencial.

Para reforçar esta observação, ampliou-se a amostragem realizada anteriormente.

Os resultados obtidos são apresentados na tabela 3.9. Cada resultado foi obtido através da média aritmética de dois corpos de prova semelhantes.

ITEM	ESPÉCIE DE MADEIRA	TENSÕES DE RUPTURA POR CISALHAMENTO			
		PR	PT	NR	NT
1	Peroba Rosa	13,92	15,50	7,95	8,21
2	Peroba Rosa	15,90	20,19	9,14	9,03
3	Peroba Rosa	14,13	16,53	9,09	8,73
4	Peroba Rosa	15,24	17,31	8,55	9,48
5	Jatobá	16,04	19,19	10,94	10,90
6	Jatobá	12,61	15,35	6,98	8,37
7	Jatobá	11,37	15,92	7,58	7,80
8	Jatobá	13,36	17,65	8,90	9,10
9	Cabriúva Vermelha	18,95	23,51	12,34	13,00
10	Pinho do Paraná	9,53	13,97	6,67	6,85
11	Jatobá	12,51	15,60	7,00	8,39
12	Jatobá	16,22	19,50	10,12	10,91
13	Jatobá	18,96	23,52	12,34	13,00

TABELA 3.9 - Tensões de ruptura para cada plano de corte para cada direção estudada (MPa).

A análise de regressão utilizando os resultados apresentados na tabela 3.9 , permitiu a obtenção da equação 3.1 .

$$\tau_{pr} = -1,09 + 0,87 \tau_{pt} \quad (3.1)$$

Através de 3.1 há evidência da correlação existente entre os valores do cisalhamento paralelo radial e do cisalhamento paralelo tangencial, com o índice de correlação $r^2 = 0,85$, altamente significativa.

Relação entre o Cisalhamento Normal e o Cisalhamento Paralelo

O método brasileiro de ensaio de madeiras, MB-26 (33) , prescreve o ensaio de cisalhamento segundo o plano tangencial.

Mais de 500 (quinhentas) toras de madeira de mais de 400 (quatrocentas) espécies brasileiras já foram ensaiadas pelo IPT (34).

Com a finalidade de obter comparação experimental entre o cisalhamento normal e o cisalhamento paralelo tangencial, os ensaios foram conduzidos utilizando-se pares de corpos de prova semelhantes para realizar a análise de regressão linear com base nos dados apresentados na tabela 3.9 .

Obteve-se a equação 3.2 .

$$\tau_{nt} = -0,73 + 0,57 \tau_{pt} \quad (3.2)$$

Os resultados obtidos apresentaram o coeficiente de correlação linear 0,85 , classificado como altamente significativa.

(33) A.B.N.T. - Ensaio Físicos e Mecânicos de Madeiras MB-26 - item 16

(34) INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - Boletim nº 31

Cisalhamento Paralelo Segundo Planos Inclinados
em Relação ao Plano Tangencial

Com o objetivo de estudar a resistência da madeira ao cisalhamento nos diversos planos inclinados em relação ao plano tangencial (cisalhamento paralelo intermediário), utilizou-se um corpo de prova cilíndrico de 5,0 cm de diâmetro e 5,0 cm de altura, figura 3.4, tendo em vista a facilidade do ensaio de cisalhamento em qualquer plano paralelo às fibras.

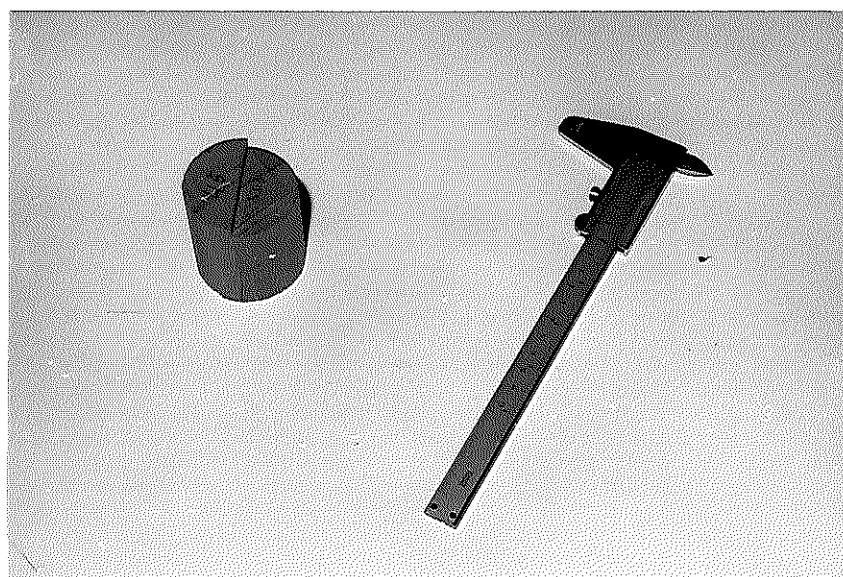


Figura 3.4 - Corpo de prova cilíndrico

Realizaram-se ensaios preliminares de cisalhamento nos corpos de prova cilíndricos e nos corpos de prova padrão do MB-26, verificando-se não existir diferença significativa entre os dois resultados.

A seguir foram selecionados 2(duas) barras de Peroba rosa e duas barras de Jatobá para os ensaios de cisalhamento paralelo intermediário, cada barra foi torneada até atingir o diâmetro de 5,0 cm. De cada barra cilíndrica foram extraídos 14(quatorze) corpos de prova de 5,0 cm de comprimento. Seleção ocasional destes corpos de prova permitiu seu ensaio segundo planos de 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° e 90° em relação ao plano tangencial.

Na figura 3.5 é apresentada uma série de corpos de prova.

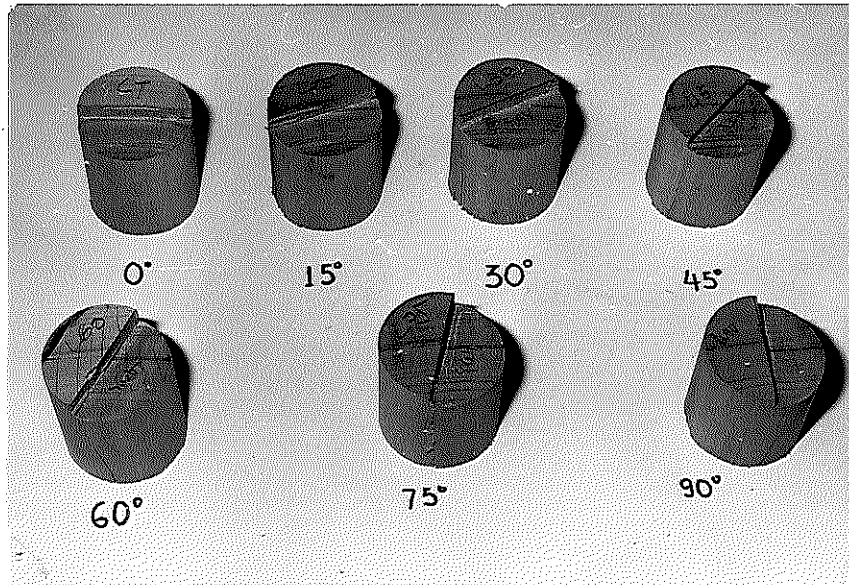


Figura 3.5 - Corpos de prova cilíndricos cisalhados segundo planos inclinados em relação aos anéis de crescimento.

O ensaio foi realizado na Máquina Universal de Ensaio AMSLER do LaMEM, através do dispositivo da figura 3.6, com uma velocidade de carregamento de 2,5 MPa, por minuto.

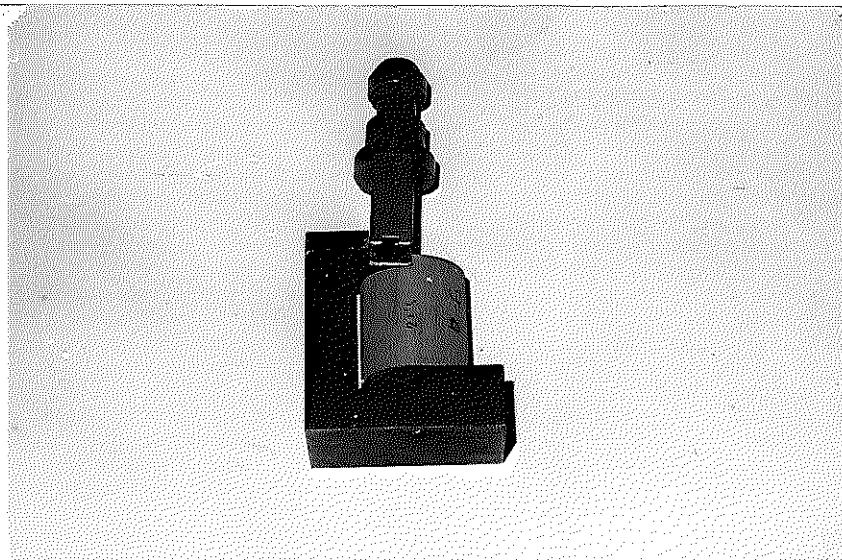


Figura 3.6 - Dispositivo do ensaio de cisalhamento utilizado para os corpos de prova cilíndricos.

Os resultados obtidos nos ensaios estão apresentados nas tabelas 3.10 e 3.11 para a Peroba Rosa e para o Jatobá.

ESPÉCIE : PEROBA ROSA				
ESTUDO : Variação da Tensão de Cisalhamento com os Planos de Corte.				
Barra	Plano de Corte	Corpos de Prova	Tensão de Ruptura (MPa)	Tensão Média (MPa)
1	PT	1.6	18,63	18,77
		1.14	18,92	
	P15	1.10	20,74	20,37
		1.11	20,00	
	P30	1.3	17,89	18,36
		1.8	18,84	
	P45	1.12	15,61	15,57
1.13		15,53		
P60	1.4	16,49	16,71	
	1.9	16,05		
P75	1.1	16,24	16,06	
	1.7	15,89		
PR	1.2	15,09	14,81	
	1.5	14,53		
2	PT	2.7	16,96	16,30
		2.11	15,64	
	P15	2.5	17,63	16,46
		2.6	15,29	
	P30	2.1	16,76	16,09
		2.12	15,42	
	P45	2.8	11,50	14,11
2.14		16,73		
P60	2.9	16,23	15,65	
	2.13	15,08		
P75	2.3	14,26	14,96	
	2.4	15,67		
PR	2.2	15,01	14,44	
	2.10	13,88		

TABELA 3.10 - Tensões de Ruptura - Cisalhamento Paralelo Intermediário -PEROBA ROSA

ESPÉCIE JATOBÁ				
ESTUDO : Variação do Cisalhamento nos Planos PT, P15, P30, P45, P60, P75 e PR				
Barra	Plano de Corte	Corpos de Prova	Tensão de Ruptura (MPa)	Tensão Média (MPa)
1	PT	1.3	18,14	17,65
		1.5	17,16	
	P15	1.7	14,27	15,89
		1.12	17,52	
	P30	1.2	18,69	18,35
		1.11	18,02	
	P45	1.8	16,72	17,28
1.14		17,84		
P60	1.1	15,24	16,03	
	1.6	16,83		
P75	1.10	14,95	14,16	
	1.13	13,38		
PR	1.4	14,19	13,36	
	1.9	12,51		
2	PT	2.4	15,21	14,92
		2.6	14,63	
	P15	2.5	14,24	15,21
		2.14	16,19	
	P30	2.7	14,96	14,91
		2.8	14,87	
	P45	2.9	14,89	14,73
2.10		14,58		
P60	2.2	13,25	13,83	
	2.13	14,41		
P75	2.1	14,61	14,04	
	2.12	13,47		
PR	2.3	12,76	12,58	
	2.11	12,41		

TABELA 3.11 - Tensões de Ruptura - Cisalhamento Paralelo Intermediário - JATOBÁ.

Ruptura dos Corpos de Prova Cilíndricos

A ruptura dos corpos de prova cilíndricos, apesar da inclinação dos planos de cisalhamento em relação ao plano tangencial, se apresenta de madeira semelhante à dos corpos de prova do Método Brasileiro (MB-26), figura 3.7.

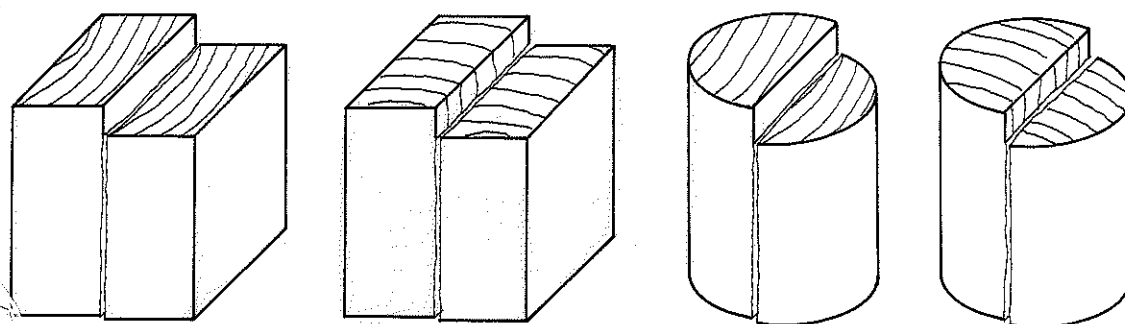


Figura 3.7 - Ruptura de alguns corpos de prova.

3.3.2.1 - Análise dos Resultados

Havendo interesse em verificar a validade da aplicação da equação de Hankinson ao cisalhamento intermediário, fez-se, a partir dos resultados médios para 0° e 90° , o cálculo das tensões de cisalhamento intermediário de ângulo de 15° , 30° , 45° , 60° e 75° , de acordo com a equação 3.3.

$$\tau_{\theta \text{ cal}} = \frac{\tau_{pt} \times \tau_{pr}}{\tau_{pt} \sin^2 \theta + \tau_{pr} \cos^2 \theta} \quad (35) \quad (3.3)$$

A comparação dos valores obtidos experimentalmente e por cálculo segundo a equação 3.3, apresentou diferença estatisticamente nula ao nível de 95% de confiança.

(35) FOREST PRODUCTS LABORATORY - Wood handbook: wood as an engineering material. p. 427

Os resultados da comparação são apresentados nas Tabelas 3.12 para a Peroba Rosa e 3.13 para o Jatobá.

ESPÉCIE : PEROBA ROSA			
TÍTULO: Comparação das Médias			
Barra	Especificação	Resultados Obtidos	Observações/Conclusões.
1	Hipótese inicial	$\tau_{\theta_{exp}} = \tau_{\theta_{cal}}$	Hipótese de validade da fórmula 3.3
	Desvio Padrão	$s = 1,70$	Dados:Tab.3.10
	Valor de t_0	$t_0 = 0,707$	Dados:Tab.3.10
	Nível de Significância	$\alpha < 5\% (36)$	Hã evidência de validade da equação 3.3 para o cisalhamento paralelo intermediário.
2	Hipótese inicial	$\tau_{\theta_{exp}} = \tau_{\theta_{cal}}$	Hipótese de validade da fórmula 3.3
	Desvio Padrão	$s = 0,809$	Dados:Tab.3.10
	Valor de t_0	$t_0 = 0,234$	Dados:Tab.3.10
	Nível de Significância	$\alpha < 5\% (36)$	Hã evidência de validade da equação 3.3 para o cisalhamento paralelo intermediário.

TABELA 3.12 - Comparação entre valores experimentais e valores calculados para o cisalhamento paralelo intermediário - PEROBA ROSA.

(36) BOX, G. E. P. - et alli - op. cit. p. 631.

ESPÉCIE : JATOBÁ			
TÍTULO : Comparação de Médias			
Barra	Especificação	Resultados Obtidos	Observações/Concl <u>u</u> sões
1	Hipótese inicial	$\tau_{\theta \text{ exp}} = \tau_{\theta \text{ cal}}$	Hipótese nula: Vale a fórmula 3.3
	Desvio Padrão	$s = 1.545$	Dados: Tab. 3.11
	Valor de t_0	$t_0 = 1,33$	Dados: Tab. 3.11
	Nível de Significância	$\alpha < 10\% \text{ (37)}$	Hã validade da equação 3.3 para o cisalhamento paralelo interme <u>di</u> ário
2	Hipótese inicial	$\tau_{\theta \text{ exp}} = \tau_{\theta \text{ cal}}$	Hipótese nula: Vale a fórmula 3.3
	Desvio Padrão	$s = 0,671$	Dados: Tab. 3.11
	Valor de t_0	$t_0 = 2,00$	Dados: Tab. 3.11
	Nível de Significância	$\alpha = 5\% \text{ (37)}$	Hã validade da equação 3.3 para o cisalhamento paralelo interme <u>di</u> ário.

TABELA 3.13 - Comparação entre valores experimentais e valores calculados para o cisalhamento paralelo intermediário - JATOBÁ.

(37) BOX, G.E.P. - *et alli* - *op. cit.* p. 631

3.4 - CONCLUSÃO

Com apoio na experimentação e na análise estatística realizada no item 3.3.1.1, pode-se concluir:

- 19) A resistência para as espécies estruturais ensaiadas, ao cisalhamento paralelo nos planos radiais e tangenciais é diferente. O cisalhamento paralelo é sistematicamente menor. A explicação para esta constatação pode ser encontrada a nível da estrutura anatômica da madeira. Os raios medulares atuam como uma espécie de armadura para dificultar o cisalhamento no plano tangencial, figura 3.8 (38).

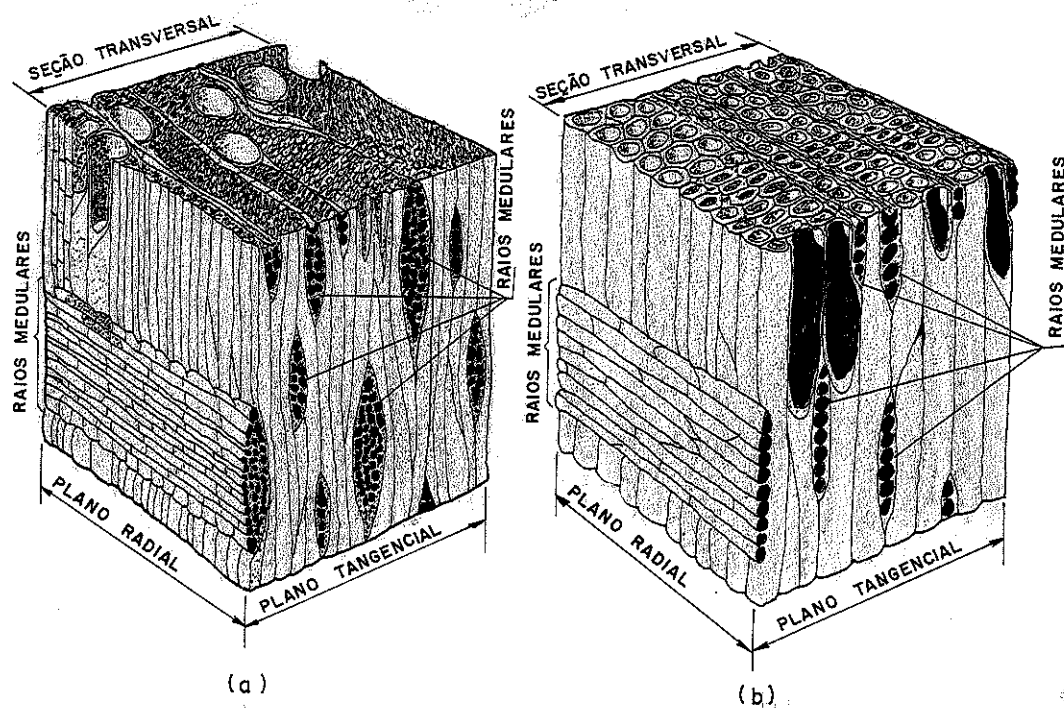


Figura 3.8 - Representação Esquemática de um Bloco de madeira: a) Dicotiledônea e b) Conífera.

(38) PEARSON, R.G. - *et alli* - Timber Engineering design handbook. p.17.

- 29) A indicação do MB-26, da ABNT do ensaio de cisalhamento paralelo tangencial, é discutível pois estes ensaios apresentam resultados mais elevados em relação aos demais.
- 39) A conclusão anterior é um dos itens que permite justificar a adoção da elevada redução proposta na NB-11 (39), para o dimensionamento de peças submetidas ao cisalhamento.

$$\tau_{adm} = 0,10 \bar{\tau}, \text{ na flexão}$$

$$\tau_{adm} = 0,15 \bar{\tau}, \text{ nas ligações}$$

mas estes valores devem ser revistos.

- 49) As resistências da madeira ao cisalhamento normal nos planos radiais e tangenciais podem ser consideradas estatisticamente iguais e por isso o ensaio de cisalhamento normal independe do plano ser radial, intermediário ou tangencial.
- 59) As tensões de ruptura ao cisalhamento paralelo radial e normal podem ser obtidas em função da tensão de ruptura por cisalhamento paralelo tangencial tabelada para as madeiras nacionais, utilizando as equações 3.1 e 3.2, respectivamente.
- 69) Conhecendo-se o valor da tensão de ruptura por cisalhamento nas direções PT e PR, pode-se estimar a tensão de ruptura por cisalhamento nos planos inclinados em relação aos anéis de crescimento (cisalhamento-paralelo-intermediário), através da equação de Hankinson ou, mais precisamente, através da equação 3.3.
- 79) No caso de haver interesse pelo ensaio de cisalhamento com definição do plano cisalhante, o corpo de prova cilíndrico é o mais eficiente.

(39) Associação Brasileira de Normas Técnicas - Cálculo e execução de estruturas de madeira - NB 11 - item 59.

4.1 - INTRODUÇÃO

O objetivo do presente estudo é determinar a influência da compressão normal na resistência da madeira ao cisalhamento.

A Norma Brasileira, NB-11/51 (40), permite considerar uma redução na força cortante nas seções próximas do apoio de uma viga (fig. 4.1), tendo em vista a influência do esforço perpendicular às fibras exercido pela reação de apoio, a qual atua no sentido de impedir o cisalhamento longitudinal da viga.

Vários pesquisadores tem-se preocupado com o problema da compressão perpendicular exercida tanto pelas reações de apoio como também pela ação das placas de carregamento (41), (42).

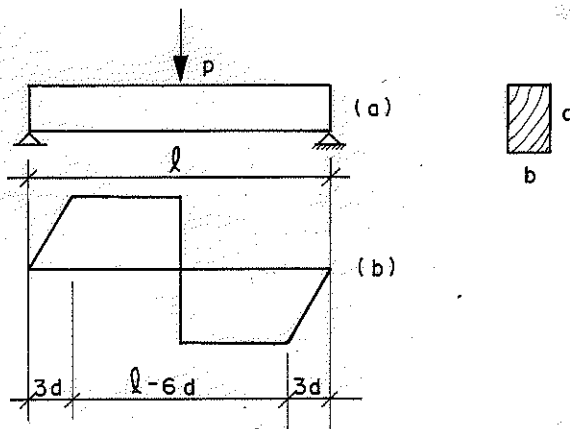


Figura 4.1 - Diagrama de Esforço Cortante Adotado pela NB-11/51, para verificar o cisalhamento em vigas de madeira.

(40) Associação Brasileira de Normas Técnicas - Cálculo e execução de estruturas de madeira - NB-11 - item 24b.

(41) Keenan, F.J. - Shear strength of wood beams. p. 63-70.

(42) Mandery, W.L. - Relationship between perpendicular compressive stress and shear strength of wood. p. 177-182.

4.2 - EXPERIMENTAÇÃO

Com a intenção de realizar o estudo da influência da compressão normal, programou-se a realização de um ensaio de compressão inclinada e um ensaio de cisalhamento sob compressão normal.

4.2.1 - ENSAIO DE COMPRESSÃO INCLINADA

Realizou-se um ensaio preliminar de compressão utilizando corpos de prova prismáticos de 4,0 x 4,0 x 12,0 cm, fig. 4.2, tendo ângulos de inclinação das fibras em relação à direção dos esforços de compressão de 0° , 10° , 20° até 90° .

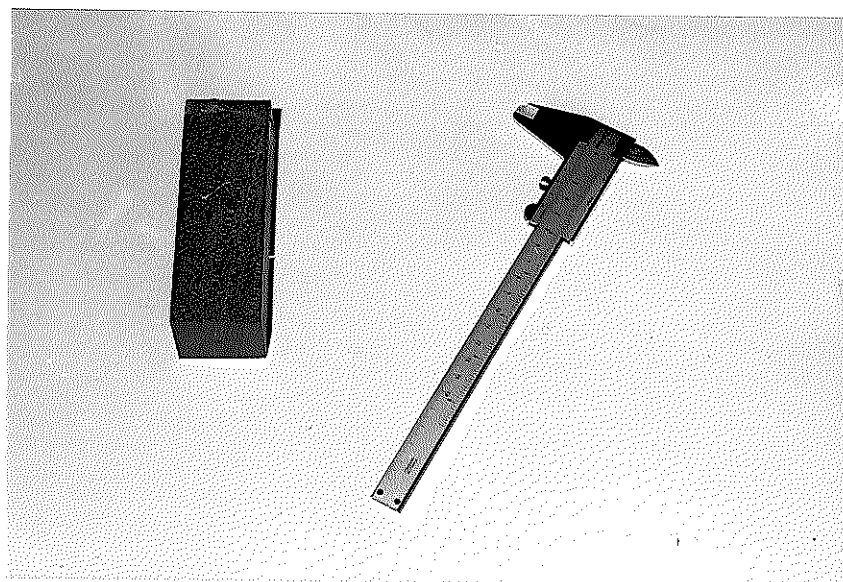


Figura 4.2 - Corpo de prova para o ensaio de compressão inclinada.

Realizando-se os ensaios, verificou-se a ocorrência da ruptura por cisalhamento para a inclinação de 20° . Diante desta constatação, tomou-se uma nova série de corpos de prova com as mesmas dimensões, mas com ângulos de inclinação das fibras de 14° , 17° , 20° , 23° , 26° e 29° . Duas séries de corpos de prova foram retiradas de duas barras de Peroba Rosa, de maneira a obter uma série de corpos

de prova para cisalhamento tangencial e outra para cisalhamento radial, fig. 4.3

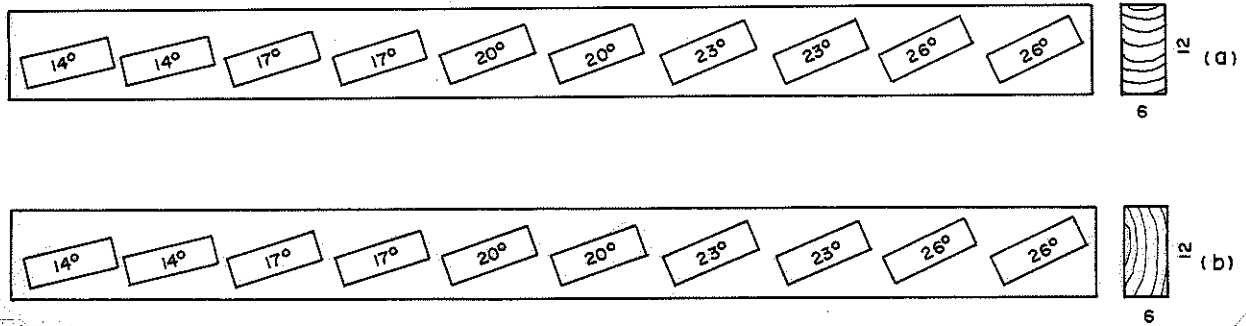


Figura 4.3 - Barras de madeira para obter:
a) cisalhamento tangencial
b) cisalhamento radial

Foram extraídos dois corpos de prova por barra para cada inclinação. Os corpos de prova foram ensaiados nas condições de madeira seca ao ar, carregados à velocidade de 10 MPa por minuto.

Fêz-se também o ensaio de uma barra de Cabriúva Vermelha e uma de Pinho do Paraná. (Araucária angustifolia).

TENSÕES NORMAIS E DE CISALHAMENTO

No caso da compressão inclinada, a tensão de compressão induz no plano das fibras, tensões normais e de cisalhamento, fig. 4.4. As tensões paralelas e normais são:

$$\tau_{\theta} = \frac{\tau_{\theta}}{2} \text{ sen } 2\theta \quad (4.1)$$

$$\sigma_{n\theta} = \tau_{\theta} \text{ sen}^2 \theta \quad (4.2)$$

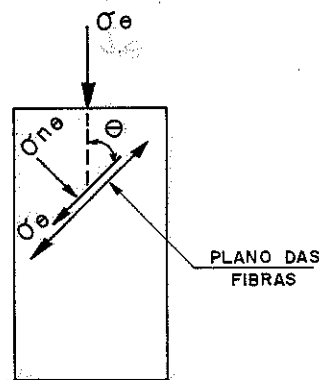


Figura 4.4 - Esquema das tensões no plano das fibras no corpo de prova de compressão inclinada.

APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados dos ensaios de compressão inclinada são apresentados nas tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 para a Cabriúva Vermelha, Peroba Rosa e Pinho do Paraná, respectivamente.

θ	σ_{θ} (MPa)	τ_{θ} (MPa)	$\sigma_{n\theta}$ (MPa)	Tipo de Ruptura
10 ^o	-	-	-	Típica de compressão paralela.
14 ^o	-	-	-	
17 ^o	53,57	14,98	4,52	Cisalhamento
20 ^o	52,70	16,94	6,16	Cisalhamento
23 ^o	48,75	17,53	7,44	Cisalhamento
26 ^o	44,32	17,46	8,52	Cisalhamento
30 ^o	39,55	17,12	9,89	Cisalhamento
34 ^o	41,01	19,01	12,83	Cisalhamento

Tabela 4.1 - Resultados do ensaio de compressão inclinada Cabriúva Vermelha - Cisalhamento Tangencial

PLANO CISA - LHANTE	θ	σ_{θ} (MPa)	τ_{θ} (MPa)	$\sigma_{n\theta}$ (MPa)	TIPO DE RUPTURA	
RADIAL	14º	51,29	---	----	Típica de Compr:	
	14º	51,50	---	----	Paralela	
	17º	48,30	13,50	4,13	Cisalhamento	
	17º	45,26	12,65	3,87	Cisalhamento	
	20º	43,09	13,85	5,04	Cisalhamento	
	20º	41,96	13,48	4,91	Cisalhamento	
	23º	39,69	14,27	6,06	Cisalhamento	
	23º	37,03	13,32	5,65	Cisalhamento	
	26º	37,37	14,72	7,18	Cisalhamento	
	26º	36,75	14,48	7,06	Cisalhamento	
	30º	32,96	14,27	8,24	Cisalhamento	
	30º	35,70	15,46	8,92	Cisalhamento	
	TANGENCIAL	14º	50,26	11,79	2,94	Cisalhamento
		17º	46,41	12,97	3,97	Cisalhamento
20º		44,22	14,21	5,17	Cisalhamento	
20º		36,72	11,80	4,29	Cisalhamento	
23º		40,35	14,51	6,16	Cisalhamento	
23º		35,81	12,88	5,47	Cisalhamento	
26º		38,63	15,22	7,42	Cisalhamento	
26º		33,77	13,31	6,49	Cisalhamento	
30º	36,41	15,76	9,10	Cisalhamento		

Tabela 4.2 - Resultados de Compressão Inclinada para a Peroba Rosa

θ	σ_{θ} (MPa)	τ_{θ} (MPa)	$\sigma_{n\theta}$ (MPa)	TIPO DE RUPTURA
14º	28,00	-----	-----	Ruptura Típica da Compressão Paralela
	34,98	-----	-----	
17º	24,03	6,72	2,05	Cisalhamento
	34,98	8,21	2,05	
20º	25,66	8,25	3,00	Cisalhamento
	30,32	9,74	3,55	
23º	24,87	8,94	3,80	Cisalhamento
	26,94	9,69	4,11	
26º	21,75	8,57	4,18	Cisalhamento
	22,30	8,78	4,28	
30º	19,92	8,62	4,98	Cisalhamento
	20,34	8,81	5,08	

Tabela 4.3 - Resultados do ensaio de compressão inclinada Pinho do Paraná - Cisalhamento Radial

ANÁLISE DE RESULTADOS

Analisou-se primeiramente o tipo de ruptura procurando possível influência do ângulo de inclinação das fibras e verificou se o seguinte:

a)- Para $\theta < 15^\circ$, a ruptura é típica da compressão paralela às fibras.

b)- Para $15^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$, a ruptura ocorre por cisalhamento, figura 4.5.

c)- Para $\theta > 30^\circ$, a ruptura é típica da compressão normal às fibras, podendo ocorrer também torção do corpo de prova.

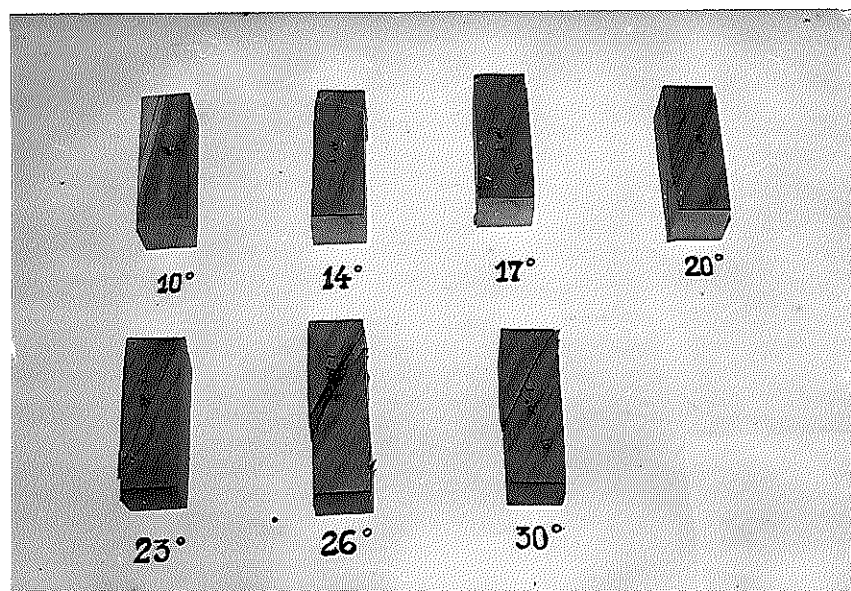


Figura 4.5 - Ruptura dos Corpos de Prova de Compressão Inclinada

Em seguida, realizou-se uma análise de regressão linear, utilizando a subrotina MINITAB implantada no computador IBM-370 da Escola de Engenharia de São Carlos, com base nos dados apresentados nas tabelas 4.1, 4.2 e 4.3, obtendo-se os resultados resumidos nas tabelas 4.4, 4.5 e 4.6.

TÍTULO: Relação entre tensão de cisalhamento e tensão normal		
Ensaio: Compressão inclinada		Espécie: Cabriúva Vermelha
Especificação	Resultados da Análise de Regressão	Observações/Conclusões
Modelo	$y = \beta_0 + \beta_1 x$	- x -
Equação	$\tau_\theta = 13,9 + 0,394 \tau_{n\theta}$ (43)	Equação obtida pelo ajuste e pelo método dos mínimos quadrados.
Coefficiente de correlação linear	$R^2 = 0,78$	Possui alto grau de correlação linear.
Teste F	Valor fornecido pela análise de Regressão $F(1,4) = \frac{6,5647}{0,4715} = 13,92$ Nível de Significância (43) $\alpha = 2\%$	A regressão possui alto nível de significância
Teste t	Valor fornecido para o coeficiente da variável $t(04) = 3,73$ Nível de significância $\alpha = 1,0\%$	Pode-se concluir pela alta significância da variável x no modelo.
Teste de Durbin-Watson-Statistic	1,78	(próximo de 2), por isso pode-se fazer a análise de resíduos.
Análise dos Resíduos	Fig.4.6-Resíduos x valores ajustados.	Não revela tendência. O modelo é satisfatório
	Fig.4.7 - Resíduos x variável x	Não revela anomalia. O modelo é satisfatório
	Fig.4.8 - Gráfico Probabilístico	Pode-se considerar distribuição normal dos resíduos.

Tabela 4.4 - Resumo da análise de regressão linear

(43) BOX, G.E.P. - et alli - *Op. cit.*, p. 636.

(44) BOX, G.E.P. - et alli - *Op. cit.*, p. 631.

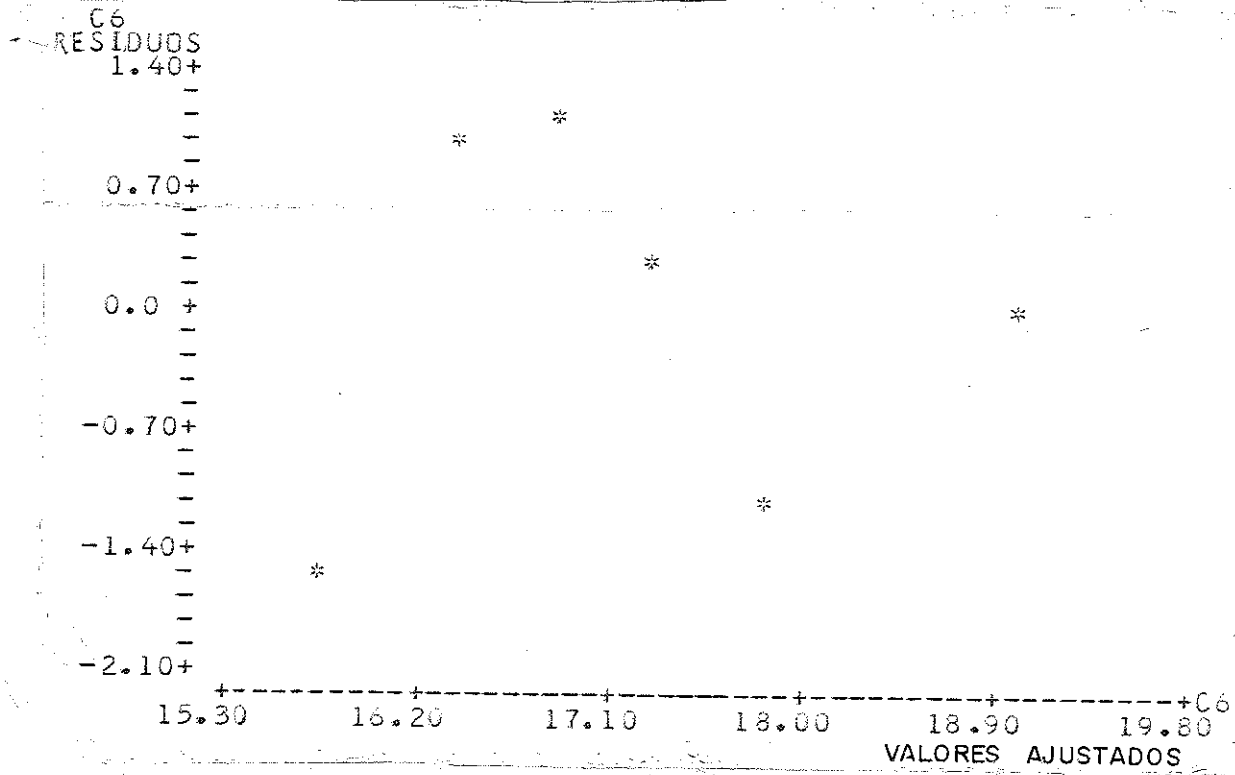


Figura 4.6 - Resíduos x Valores Ajustados

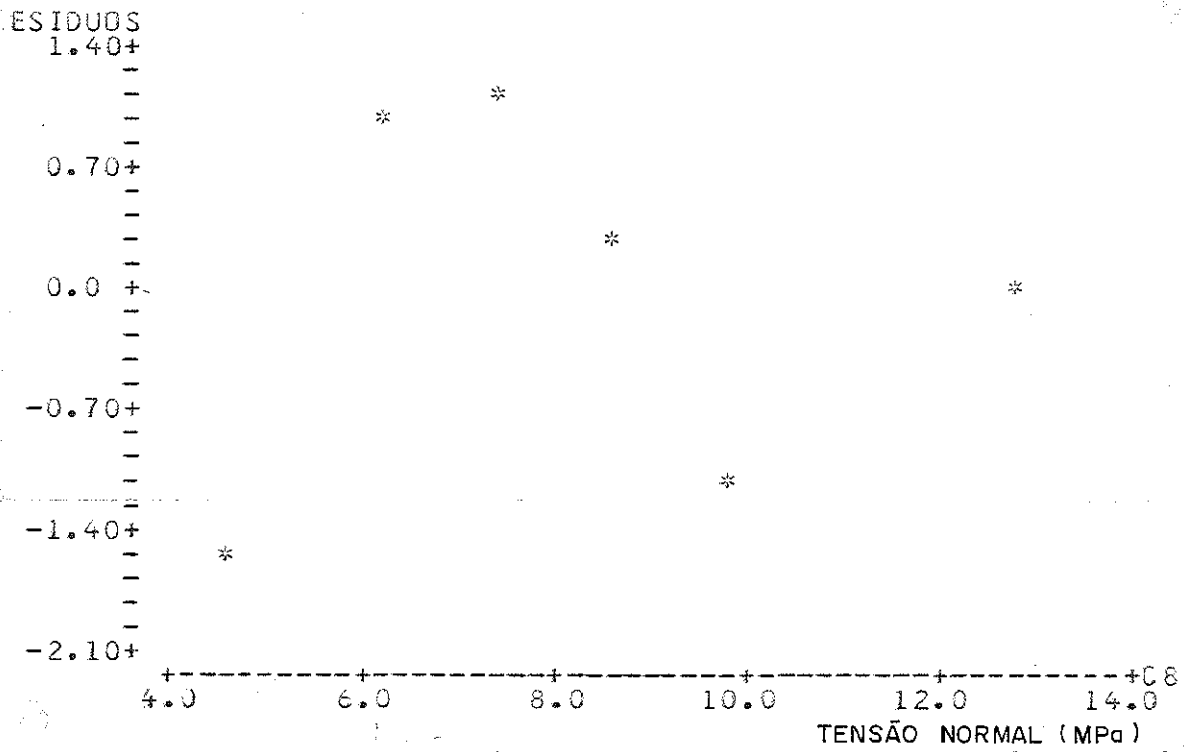


Figura 4.7 - Resíduos x Variável σ

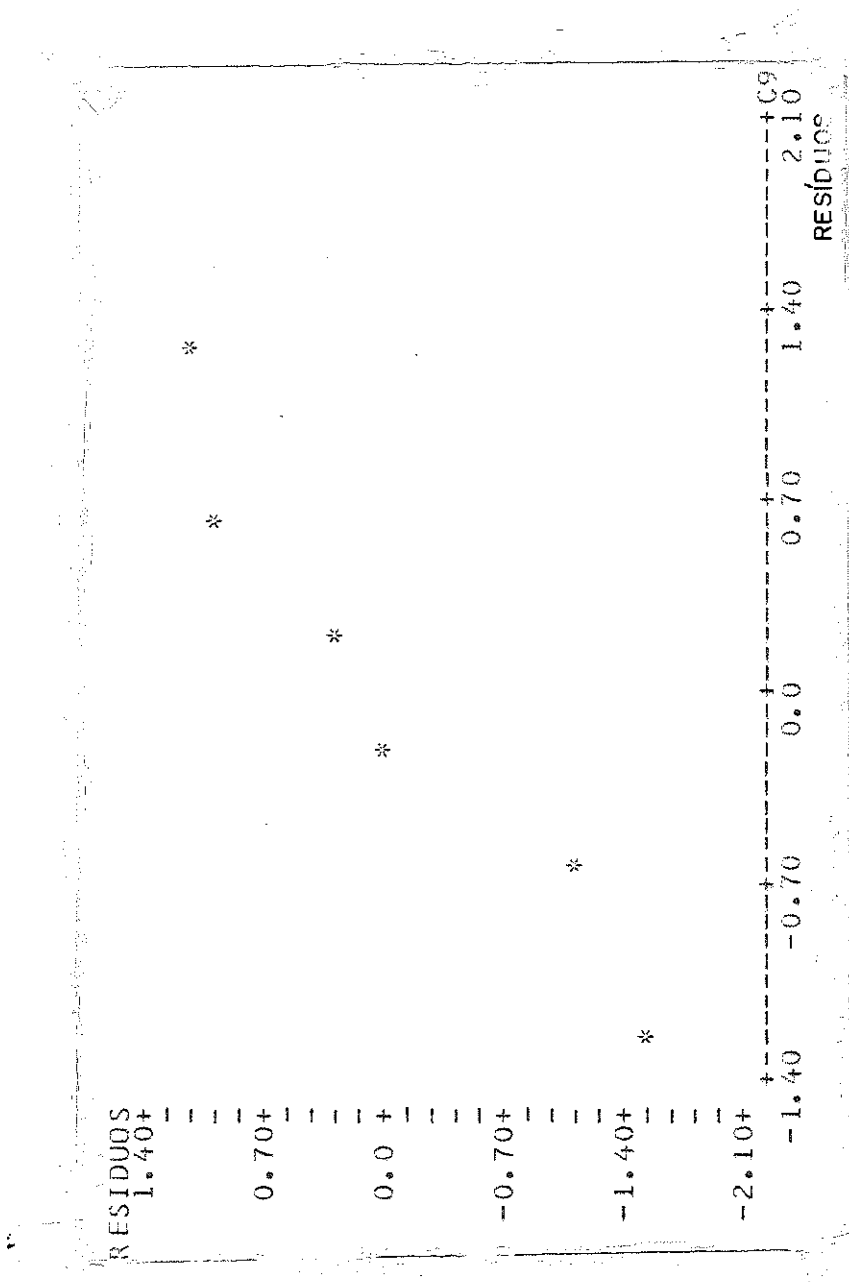


Figura 4.8 - Gráfico Probabilístico

TÍTULO:		Relação entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal	
ENSAIO:		Compressão oblíqua	ESPÉCIE: Peroba Rosa
PLANO DE CISALHAM.	ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS DA ANÁLISE	OBSERVAÇÕES/CONCLUSÃO
CISALHAMENTO PARALELO - RADIAL	Modelo	$y = \beta_0 + \beta_1 x$	-----
	Equação	$\tau_{\theta} = 11,4 + 0,42 \sigma_{n\theta} \dots (4.1)$	Obtida nos mínimos quadrados
	Teste de Correção Linear	$R^2 = 0,79$	Possui alto grau de correlação
	Teste F	$F(1,8) = 30,73$	A regressão possui alto nível de significância
		$\alpha < 0,1\% (45)$	
	Teste t	$t(8) = 5,47$	Pode-se concluir pela alta significância da variável x no modelo..
		$\alpha < 0,05\% (46)$	
Análise de Resíduos	fig.4.9 Resíduos x V.Ajustado	Os gráficos de resíduos não revelam problemas c/o modelo adotado	
	fig.4.10 Resid. x Variável x		
	fig.4.11 Gráfico Probabilíst.	Pode-se considerar distribuição normal dos resíd.	
CISALHAMENTO PARALELO - TANGENCIAL	Modelo	$y = \beta_0 + \beta_1 x$	-----
	Equação	$\tau_{\theta} = 9,84 + 0,664 \sigma_{n\theta} \dots (4.2)$	Obtida pelo método dos mínimos quadrados
	Teste de Correção Linear	$R^2 = 0,78$	Possui alto grau de correlação
	Teste F	$F(1,7) = 24,80$	Evidenciando-se um alto grau de significância da regressão
	Teste t	$t(07) = 4,98$	Existe evidência da alta significância da variável x no modelo
		$\alpha = 0,1\% (46)$	
	Análise de Resíduos	fig.4.12 Resíduos x V.Ajust.	Os resíduos não revelam problemas
Fig.4.13 Resid. x Variável x			
Fig.4.14 Gráfico Probabilíst.		Pode-se considerar que os resíduos possuem distribuição normal	

Tabela 4.5 - Resumo da Análise de Regressão

(45) Box, G.E., P. et alli. *op. cit.* - p.636

(46) Box, G.E., P. et alli. *op. cit.* - p.631

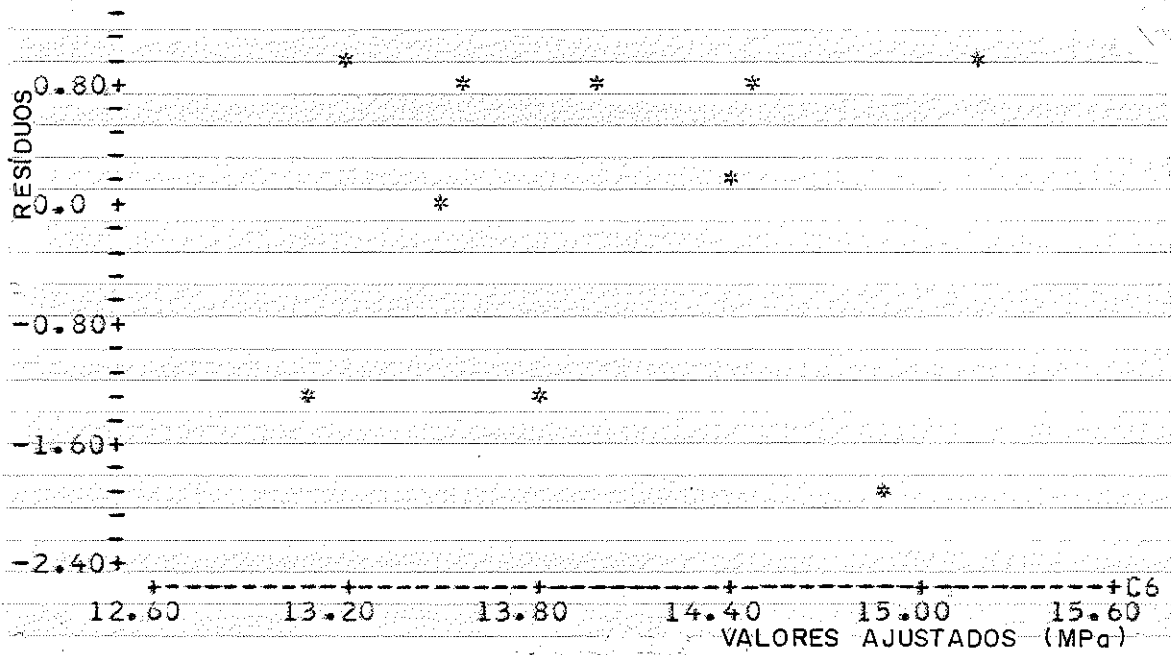


Figura 4.9 - Resíduos x Valores Ajustados - Peroba Rosa - Cisalhamento Paralelo Radial

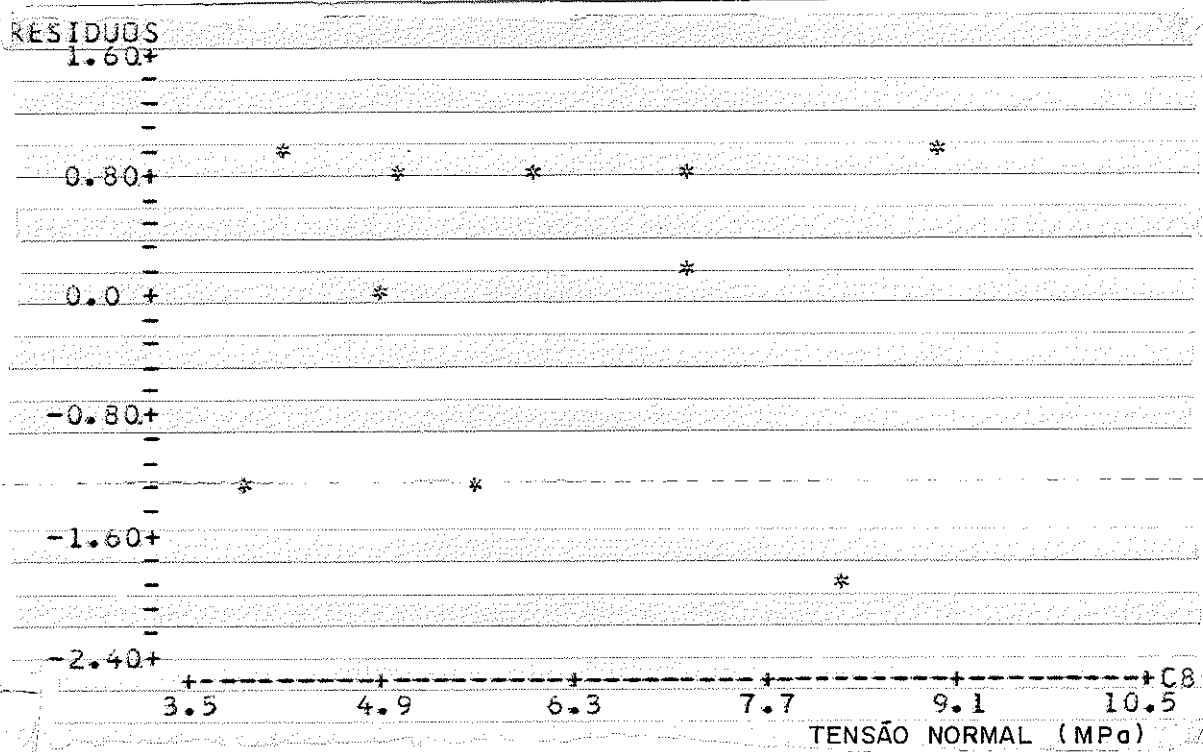


Figura 4.10 - Resíduos x Variável x - Peroba Rosa - Cisalhamento Paralelo Radial

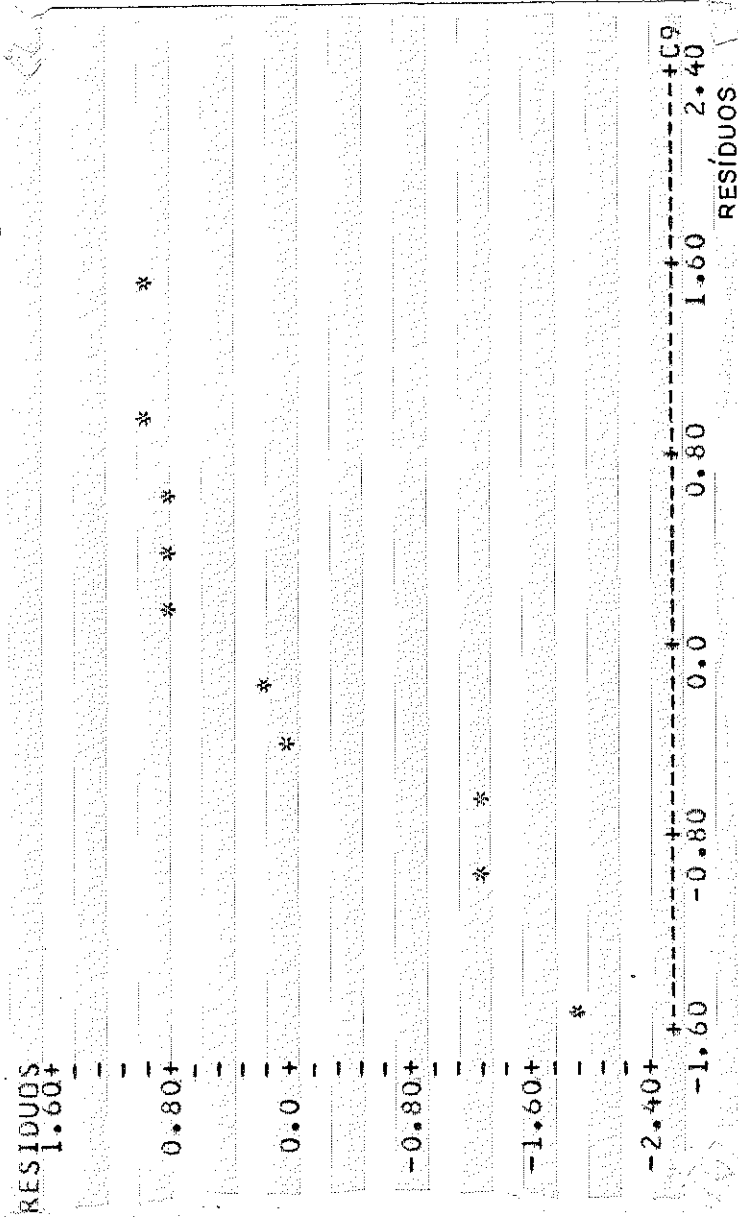


Figura 4.11 - Gráfico Probabilístico - Peroba Rosa - Cisalhamento Radial

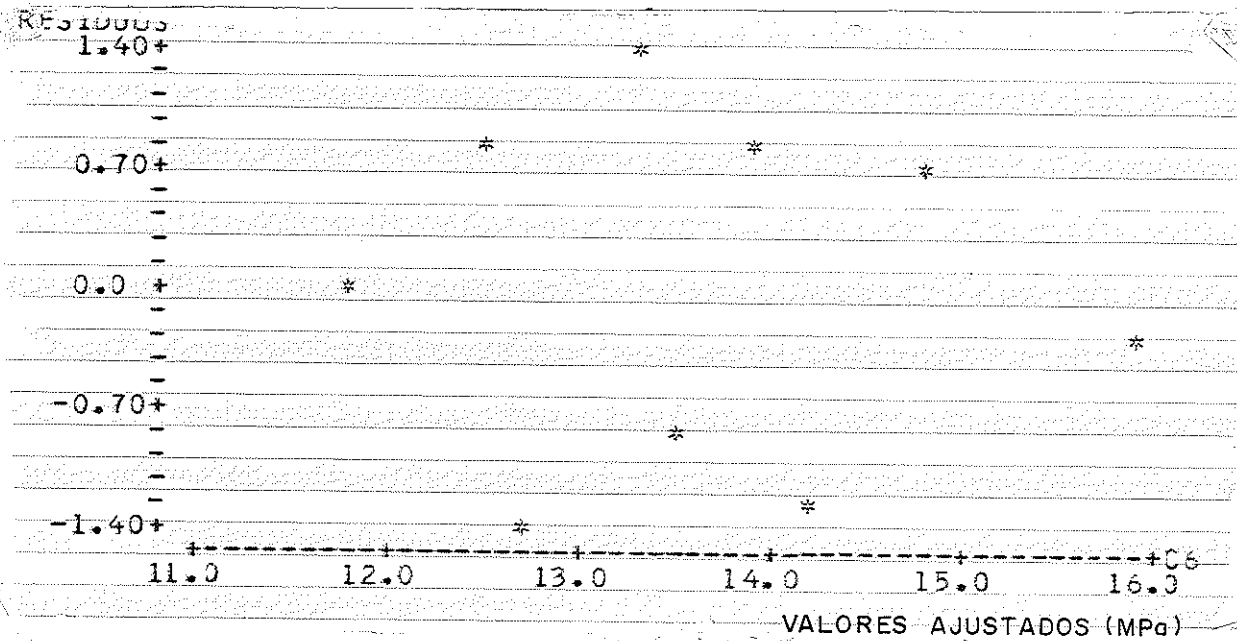


Figura 4.12 - Resíduos x Valores Ajustados - Peroba Rosa - Cisalhamento Paralelo Tangencial

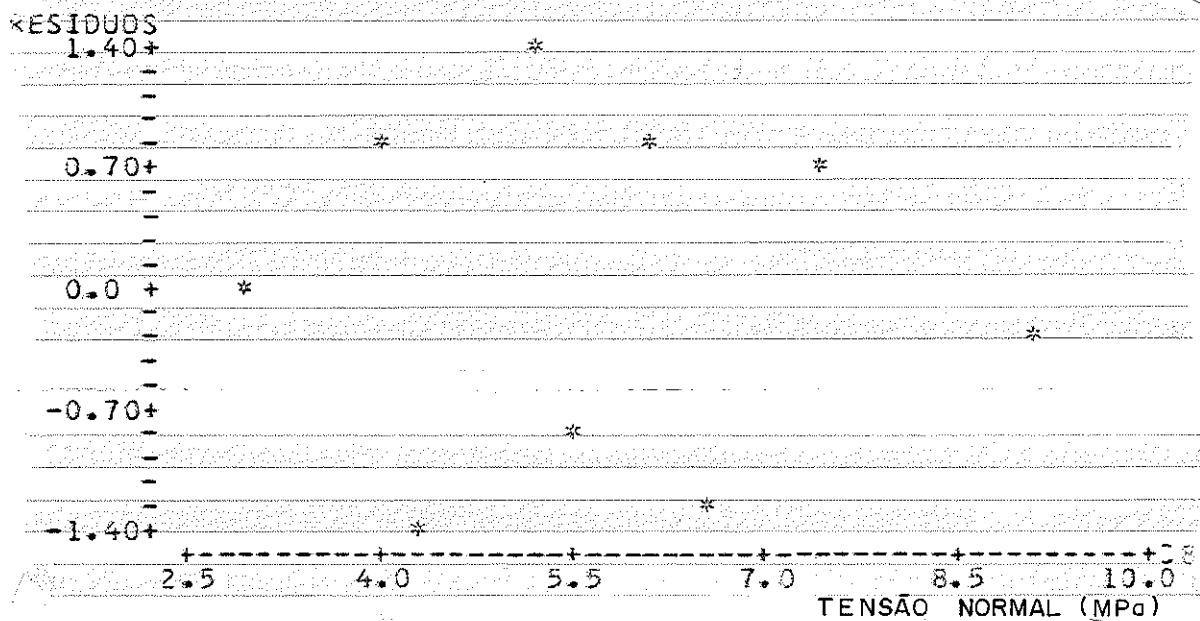


Figura 4.13 - Resíduos x Variável σ - Peroba Rosa - Cisalhamento Paralelo Tangencial

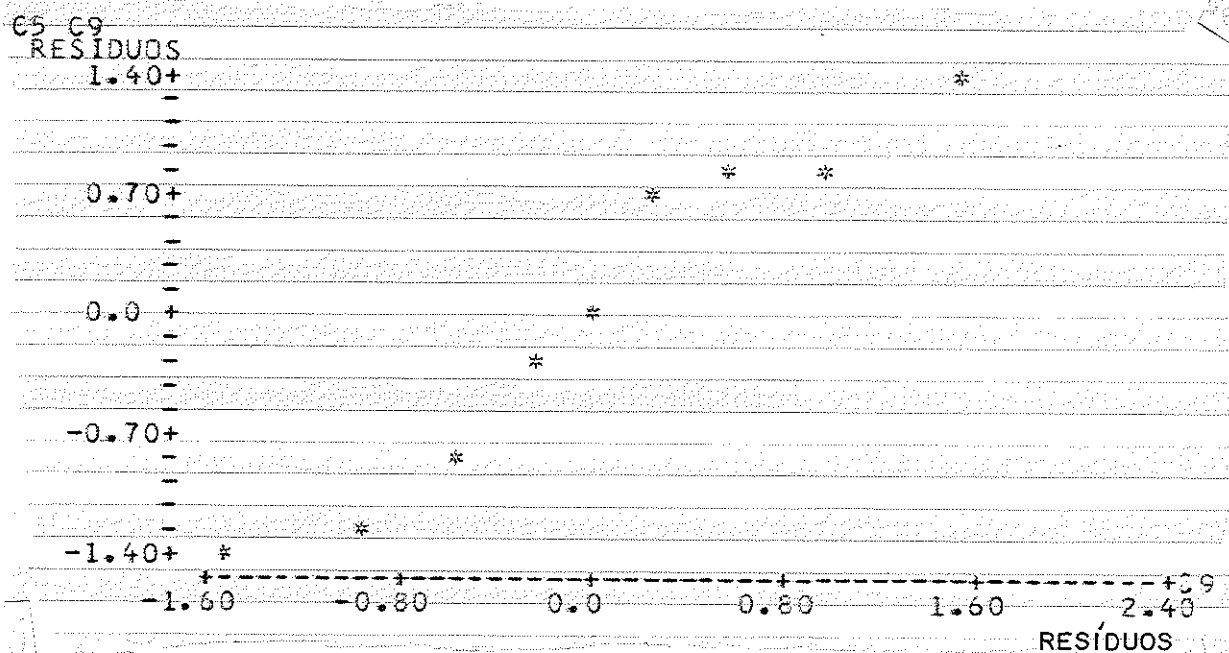


Figura 4.14 - Gráfico Probabilístico - Peroba Rosa - Cisalhamento Paralelo Tangencial

TÍTULO: Relação entre a Tensão de Cisalhamento e a Tensão Normal		
Ensaio: Compressão Inclinada		ESPÉCIE: Pinho do Paraná
Especificação	$y = \beta_0 + \beta_1 x$	-----
Equação	$\tau_{\theta} = 5,98 + 0,84 \sigma_{n\theta}$	obtida pela análise de regressão
Teste de Correlação Linear	$R^2 = 0,83$	pode-se concluir como altamente significativa
Nota: Para o caso do Pinho do Paraná não se realizaram os demais testes.		

Tabela 4.6 - Resumo da Análise de Regressão

CONCLUSÃO

A realização do ensaio de compressão inclinada para a avaliação da influência da compressão normal no cisalhamento paralelo da madeira mostrou-se estatisticamente válida, ver equações 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4.

O cisalhamento paralelo tangencial apresenta-se mais sensível à influência da compressão normal do que o cisalhamento paralelo radial, comparar equações 4.1, e 4.2. Este fenômeno deve estar relacionado com a participação dos raios medulares na resistência ao cisalhamento.

4.2.2 - CISALHAMENTO PARALELO SUBMETIDO À COMPRESSÃO NORMAL

Para se obter o cisalhamento paralelo submetido à compressão normal foi prevista a realização do ensaio de cisalhamento com a aplicação de compressão normal. Para isto, fez-se a montagem do esquema representado na figura 4.15, o qual consiste de um conjunto de chapas, parafusos e um anel de carga com capacidade de 5,0 toneladas.

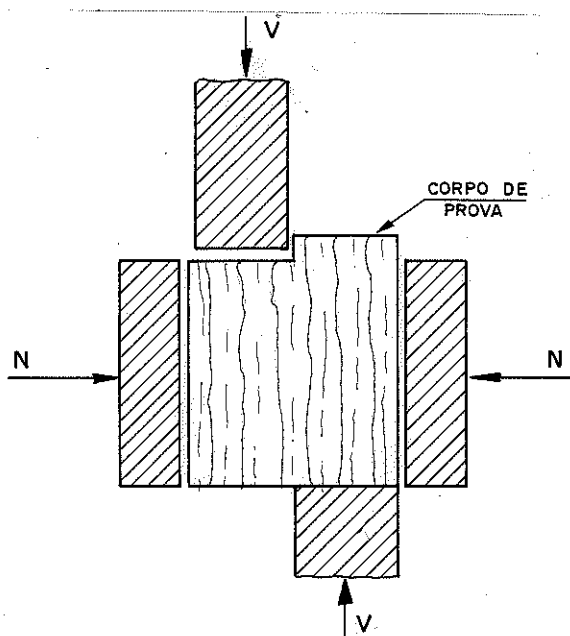


Figura 4.15 - Cisalhamento Paralelo e sob Compressão Normal

O dispositivo de compressão normal do corpo de prova é apresentado na figura 4.16.

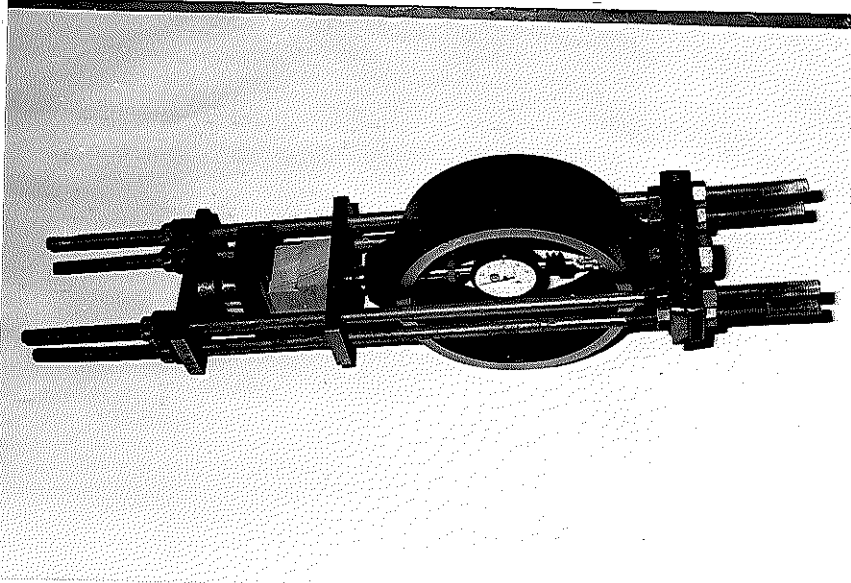


Figura 4.16 - Dispositivo de Compressão Normal no Corpo de Prova de Cisalhamento

A realização do ensaio é apresentada na foto, fig. 4.17.

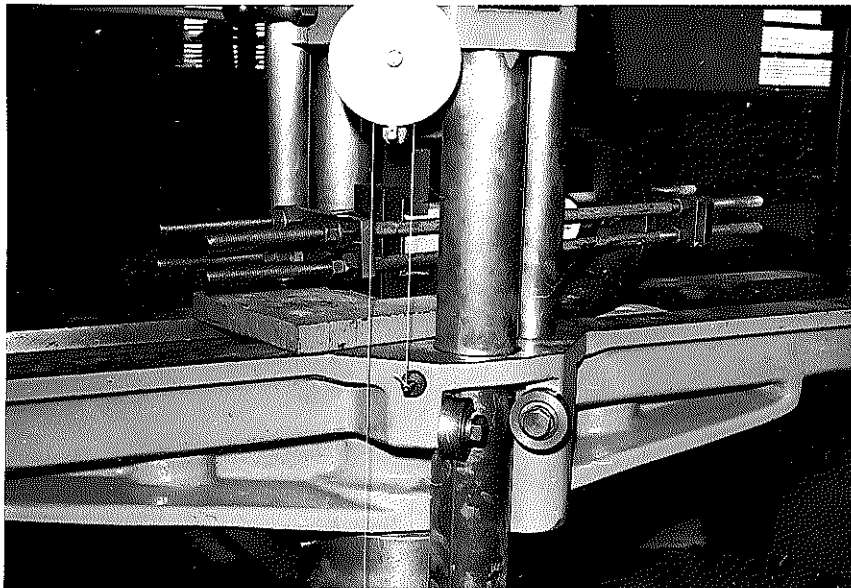


Figura 4.17 - Dispositivo do Ensaio de Cisalhamento Paralelo e sob Compressão Normal

Para o ensaio de corpos de prova submetidos ao cisalhamento sob compressão normal, foram extraídos corpos de prova para cisalhamento (MB-26) de barras de madeira de Peroba Rosa e de Cabriúva Vermelha. De cada barra, considerada homogênea, foram tirados os corpos de prova preparados para o cisalhamento, ensaiados sob tensões de compressão normal através do dispositivo da figura 4.16, para serem rompidos por cisalhamento, como indica a figura 4.17.

Os corpos de prova foram ensaiados na condição de madeira seca ao ar, com uma velocidade de carregamento de 2,5 MPa por minuto.

As tensões de compressão normal exercidas nos corpos de prova variaram de 1,0 MPa até 14,0 MPa, chegando a atingir de duas até três vezes a tensão admissível à compressão normal da madeira ensaiada.

APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos nos ensaios estão indicados nas tabelas 4.7 e 4.8; para a Peroba Rosa e para a Cabriúva Vermelha, com a apresentação das tensões de ruptura por cisalhamento e suas correspondentes às tensões de compressão normal.

CORPO DE PROVA	TENSÃO DE RUPTURA POR CISA- LHAMENTO - (MPa)	TENSÃO NORMAL (MPa)
1	17,94	1,17
2	15,12	1,18
3	18,91	1,73
4	18,57	1,67
5	19,36	2,58
6	17,37	2,31
7	18,50	3,07
8	18,53	3,17
9	18,65	3,47
10	19,68	3,30

cont.

CORPO DE PROVA Nº	TENSÃO DE RUPTURA POR CISA- LHAMENTO - MPa	TENSÃO NORMAL (MPa)
11	18,84	4,06
12	18,18	4,20
13	20,06	4,32
14	20,20	4,63
15	19,34	5,71
16	18,28	5,59
17	19,21	5,61
18	20,50	5,76
19	22,04	7,14
20	19,09	6,46
21	20,11	7,38
22	19,26	7,52
23	21,08	8,28
24	20,72	7,78
25	21,75	9,70
26	19,38	10,20
27	22,30	9,68
28	21,51	9,89
29	22,63	11,20
30	23,95	13,59
31	21,32	10,67
32	23,33	13,70

Tabela 4.7 - Resultados do Ensaio de Cisa-
lhamento sob tensão normal para a Proba
Rosa

CORPO DE PROVA Nº	TENSÃO DE RUPTURA POR CISALHAMENTO - MPa	TENSÃO NORMAL (MPa)
1	21,87	1,58
2	21,64	1,44
3	23,42	2,20
4	22,79	2,14
5	22,45	2,82
6	21,05	2,90
7	25,26	3,63
8	25,11	3,58
9	23,91	4,27
10	23,90	4,22
11	24,49	5,01
12	22,47	5,00
13	23,40	5,70
14	24,00	5,71
15	23,95	6,46
16	22,78	6,24
17	23,31	6,55
18	24,01	7,00
19	25,64	8,50
20	22,86	8,85
21	23,82	10,62
22	23,63	10,40
23	26,74	12,28
24	23,63	12,51
25	25,76	14,17
26	25,15	14,10

Tabela 4.8 - Resultados do Ensaio de Cisalhamento sob Compressão Normal para a Cabriúva

ANÁLISE DE RESULTADOS

Realizou-se uma análise de regressão linear, utilizando a subrotina MINITAB implantada no computador IBM-370 da Escola de Engenharia de São Carlos e os resultados são apresentados nas tabelas 4.7 e 4.8.

Os resultados da análise de regressão para a Peroba Rosa e para a Cabriúva Vermelha estão resumidos nas tabelas 4.9 e 4.10.

TÍTULO: Relação entre tensão de ruptura por cisalhamento e tensão normal		
ESPÉCIE: Peroba Rosa ENSAIO: Cisalhamento sob Compressão Normal		
ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS DA ANÁLISE	OBSERVAÇÕES/CONCLUSÕES
Modelo	$y = \beta_0 + \beta_1 x + u_i$	Tendo por base o gráfico da figura 4.18
Equação	$\tau = 17,1 + 0,446 \sigma_n \dots \dots (4.4)$	Ajustada pelo método dos mínimos quadrados
Teste de Correlação Linear	$R^2 = 0,73$	Pode-se concluir pelo alto nível de significância.
Teste F	$F(1,30) = 80,20$	Há evidência de alta significância da regressão
	$\alpha < 0,1\% (47)$	
Teste t	$t(30) = 8,95$	Há evidência de alta significância da variável x no modelo
	$\alpha < 0,05\% (48)$	
Teste de Durbin-Watson	2,33 (49)	Nível satisfatório para a análise de resíduos
Análise de Regressão	fig.4.19 Resíduos x Valores Ajustados	A análise de resíduos não revela problemas com o modelo adotado.
	fig.4.20 Resíduos x Variável x	
	fig. 4.21 Gráfico Probabilíst.	Revela distribuição normal dos Resíduos

Tabela 4.9 - Resumo da Análise de Regressão

(47) Box G.E.P. et Alli - op. cit p.636

(48) Box G.E.P. et alli - op cit. p.631

(49) HOFFMANN, R & VIEIRA, S. - Análise de regressão: uma introdução a econometria, p.225.

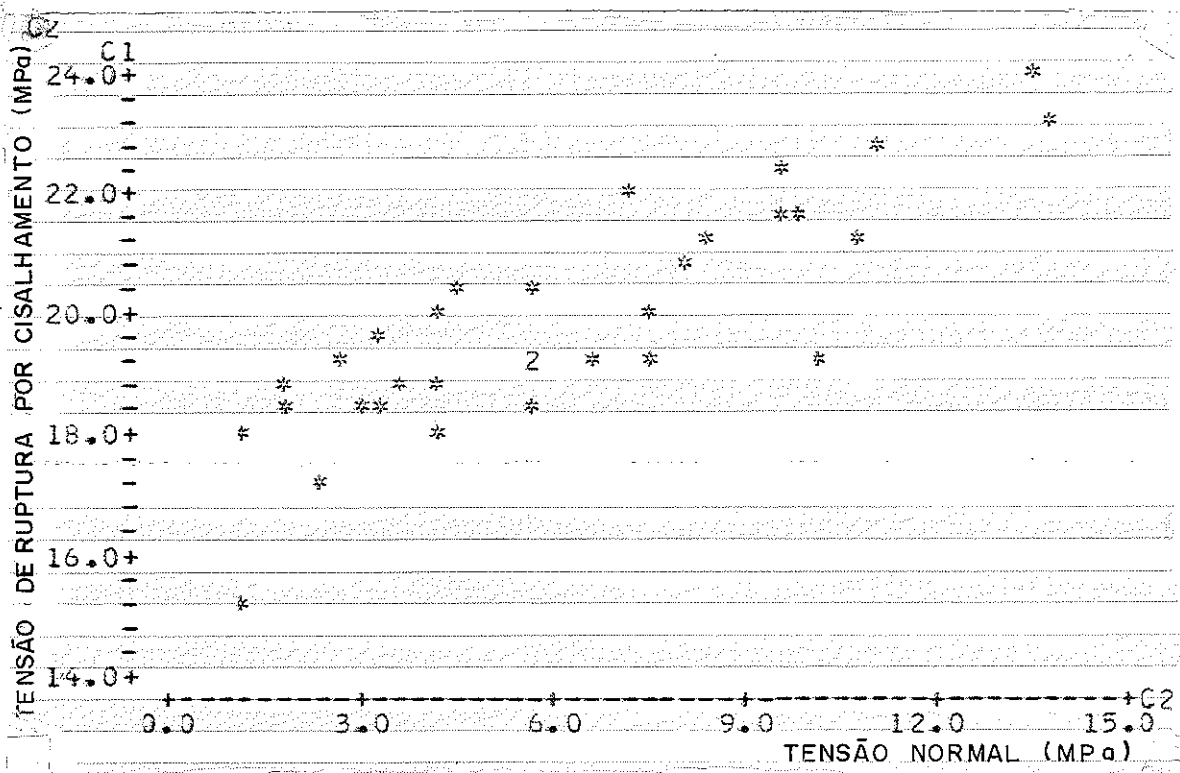


Figura 4.18 - Tensão de Cisalhamento x Tensão Normal - Peroba Rosa

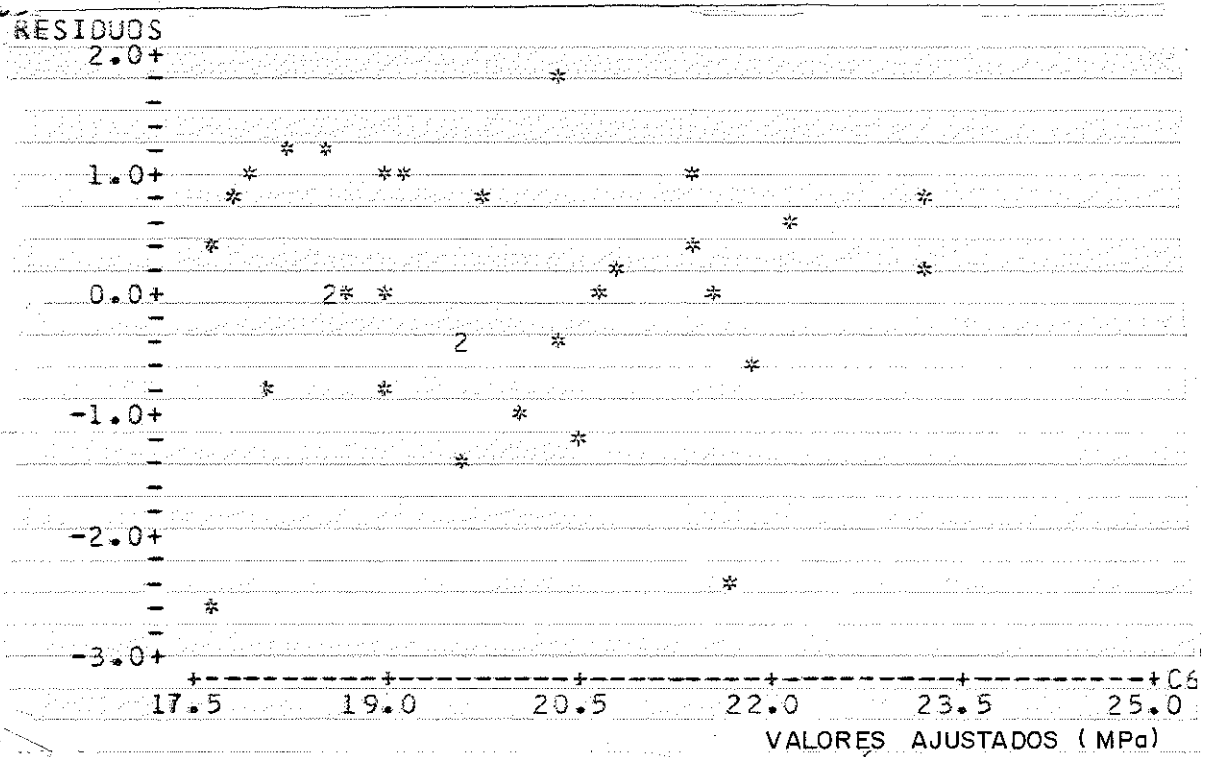


Figura 4.19 - Resíduos x Valores Ajustados - Peroba Rosa

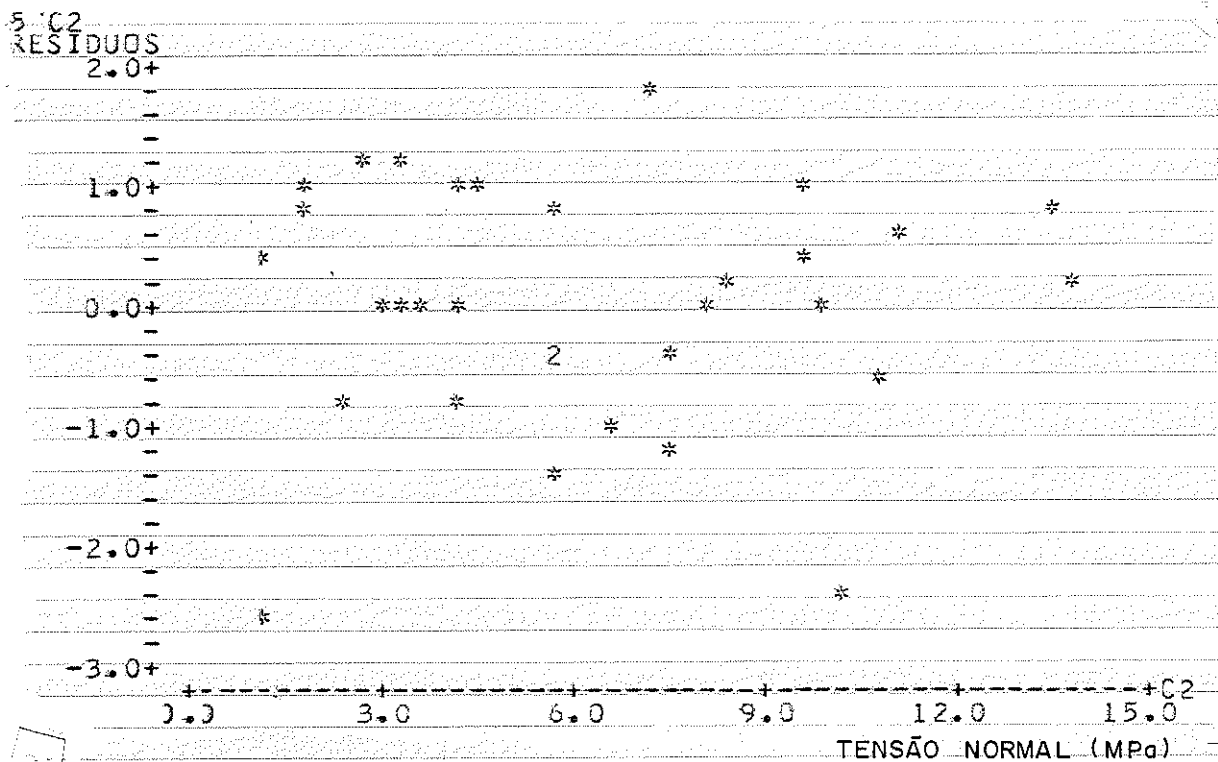


Figura 4.20 - Resíduos x Variável x - Peroba Rosa

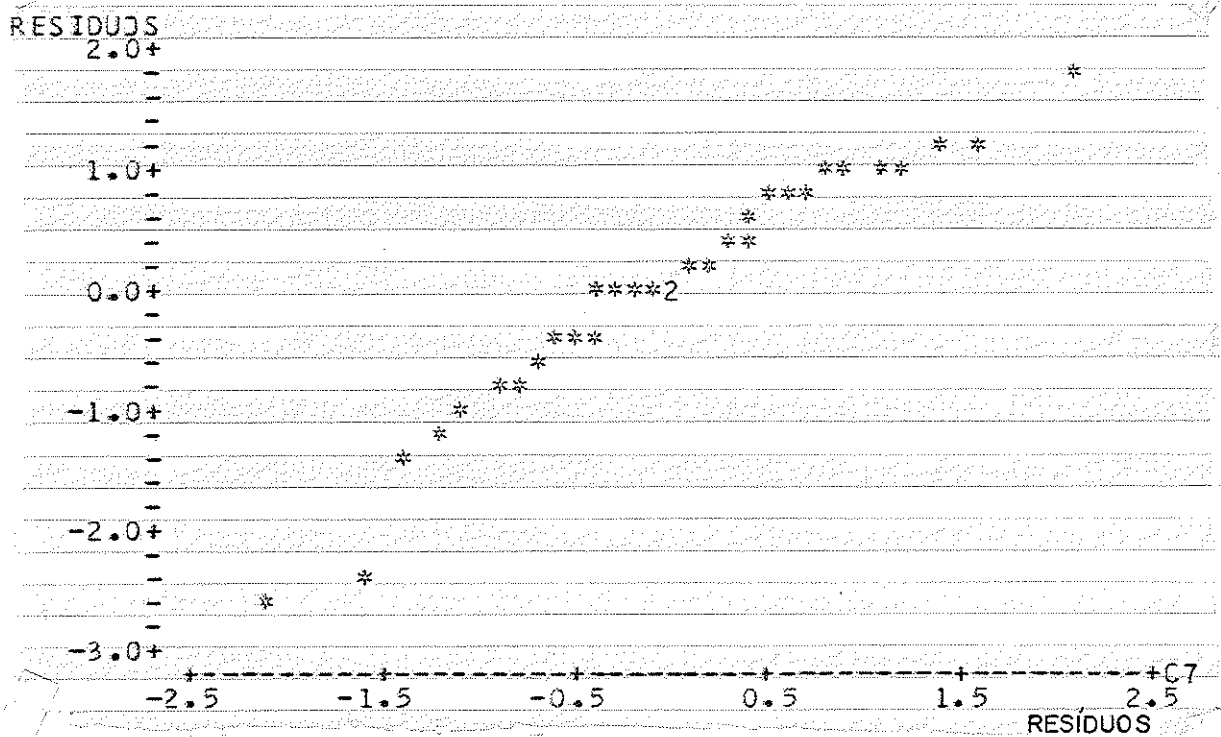


Figura 4.21 - Gráfico Probabilístico - Peroba Rosa

TÍTULO: Relação entre tensão de ruptura por cisalhamento e tensão Normal		
ESPÉCIE: Cabriúva Vermelha		ENSAIO: Cisalhamento sob Compressão Normal
ESPECIFICAÇÃO	RESULTADO DA ANÁLISE	OBSERVAÇÕES/CONCLUSÕES
Modelo	$y = \beta_0 + \beta_1 x + u_i$	Tendo por base o gráfico da figura 4.22
Equação	$\tau = 22,4 + 0,21 \sigma_n \dots\dots\dots (4.5)$	Obtida pelo método dos mínimos quadrados.
Teste de Correlação linear	$R^2 = 0,35$	Evidencia dispersão e insuficiência de dados.
Teste F	$F(1,24) = 12,63$	A regressão é significativa
	$\alpha = 0,5\% \quad (50)$	
Teste t	$t(24) = 3,55$	Há evidência de alta significância da variável x no modelo.
	$\alpha = 0,10\% \quad (51)$	
Teste de Durbin-Watson	2,10 (52)	Nível satisfatório para a Análise de resíduos.
Análise de Resíduos	fig.4.23 Resíduos x V.Ajustados	Não revelam problemas com o modelo adotado.
	fig.4.24 Resíduos x Variável x	
	fig.4.25 Gráfico Probabilístico	Revela distribuição normal dos resíduos.

Tabela 4.10 - Resumo da Análise de Regressão

(50) Box, G.E.P., et alli, *op. cit.*, p.636

(51) Box, G.E.P., et alli, *op. cit.*, p.631

(52) HOFFMANN, R. & VIEIRA, S. - *op. cit.* p.225

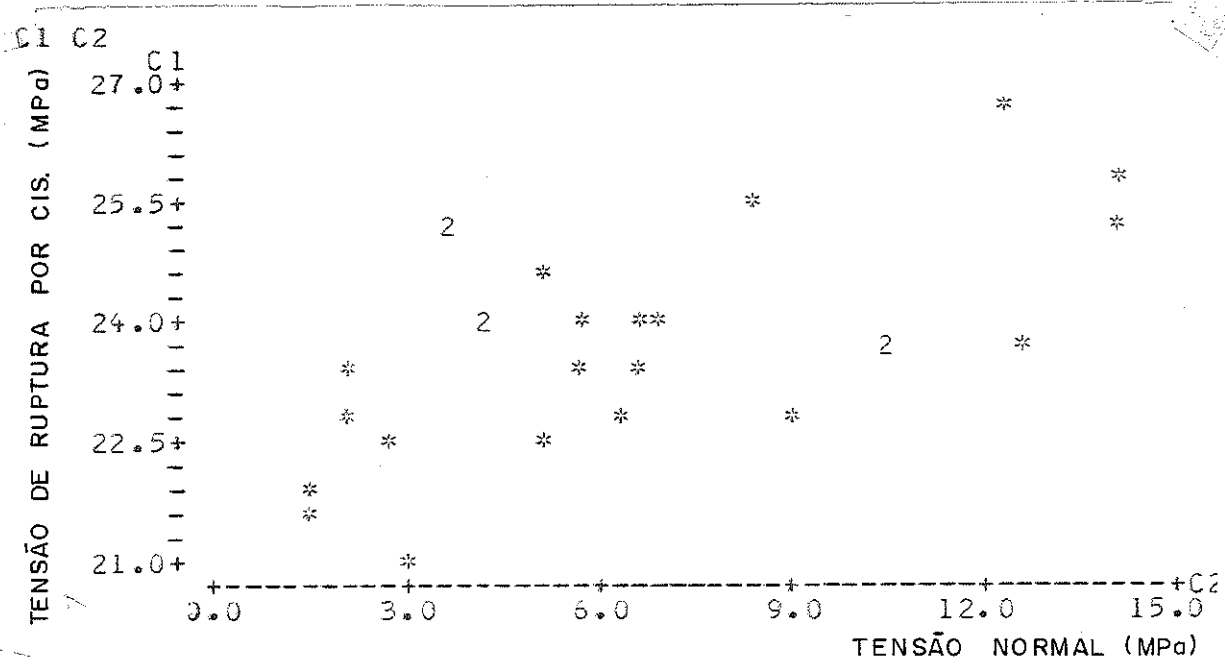


Figura 4.22 - Tensão de Cisalhamento x Tensão Normal - Cabriúva Vermelha

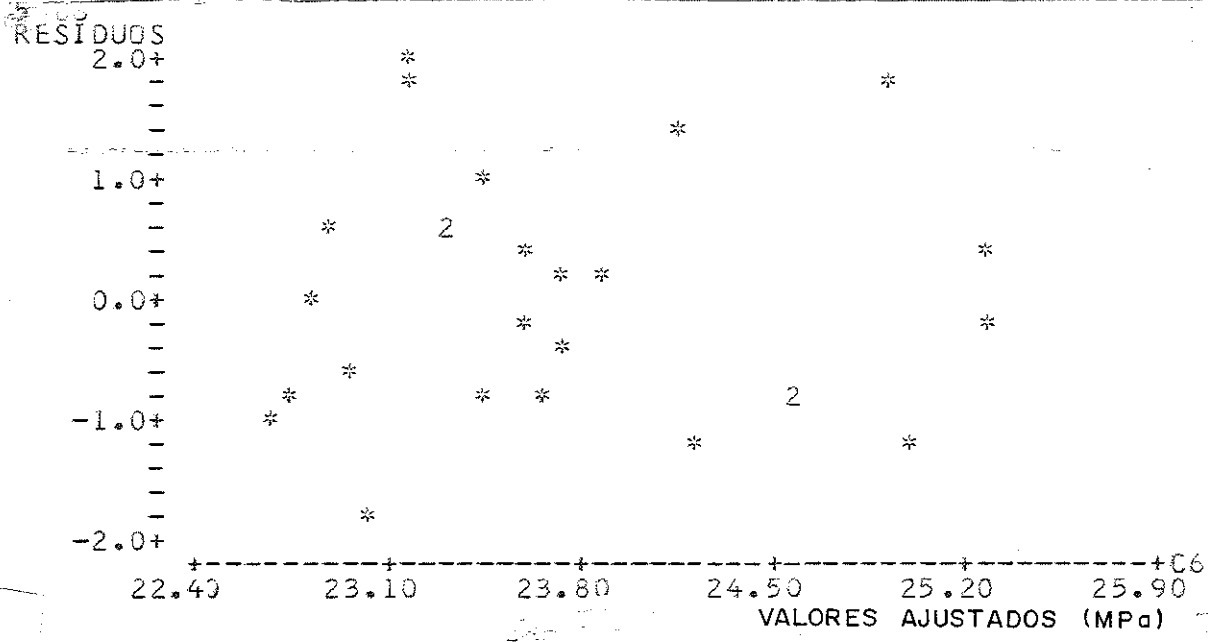


Figura 4.23 - Resíduos x Valores Ajustados - Cabriúva Vermelha

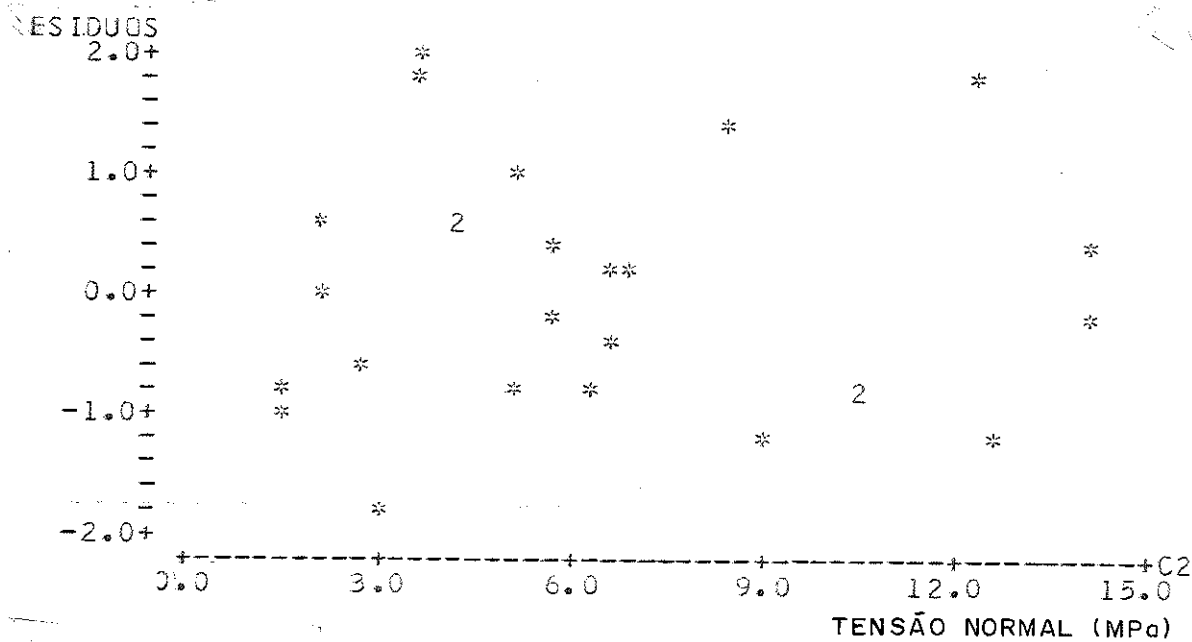


Figura 4.24 - Resíduos x Variável x - Cabriúva Vermelha

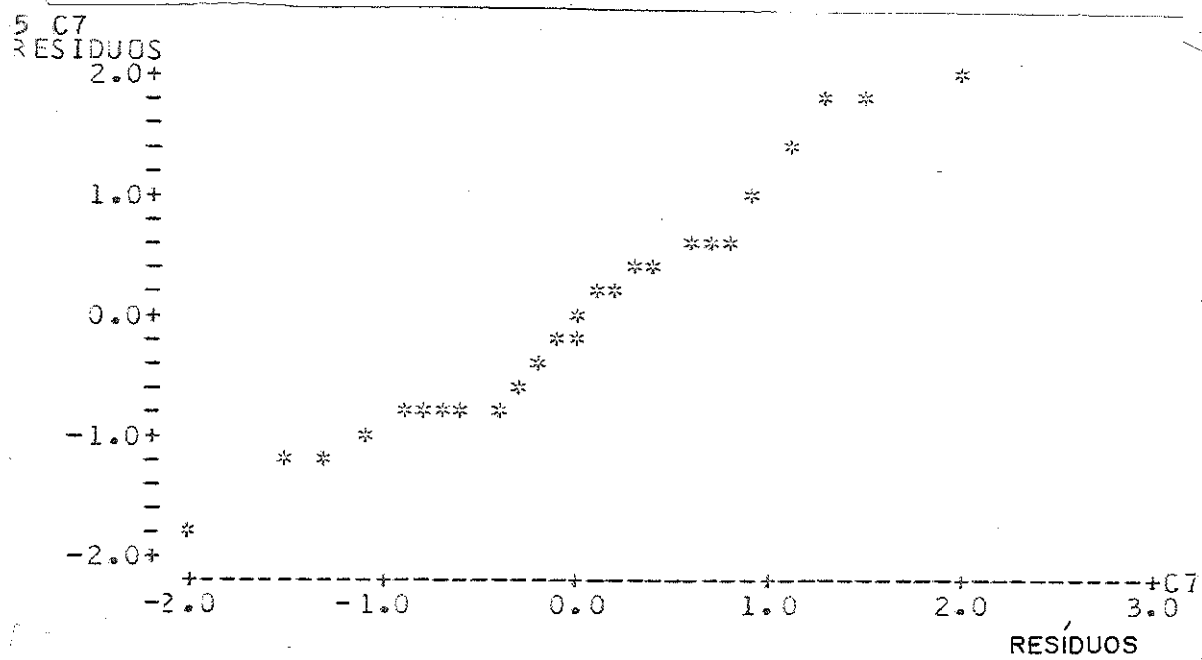


Figura 4.25 - Gráfico Probabilístico - Cabriúva Vermelha

CONCLUSÕES

Com apoio nas análises realizadas, pode-se tirar as conclusões:

1.^a) - Os ensaios de cisalhamento sob compressão normal revelam a existência de uma dependência linear entre a tensão de ruptura por cisalhamento e o valor da tensão normal aplicada ao corpo de prova.

2.^a) - As equações 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5, mostram a necessidade de um estudo mais sistemático do cisalhamento em vigas de madeira nas seções próximas dos apoios e das cargas, locais onde ocorrem concentração de tensões devidas à compressão normal.

CAP 05 CISALHAMENTO E DENSIDADE APARENTE A 15% DE UMIDADE

5.1 - INTRODUÇÃO

Como foi visto no item 2.2, Brotero (53), em 1931, traçou um gráfico para relacionar a tensão de ruptura por cisalhamento e a densidade aparente da madeira a 15% de umidade, com base nos resultados obtidos até então pelo IPT. Entretanto, na época o desenvolvimento da estatística ainda não permitia análises mais profundas dos resultados.

Com a finalidade de estimar a variação da tensão de ruptura por cisalhamento em função da densidade aparente a 15% de umidade, foram utilizados os resultados publicados pelo IPT (54), correspondentes ao ensaio de 200 (duzentas) toras de madeira de 90 (noventa) espécies, cujos resultados são listados na tabela 7.1. Os valores das tensões de ruptura de ensaios com madeira verde, mas, a densidade da madeira seca ao ar (15% de umidade). Os valores de cisalhamento correspondem à média de 24 (vinte e quatro) corpos de prova e os de densidade correspondem à média de 40 (quarenta) corpos de prova.

5.2 - ANÁLISE DOS DADOS

Realizou-se uma análise de regressão, com base nos resultados apresentados na tabela 7.1, utilizando a subrotina MINITAB implantada no computador IBM-370 da Escola de Engenharia de São Carlos. Analisou-se inicialmente o modelo quadrático proposto por Brotero (53), porém optou-se a seguir pelo modelo linear por apresentar melhores resultados, como pode ser visto na tabela 5.1.

(53) BROTERO, F.A. - Boletim nº 8 - p.38

(54) INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - *op. cit*

TÍTULO: Relação entre tensão de cisalhamento e densidade a 15%		
ESPECIFICAÇÃO	RESULTADO DA ANÁLISE DE REGRESSÃO	OBSERVAÇÕES/CONCLUSÕES
Modelo	$y = \beta_0 + \beta_1 x + u_i$	Conforme a figura 5.1
Equação	$\tau = - 1,75 + 17,3 D_{15} \dots\dots\dots(5.1)$	Obtida pelo método dos mínimos quadrados.
Teste de Correlação Linear	$R^2 = 0,55$	Donde se conclui pela razoável significância do modelo.
Teste F	Valor fornecido pela Análise $F(1.197) = \frac{761,007}{3,174} = 253$	Onde se pode concluir pela alta significância da análise de regressão.
	Nível de significância (55) $\alpha < 0,1\%$	
Teste t	Valor fornecido pela análise $t(197) = 15,48$	Pode-se concluir pela alta significância da variável x no modelo.
	Nível de significância (56) $\alpha < 0,05\%$	
Teste de Durbin-Watson	1,73 (57)	Nível satisfatório para a realização da análise de resíduos.
Análise de Resíduos	fig.5.2 Resíduos x Valores Ajustados	Os gráficos de resíduos não revelam problemas quanto ao modelo adotado
	fig.5.3 Resíduos x Variável x	
	fig.5.4 Gráfico Probabilístico	Revela distribuição normal dos resíduos.

Tabela 5.1 - Resumo da Análise de Regressão.

(55) Box, G.E.P. et alli, op. cit, p.636

(56) Box, G.E.P. et alli, op. cit, p.631

(57) HOFFMANN, R. & VIEIRA, S. - Análise de Regressão: uma introdução a econometria, p.225

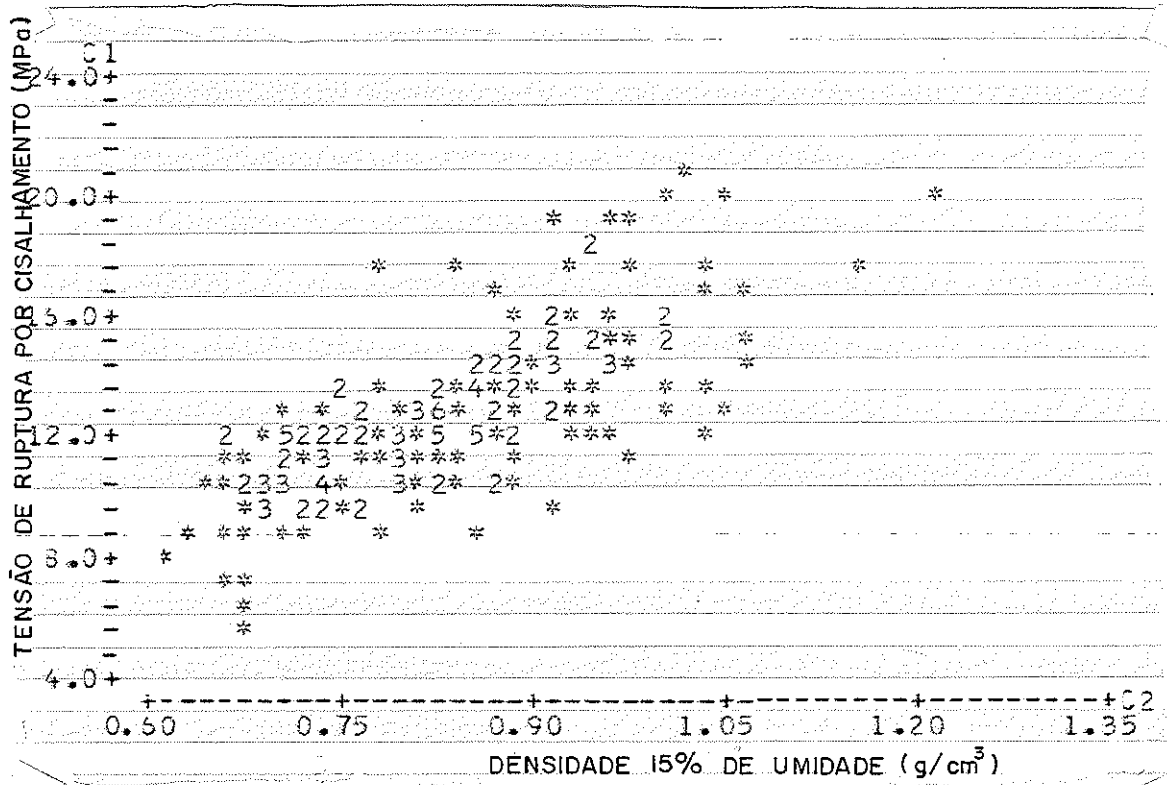


Fig. 5.1 - Tensão de Cisalhamento e Densidade a 15% de Umidade

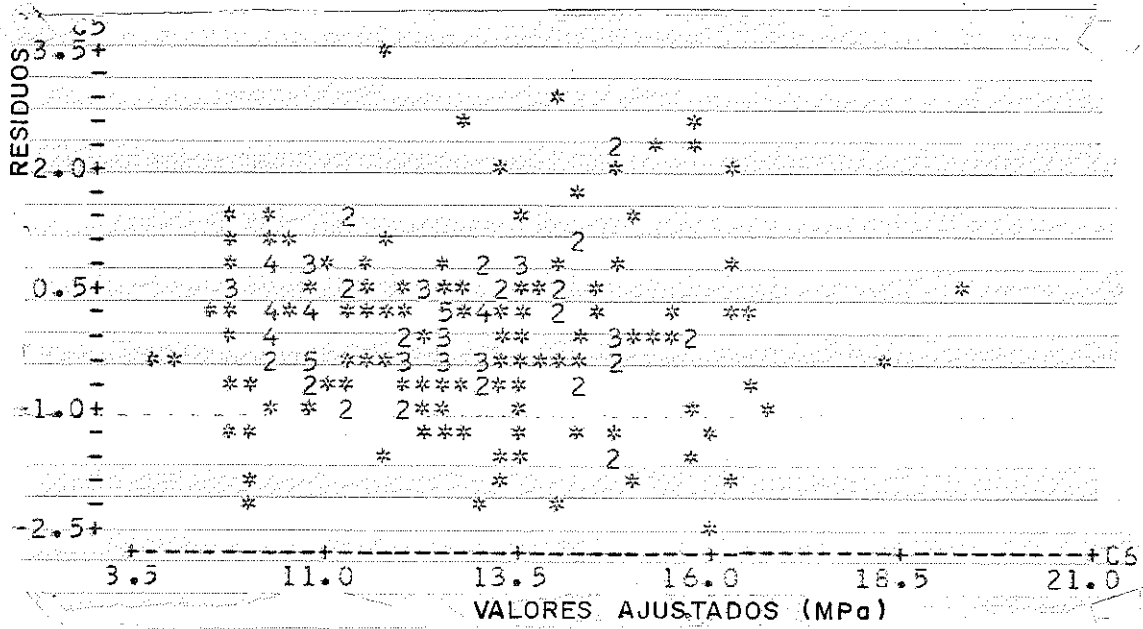


Figura 5.2 - Resíduos x Valores Ajustados

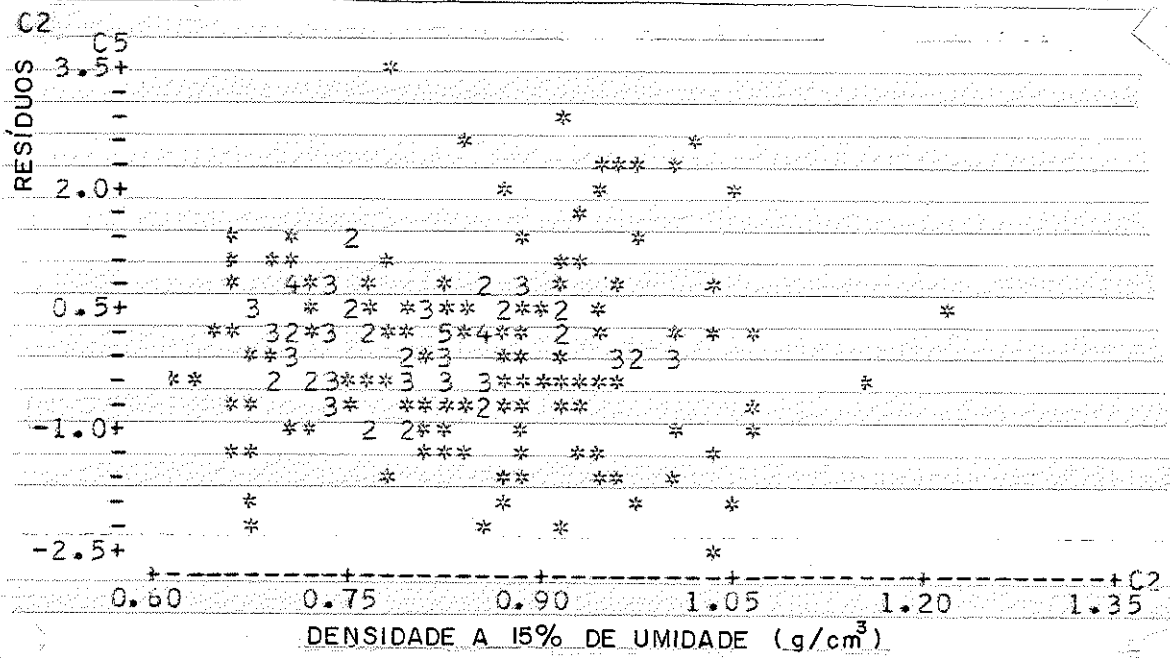


Figura 5.3 - Resíduos x Variável x

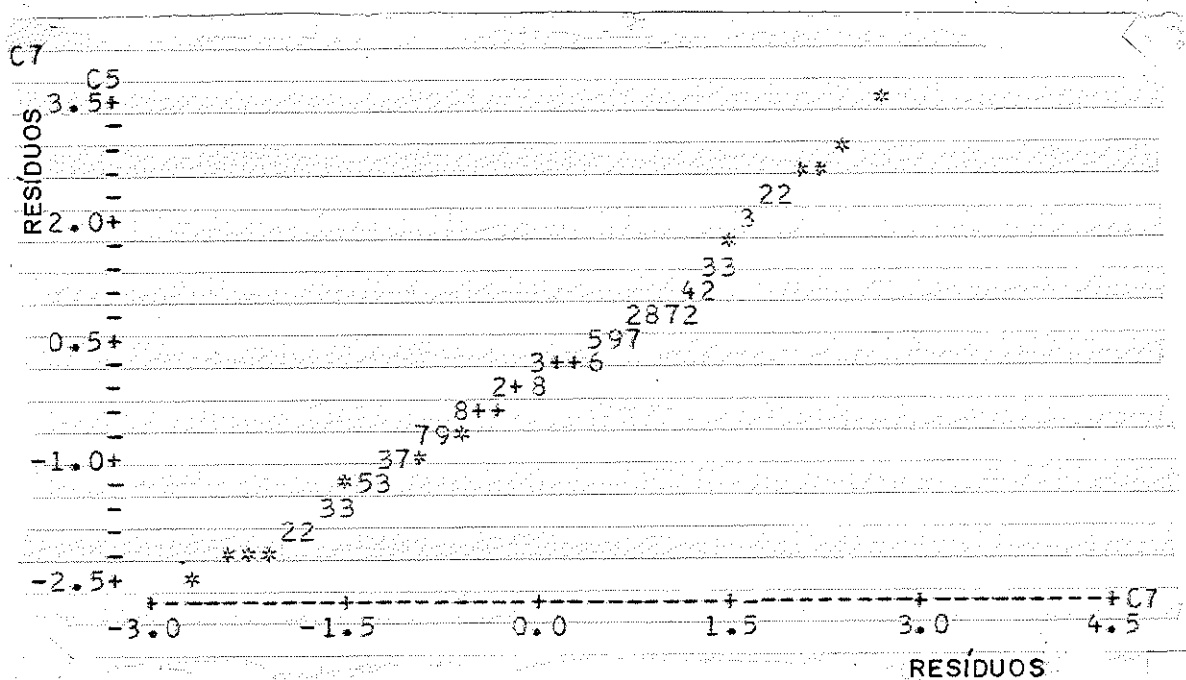


Figura 5.4 - Gráfico Probabilístico

5.3 - CONCLUSÃO

A maioria das propriedades mecânicas da madeira está relacionada com a densidade aparente da mesma. No caso presente, obtve-se a relação entre a tensão de ruptura por cisalhamento da madeira verde em função da densidade aparente à 15% de umidade, conforme a análise de regressão resumida na tabela 5.1.

De acordo com os resultados da análise de regressão, a equação 5.1 pode representar esta relação e permite estimar a tensão de ruptura por cisalhamento da madeira verde em função da densidade a 15% de umidade, ou vice-versa, para qualquer espécie de madeira.

Pode ser considerada como restrição à plena aceitação desta equação o fato de não se conhecer através dela a influência da variação da umidade juntamente com a variação da densidade dos corpos de prova. Esta situação justificou a realização da experimentação seguinte.

CAP 06 INFLUÊNCIA DA UMIDADE E DA DENSIDADE NA RESISTÊNCIA AO
CISALHAMENTO DA MADEIRA

6.1 - INTRODUÇÃO

As características de resistência mecânica e de elasticidade da madeira são afetadas pela variação da densidade e da umidade.

Os estudos relativos à influência da densidade e da umidade no cisalhamento são escassos na literatura internacional e praticamente inexistentes para as madeiras brasileiras.

Pelo Wood Handbook (58), a correção da tensão de cisalhamento em função do teor de umidade é a seguinte: "para um aumento de 1% no teor de umidade da madeira deverá haver um decréscimo de 3% na tensão de cisalhamento". Esta recomendação corresponde à utilização da equação 6.1

$$\tau_{12} = \tau_u + 0,03 \tau_u (U - 12) \dots\dots\dots (6.1)$$

Neste capítulo é apresentado um estudo do cisalhamento com variação da densidade e da umidade da madeira.

Será realizado também um estudo com a finalidade de corrigir a tensão de cisalhamento em função do teor de umidade. A umidade padrão a ser considerada neste trabalho é de 12%, devido ser este o valor considerado pela maioria das normas internacionais. E a futura revisão das normas brasileiras deverá adotar também a umidade padrão de 12%, para que nossas madeiras possam competir em igualdade de condições no mercado internacional.

(58) FOREST PRODUCTS LABORATORY - op. cit. p.85

Tendo em vista a grande dificuldade de avaliar as deformações nos ensaios de cisalhamento, será utilizado um dispositivo de registro das deformações, figura 6.1.

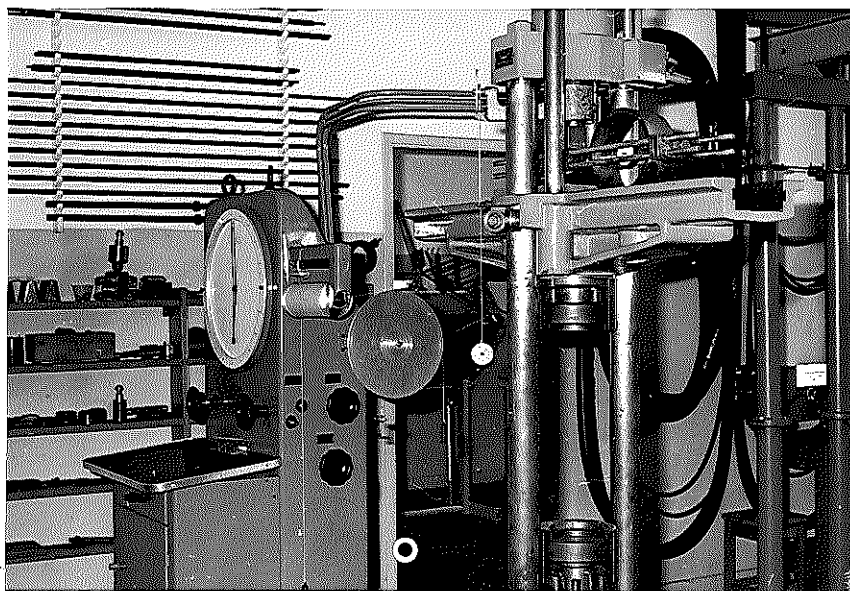


Figura 6.1 - Dispositivo para Registrar as Deformações

6.2 - METODOLOGIA DE ENSAIO

6.2.1 - MATERIAL ENSAIADO

Foram escolhidas quatro barras por espécie de madeira. Foram ensaiados 56 corpos de prova em sete níveis de umidade: (0, 5, 10, 15, 20, 25 e 30%), dois por barra e por umidade, ou 14 corpos de prova por barra. Foram ensaiados corpos de prova de Peroba Rosa, de Jatobá e de Pinho do Paraná. Os ensaios foram realizados segundo o MB-26.

6.2.3 - CLIMATIZAÇÃO

Estimou-se a umidade dos corpos de prova, utilizando-se um medidor elétrico. Em seguida, mergulhou-se parte dos corpos de

prova em água para assegurar o aumento da umidade nestes corpos de prova. Acompanhando o aumento da umidade, através de aferição sucessiva das massas dos corpos de prova semelhantes, obtiveram-se os níveis de umidade acima da umidade de equilíbrio ao ar. Ao atingir a umidade desejada, os corpos de prova foram colocados em frascos estanques por vários dias, para garantir a homogeneização da umidade.

Os demais corpos de prova foram colocados em estufa com a temperatura devidamente controlada para a obtenção dos teores de umidade inferiores à umidade de equilíbrio ao ar. Na tabela 6.1 é apresentada uma sequência de temperaturas, considerando-se a umidade de ambiente média como sendo constante e a umidade média resultante nos corpos de prova em etapas sucessivas de climatização, totalizando 15 dias de climatização dos corpos de prova mais secos.

TEMPERATURA (°C)	TEOR DE UMIDADE (%)	PERMANÊNCIA MÍNIMA (HORAS)
25	12	72
35	9	72
45	6	72
60	3	72
100	0	72

Tabela 6.1 - Esquema Simplificado de Secagem

6.3 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos nos ensaios estão indicados nas tabelas 6.2, 6.3 e 6.4 para o Pinho do Paraná, Peroba Rosa e Jatobá, respectivamente, nas quais são apresentadas: a tensão de ruptura por cisalhamento em MPa, o teor de umidade em % e a densidade aparente do corpo de prova em g/cm³.

O teor de umidade indicado nas tabelas se baseia na massa do corpo de prova seco obtida após o condicionamento do mesmo à temperatura de 100° ± 3°C até a constância de peso.

A densidade indicada nas tabelas se baseia nos volumes e massas dos corpos de prova no momento do ensaio.

Nos diagramas das figuras 6.2 e 6.3, são apresentados os diagramas carga x deformação, obtidos em registro mecânico elementar, da máquina Universal de Ensaio, aperfeiçoado no LaMEM, fig. 6.1, para a avaliação qualitativa do tipo de ruptura ao cisalhamento em função do teor de umidade.

ESPÉCIE: Pinho do Paraná			
Barra	τ (Mpa)	U(%)	D. (g/cm ³)
(1)	8,79	21,38	0,59
	8,11	22,12	0,59
	7,46	26,48	0,60
	7,03	27,44	0,60
	7,06	33,85	0,63
	6,87	28,51	0,61
	13,48	13,71	0,57
	14,72	13,57	0,58
	15,30	12,52	0,57
	15,09	12,54	0,56
	16,60	7,43	0,53
	16,26	7,44	0,55
	17,09	4,23	0,54
	19,86	4,63	0,55
	19,26	1,51	0,54
	20,52	1,18	0,55
	19,49	0,00	0,51
	20,59	0,00	0,53
	6,85	30,37	0,62
	(2)	16,93	0,00	0,52
12,47		0,00	0,45
12,35		2,12	0,47
13,81		1,66	0,46
11,60		4,22	0,47
9,55		4,30	0,46
15,02		7,45	0,54
12,35		7,64	0,48
15,28		9,07	0,56
11,99		9,67	0,47
11,91		13,37	0,48
11,22		14,19	0,48
5,74		40,09	0,56
5,85		39,89	0,57

Cont.

Tabela 6.2 - Continuação			
Barra	τ (MPa)	U (%)	D. (g/cm ³)
(3)	16,99	0,00	0,51
	15,10	0,00	0,51
	14,96	1,84	0,47
	19,86	2,33	0,53
	15,48	4,65	0,51
	14,02	4,84	0,51
	13,12	6,57	0,51
	12,60	7,67	0,50
	14,42	9,39	0,53
	12,65	8,89	0,52
	12,99	13,30	0,53
	10,48	12,78	0,53
	6,50	31,70	0,57
	7,18	26,00	0,55
	7,67	31,05	0,58
	6,36	32,22	0,57
7,01	29,43	0,57	
(4)	15,15	0,00	0,53
	17,48	0,00	0,54
	18,43	2,13	0,55
	13,13	2,75	0,55
	13,94	4,94	0,56
	14,29	4,77	0,55
	13,51	6,97	0,55
	15,22	7,03	0,56
	14,04	9,40	0,56
	13,33	10,39	0,56
	12,28	13,28	0,57
	13,12	13,17	0,57
	6,70	30,48	0,60
	7,23	24,62	0,58
	6,68	31,10	0,62
6,62	31,17	0,61	

Tabela 6.2 - Resultados da Influência do Teor de Umidade e Densidade no Pinho do Paraná

ENSAIO: Peroba Rosa			
Barra	τ (MPa)	U (%)	D (g/cm ³)
(1)	11,55	29,45	0,84
	17,50	14,92	0,79
	15,73	0,00	0,74
	19,36	2,62	0,77
	13,94	14,99	0,79
	20,54	8,27	0,77
	20,90	9,31	0,79
	12,20	29,60	0,85
	16,63	0,00	0,75
	14,20	3,89	0,78
(2)	11,33	30,26	0,80
	11,37	29,20	0,80
	18,29	0,00	0,72
	15,87	15,38	0,76
	13,99	2,27	0,71
	15,45	14,57	0,75
	19,07	3,51	0,73
	19,47	9,84	0,76
	21,69	0,00	0,71
	17,36	8,98	0,74
(3)	19,04	1,67	0,73
	15,26	15,19	0,75
	21,15	0,00	0,73
	11,59	29,30	0,81
	22,55	0,00	0,72
	17,95	3,83	0,73
	17,58	9,41	0,75
	10,53	29,73	0,82
	14,97	15,47	0,77
	18,22	9,10	0,75
(4)	11,58	28,57	0,85
	18,64	2,58	0,78
	14,56	16,37	0,82
	17,79	9,03	0,80
	18,08	7,86	0,80
	21,70	0,00	0,78
	14,79	16,21	0,83
	14,52	0,00	0,84
	12,07	30,69	0,93
	20,02	4,14	0,84

Tabela 6.3 - Resultados dos Ensaios da Influência do Teor de Umidade e Densidade na Peroba Rosa

ESPÉCIE: Jatobá			
Barra	τ_R (MPa)	U (%)	D (g/cm ³)
1	18,89	29,05	1,01
	18,53	27,36	0,95
	17,96	22,27	0,91
	17,99	22,12	0,91
	21,03	11,98	0,89
	21,42	11,14	0,85
	19,75	16,67	0,92
	21,09	16,25	0,88
	19,99	9,18	0,84
	24,06	0,00	0,84
	21,30	12,69	0,89
	20,39	5,46	0,87
	26,03	3,32	0,86
	2	14,63	34,82	1,02
15,20		38,77	1,05
14,24		25,69	1,00
13,51		27,89	0,98
18,19		11,35	0,89
19,29		11,68	0,88
12,45		24,36	0,98
10,14		26,23	1,00
13,61		17,87	0,91
14,60		17,74	0,91
18,48		10,23	0,87
15,93		10,23	0,87
16,69		14,36	0,90
16,80		14,53	0,90
15,02		12,62	0,87
14,23		5,94	0,85
14,40	3,48	0,84	
3	16,85	39,23	1,07
	12,96	36,21	1,04
	16,90	27,61	1,00
	17,40	28,81	1,02
	21,02	12,33	0,92
	17,59	12,26	0,90
	19,19	17,85	0,93
	18,98	18,11	0,94
	20,07	0,00	0,89
	19,99	0,00	0,88
	18,71	13,84	0,89
	18,03	7,55	0,88
	21,29	5,29	0,90
	22,30	0,00	0,86

Tabela 6.4 - Resultados dos Ensaios de Influência do Teor de Umidade e Densidade para o jatobá.

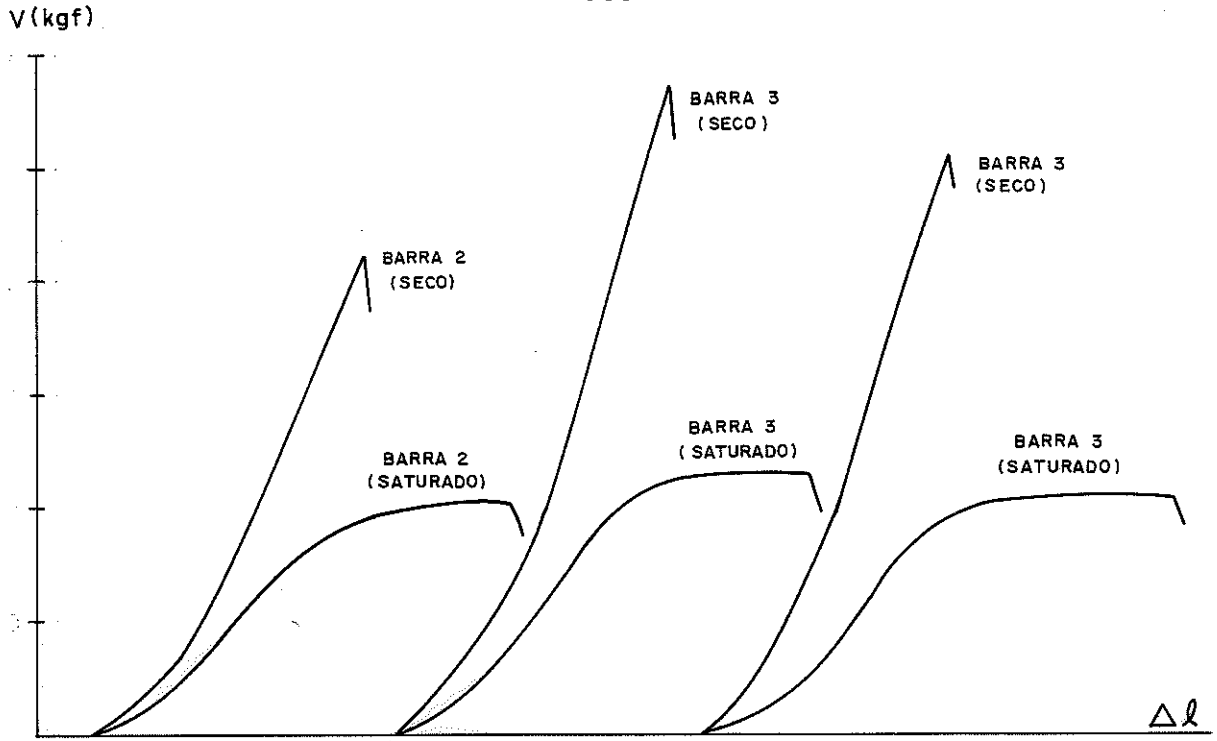


Figura 6.2 - Diagrama Carga x Deformação Qualitativo para Corpos de Prova Secos e Saturados.

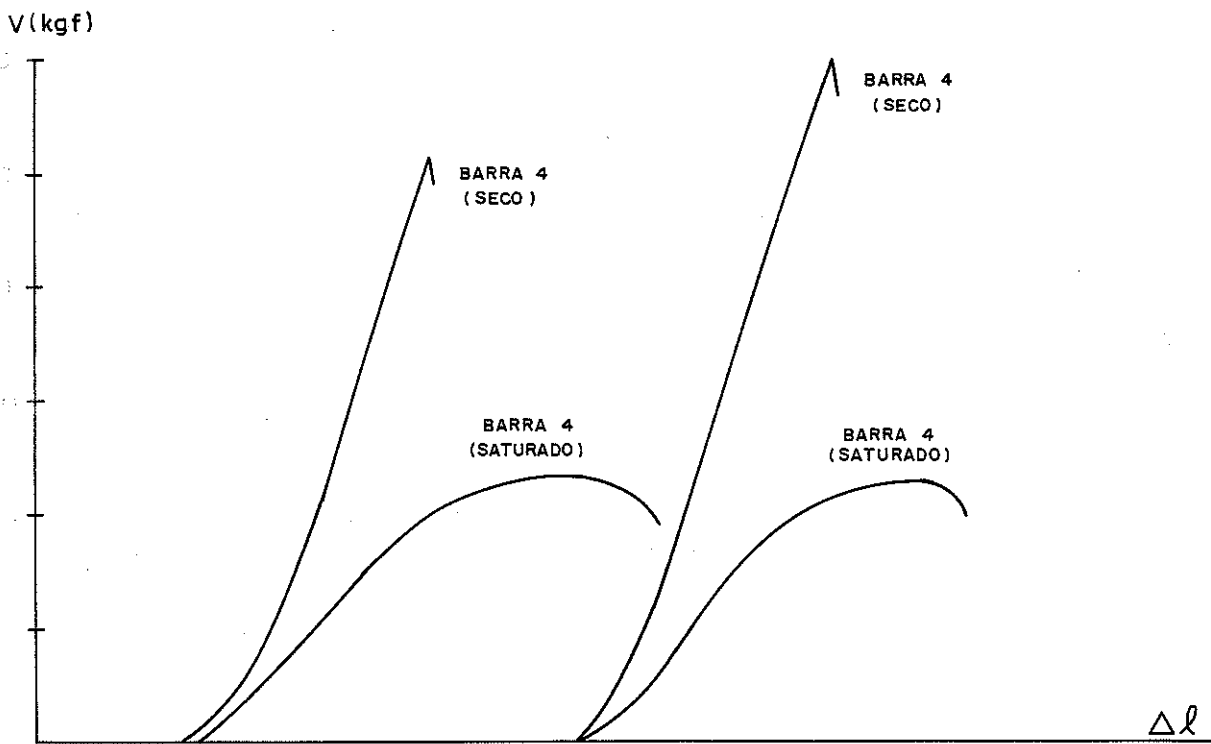


Fig. 6.3 - Diagrama Carga x Deformação qualitativo para Corpos de Prova Secos e Saturados.

6.4 - ANÁLISE DE RESULTADOS

6.4.1 - TIPO DE RUPTURA

Constata-se pelos ensaios, haver influência do teor de umidade da madeira no tipo de ruptura. Verifica-se, para corpos de prova com umidade abaixo de 15%, que a ruptura pode ser considerada do tipo frágil. Esta fragilidade diminui com o aumento do teor de umidade, tornando-se do tipo plástico nos corpos de prova saturados, figuras 6.2 e 6.3.

6.4.2 - TENSÃO DE RUPTURA POR CISALHAMENTO, UMIDADE E DENSIDADE

O gráfico apresentado na figura 6.4, tensão de cisalhamento x teor de umidade, mostra uma tendência logarítmica ou uma tendência linear com duas leis de variação, para a umidade abaixo ou acima do ponto de saturação da madeira. Neste diagrama é ignorada a contribuição da influência da variação da densidade.

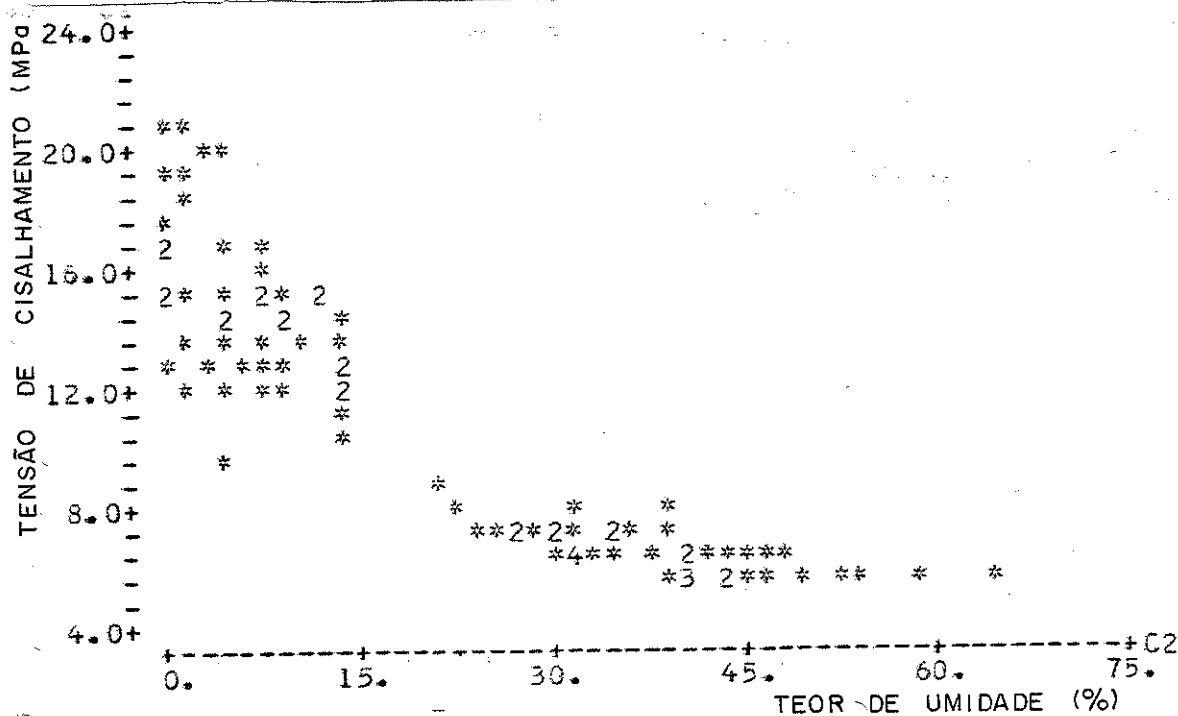


Figura 6.4 - Variação da Tensão de Cisalhamento com o Teor de Umidade

A variação da tensão de cisalhamento com a densidade apresenta tendência parabólica, figura 6.5, entretanto não se considerou neste diagrama a influência da variação da umidade.

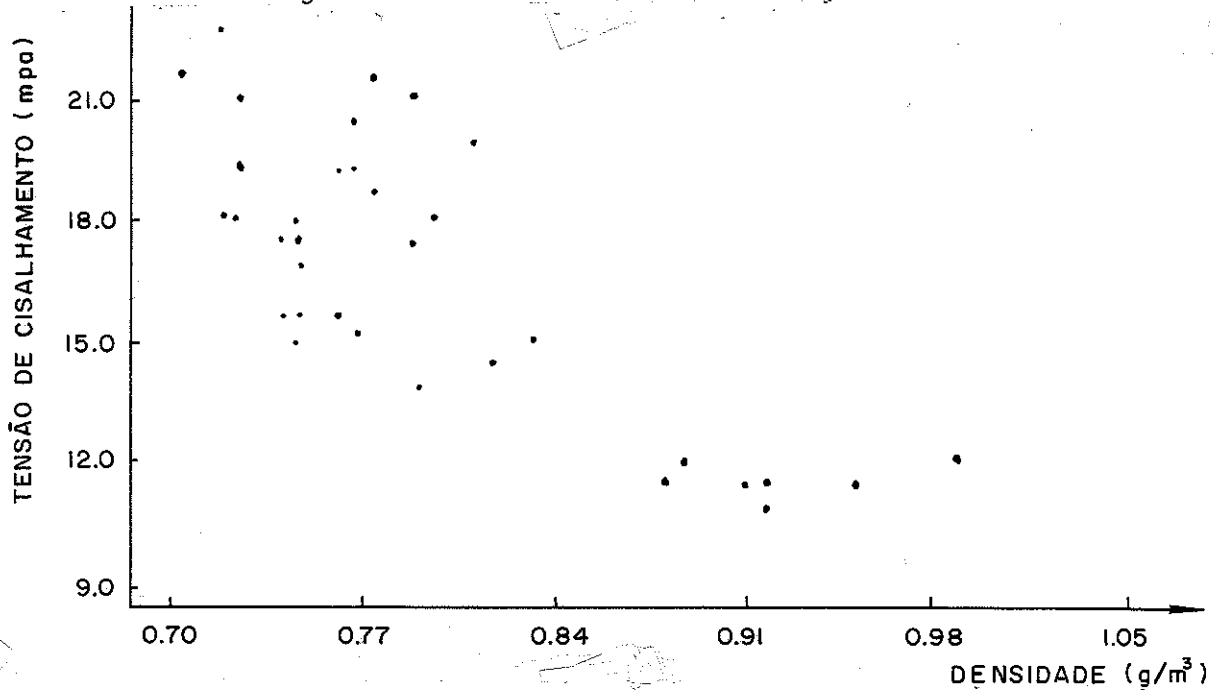


Figura 6.5 - Variação da Tensão de Cisalhamento com a Densidade

A partir das observações das figuras 6.4 e 6.5 e, considerando-se as influências não lineares, realizou-se uma análise de regressão, utilizando-se a subrotina MINITAB implantada no computador IBM-370 da E.E.S.C. e, após várias tentativas, optou-se pelo modelo apresentado na expressão (6.2) (59).

$$\frac{\log}{D} = \beta_0 + \beta_1 U + \beta_2 U^2 + u_i \dots \dots \dots (6.2)$$

Os resultados da análise realizada são mostrados nas tabelas 6.5, 6.6 e 6.7, para o Pinho do Paraná, Peroba Rosa e Jatobá respectivamente.

(58) PIGOZZO, J.C. - Influência da umidade e da densidade na resistência à compressão da madeira - p. 85.

TÍTULO: Relação entre Cisalhamento, Umidade e Densidade				
ESPÉCIE: Pinho do Paraná				
Especificação	Resultados da Análise			Observações/Conclusões
Equação	$\log \tau = 2,45D - 0,0431 U.D + 0,0004 U^2 . D \dots\dots (6.3)$			Ajuste pelo método dos mínimos Quadrados.
Teste de Correlação	$R^2 = 0,95$			Pode-se concluir pelo alto nível de significância.
Teste t	Coeficientes	t ₀	Significância (%) (60)	Conclui-se pela alta significância de todas as variáveis no modelo
	β ₁	-19,56	0,05	
	β ₂	8,25	0,05	
Teste F	$F(2,89) = 868,9$			Conclui-se pela alta significância da regressão.
	Nível de significância $\alpha < 0,1\% (61)$			
Análise de Resíduos	A análise de resíduos realizada não revelou nenhum problema com o modelo adotado. O gráfico probabilístico da figura 6.6 revela distribuição normal para os resíduos.			

Tabela 6.5 - Resumo da Análise de regressão.

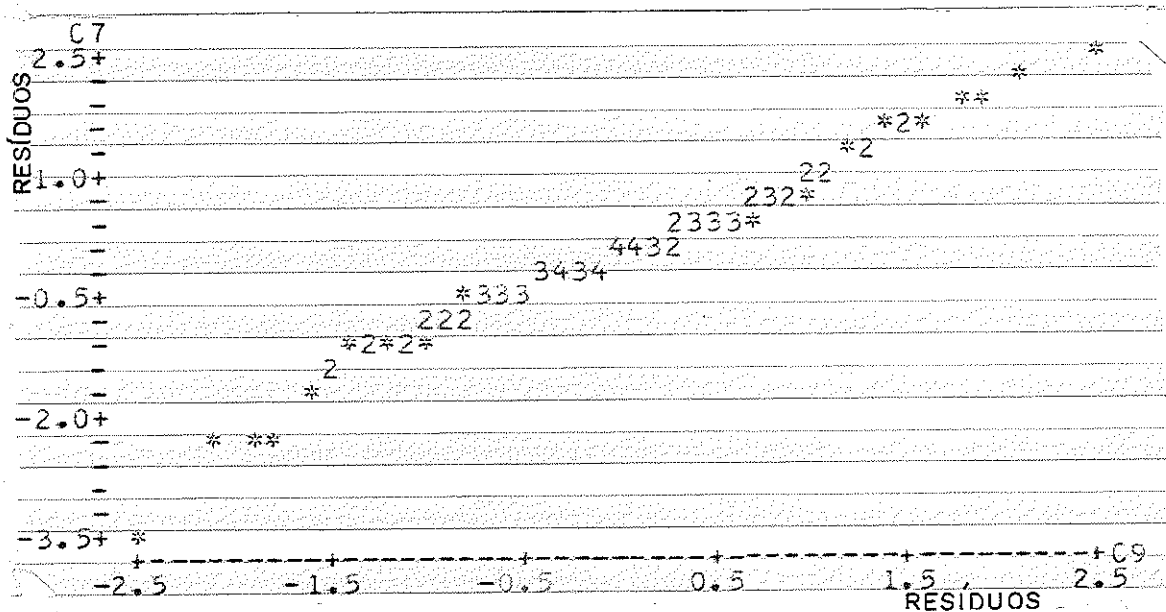


Figura 6.6 - Gráfico Probabilístico - Pinho do Paraná

(60) Box G.E.P., et alli op. cit - p.636

(61) Box G.E.P., et alli op. cit - p.631

TÍTULO: Relação entre Cisalhamento, Umidade e Densidade				
ESPÉCIE: Peroba Rosa				
ESPECIFICAÇÃO	RESULTADO DA REGRESSÃO			OBSERVAÇÕES/CONCLUSÕES
Equação	$\log \tau = 1,72D - 0,0129 U.D... (6.4)$			Obtida do ajuste pelo método dos mínimos quadrados
Teste de Correlação	$R^2 = 0,85$			Pode-se concluir pelo alto nível de significância
Teste F	$F(2,57) = 159,89$			Pode-se concluir pelo alto nível de significância da regressão.
	Nível de significância (62) $\alpha < 0,1\%$			
Teste t	Coef.	t	Significância % ... (63)	Altamente Significante A variável U^2 não é significativa no modelo e por isso optou-se por eliminá-la do modelo
	β_1	- 4,33	0,05	
	β_2	- 0,21	40	
Análise de Resíduos	A análise de resíduo realizada não revelou nenhum problema com o modelo adotado. O gráfico probabilístico da figura 6.7, indica a distribuição normal dos resíduos.			

Tabela 6.6 - Resumo dos Resultados da Análise de Regressão para a Peroba Rosa.

(62) Box, G.E.P. et alii - op. cit. p.636

(63) Box, G.E.P., et alii - op. cit. p.631

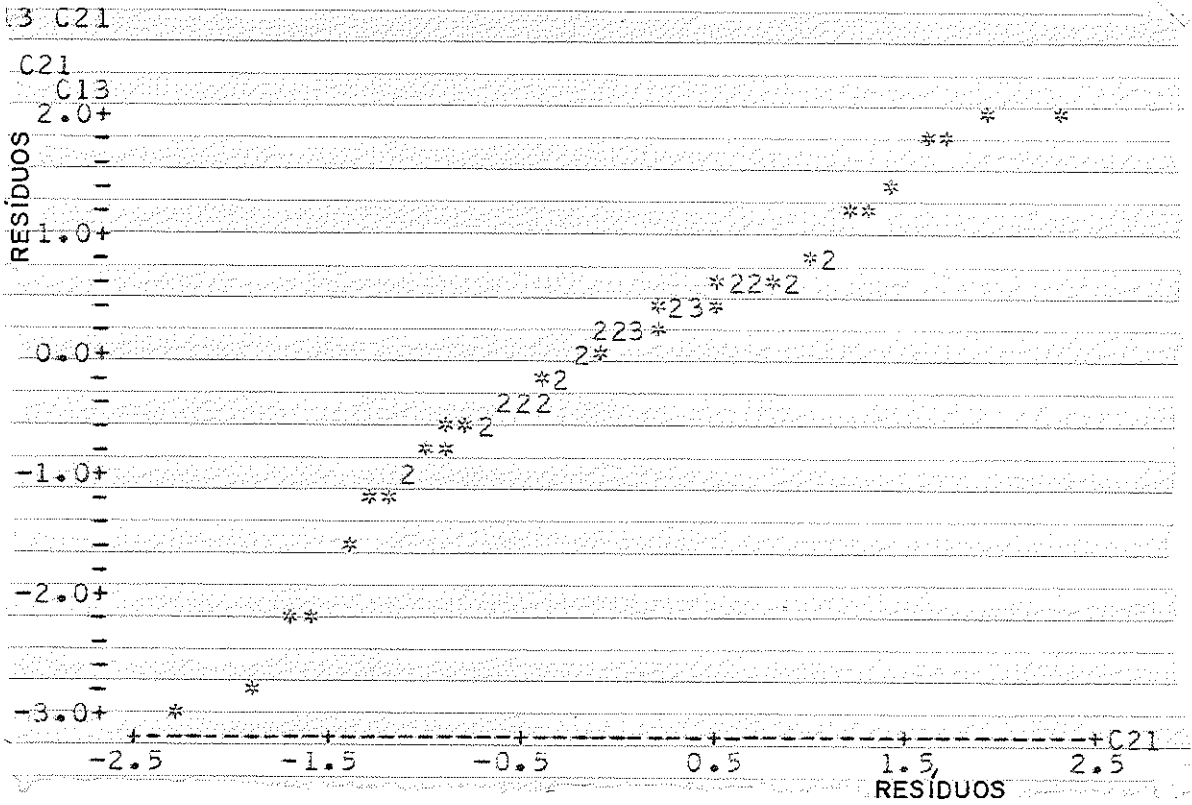


Figura 6.7 - Gráfico Probabilístico - Peroba Rosa

TÍTULO: Relação entre Tensão de Cisalhamento, Umidade e Densidade				
ESPÉCIE: Jatobá				
ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS DA ANÁLISE			OBSERVAÇÕES/CONCLUSÕES
Equação	$\log \tau = 1,55D - 0,0103 \text{ U.D} \dots\dots (6.5)$			Obtida pelo método dos mínimos quadrados.
Teste de Correção Linear	$R^2 = 0,71$			Pode-se concluir pela boa significância.
Teste t	β_1	$t(42) = - 2,58$	$\alpha = 0,5\% (56)$	Signif. no Modelo.
	β_2	$t(42) = - 0,47$	$\alpha = 30\% (62)$	Não significante no Modelo.
Teste F	$F(2,42) = 50,58$			Pode-se concluir pela Significância da regressão.
	Nível de Significância $\alpha = 0,1\% (63)$			
Análise de Resíduos	A análise de resíduos não revela problemas com o modelo adotado. O gráfico probabilístico da figura 6.8 indica a distribuição normal dos resíduos			

Tabela 6.7 - Resumo dos resultados da análise de regressão para o Jatobá.

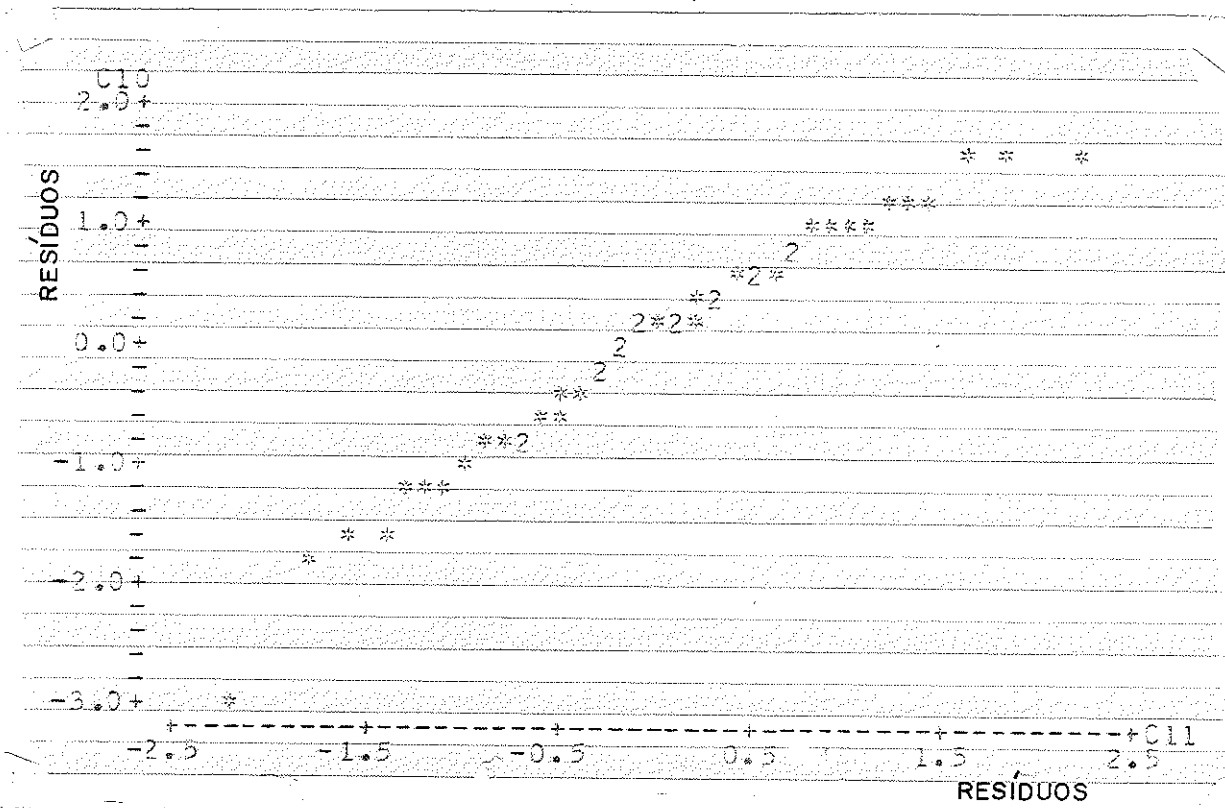


Figura 6.8 - Gráfico Probabilístico - Jatobá

Com a intenção de facilitar a aplicação das equações de regressão 6.3, 6.4 e 6.5, traçaram-se os gráficos da tensão de ruptura x teor de umidade para diversas densidades indicadas nas figuras 6.9, 6.10 e 6.11 para o Pinho do Paraná, para a Peroba Rosa e para o Jatobá e traçaram-se também os gráficos da tensão de ruptura x densidade para diversos teores de umidade indicados nas figuras 6.12, 6.13 e 6.14 para o Pinho do Paraná, para a Peroba Rosa e para o Jatobá.

Os diagramas apresentados a seguir permitem a correção da tensão de cisalhamento para as espécies indicadas em função do teor de umidade, levando-se em conta também a influência da densidade, com a ajuda do ábaco de Kollmann; da densidade x teor de umidade apresentado na figura 6.15.

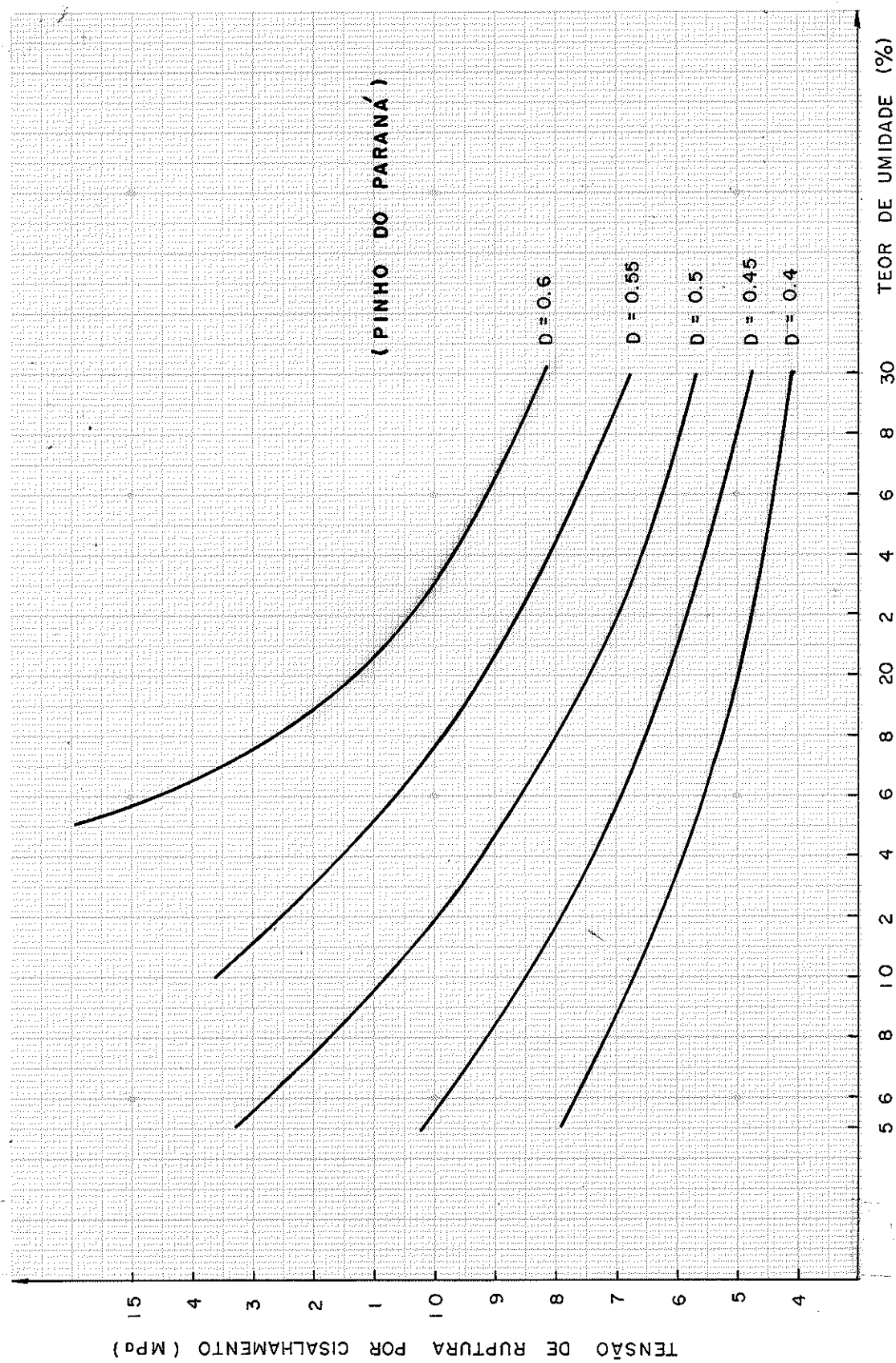


Figura 6.9 - Diagrama tensão de ruptura x teor de umidade

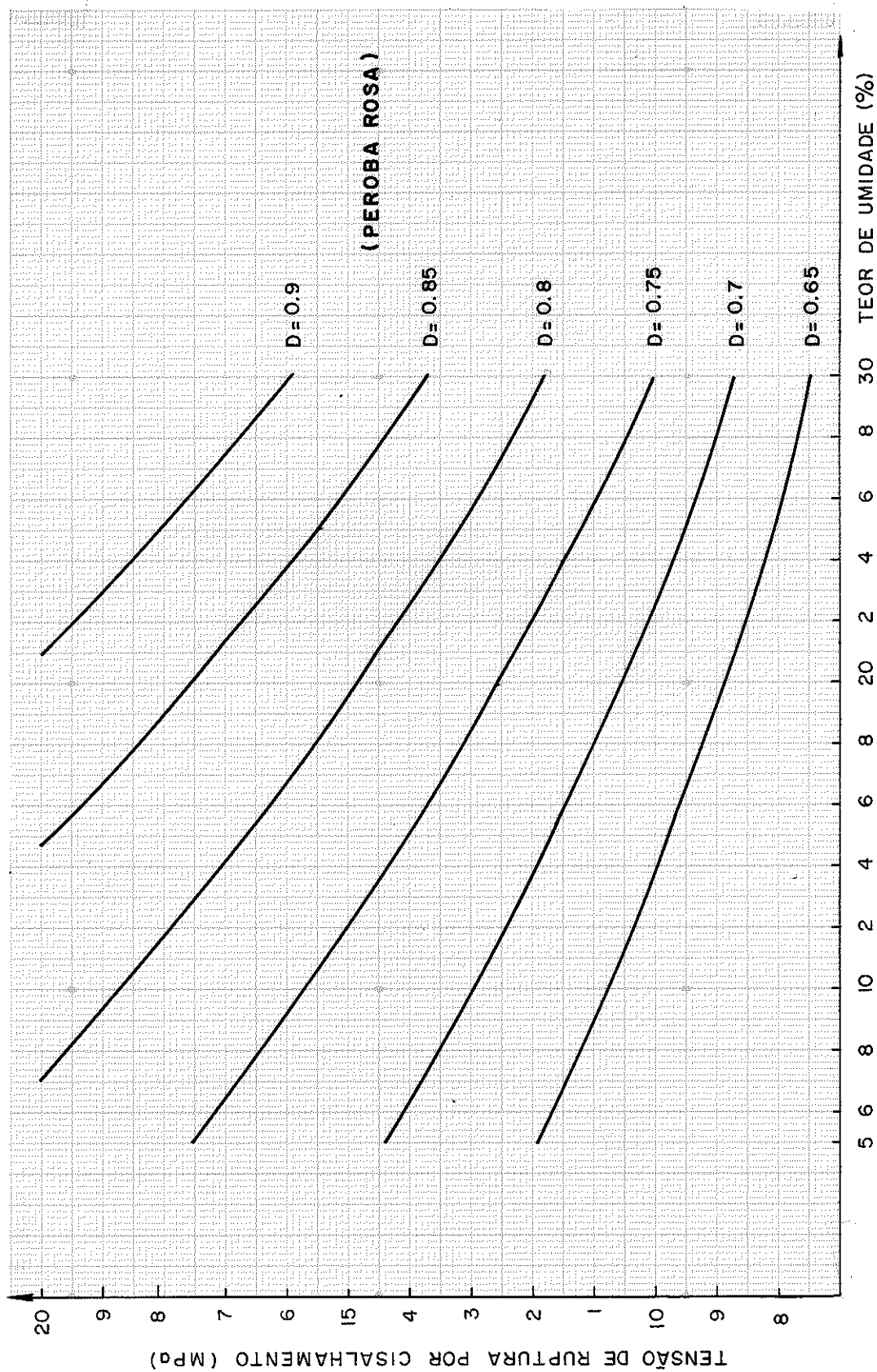


Figura 6.10 - Diagrama tensão de ruptura x teor de umidade

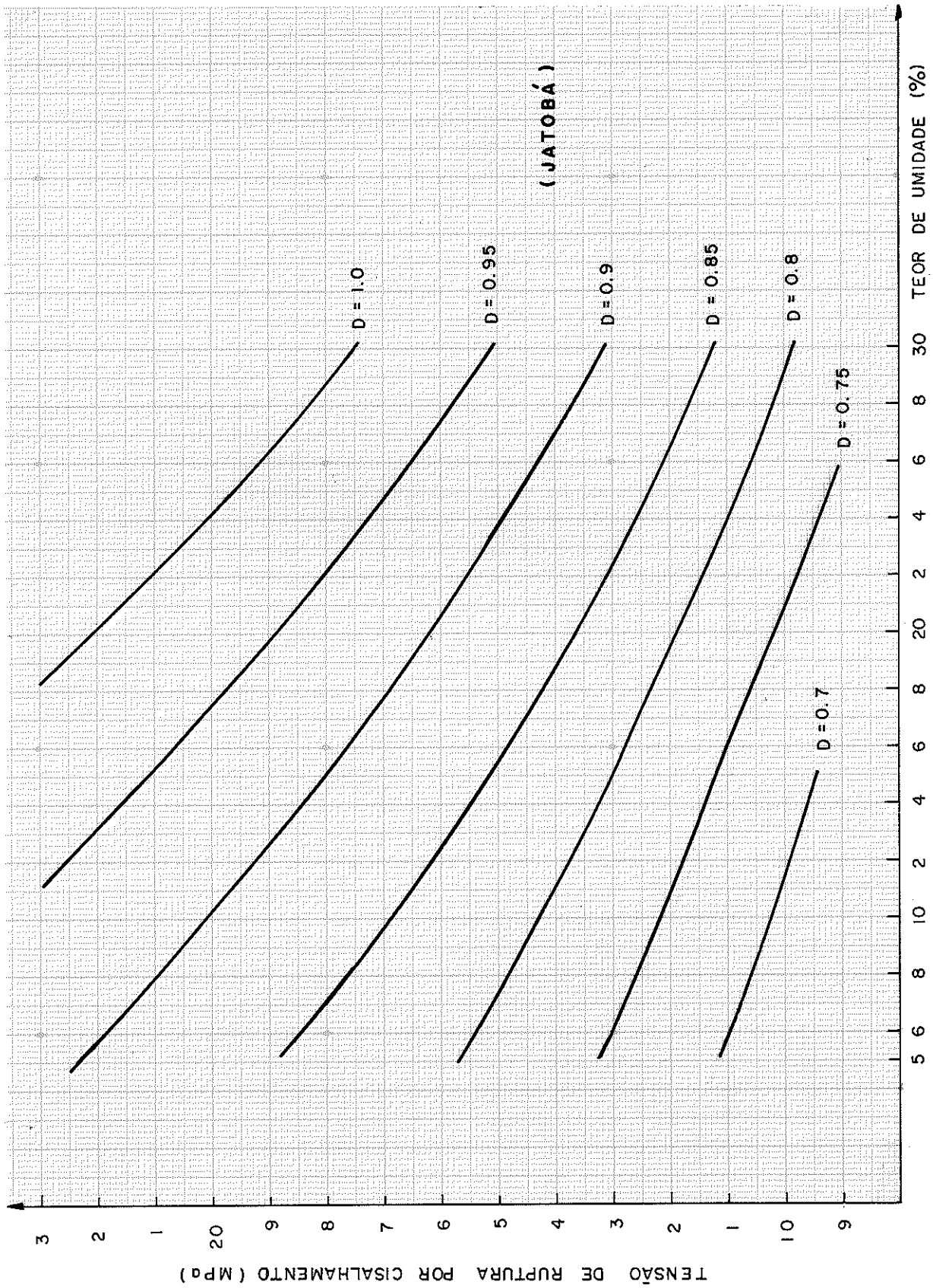


Figura 6.11 - Diagrama tensão de ruptura x teor de umidade

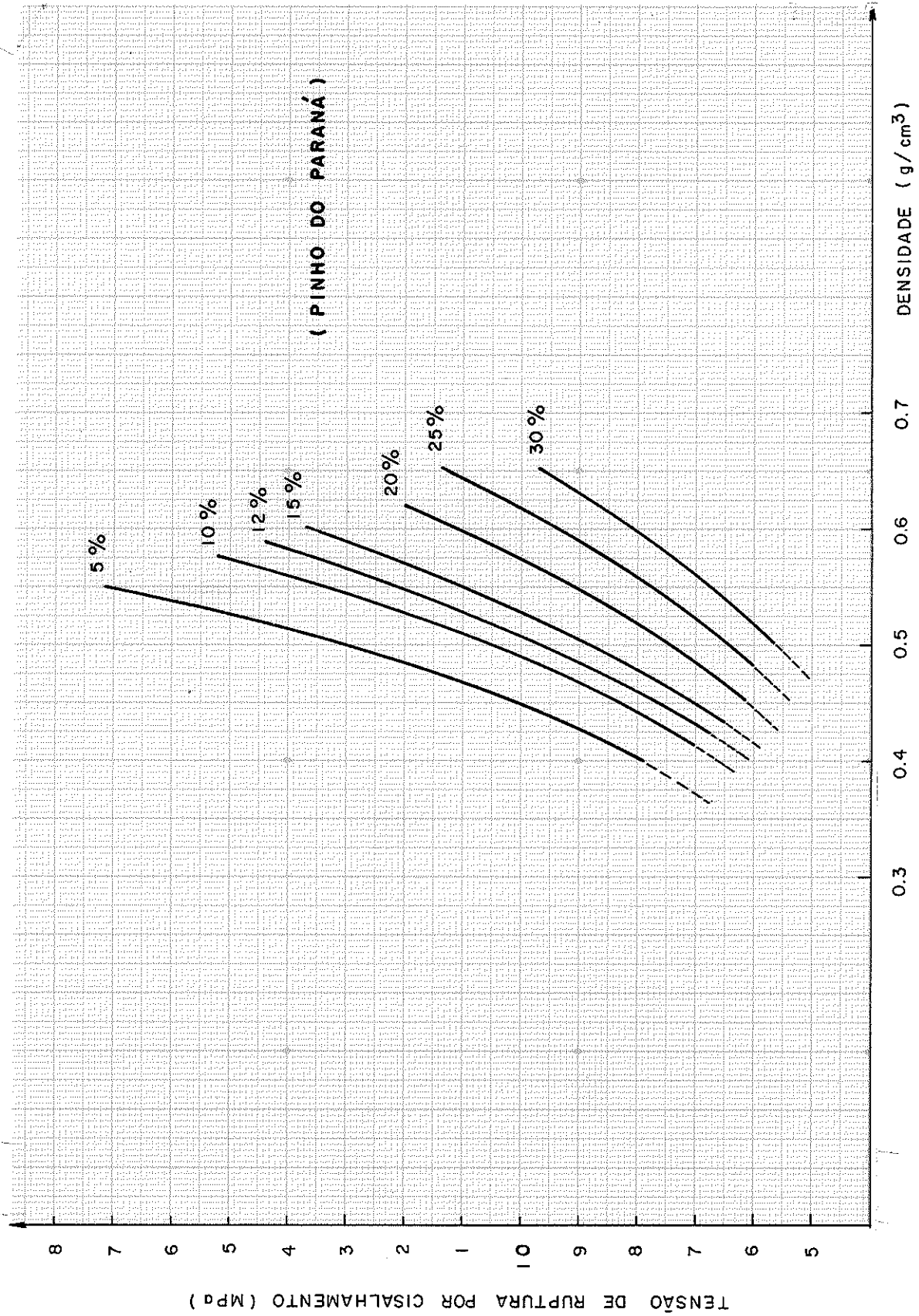


Figura 6.12 - Diagrama tensão de ruptura x Densidade

17

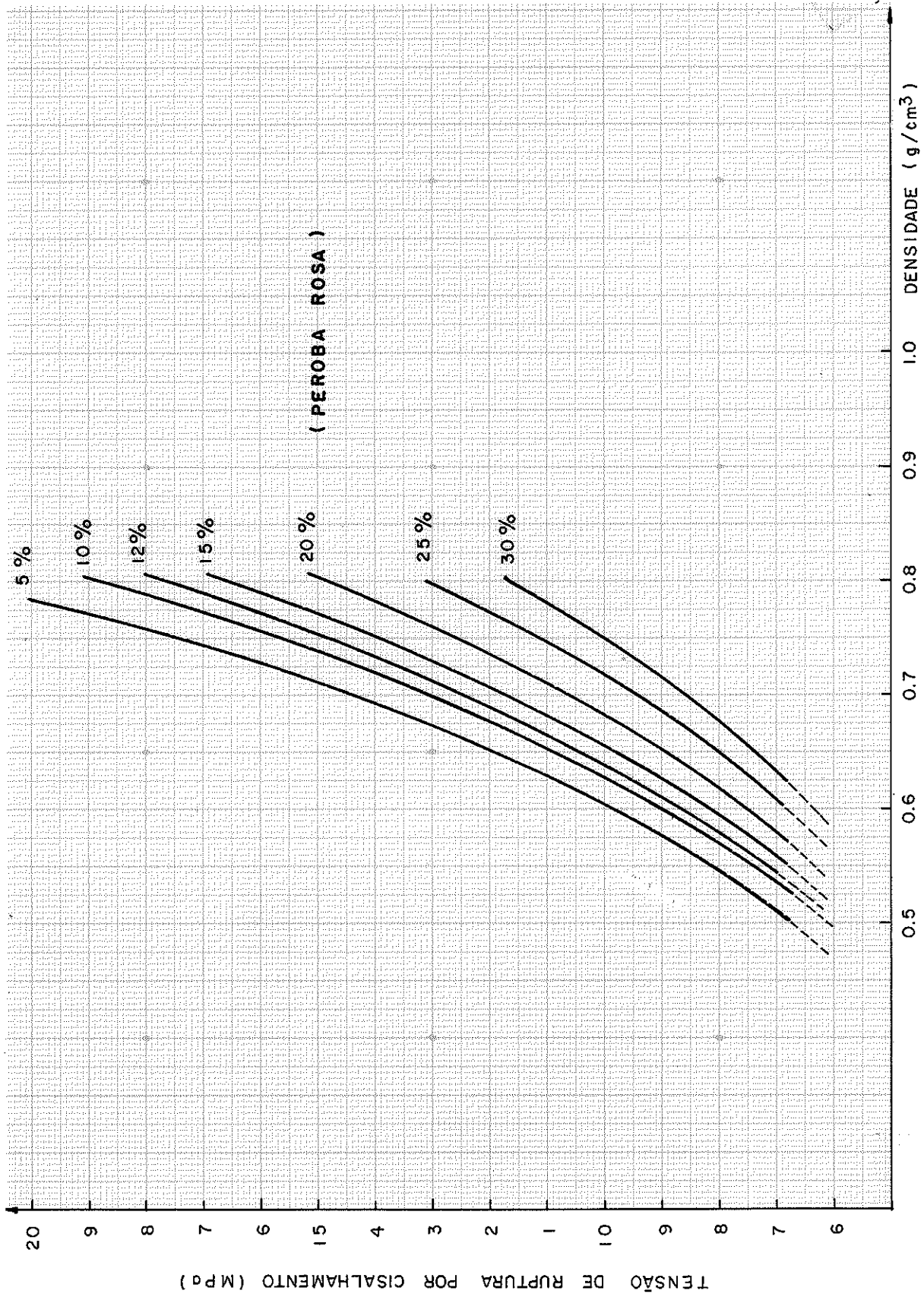


Figura 6.13 - Diagrama tensão de ruptura x Densidade

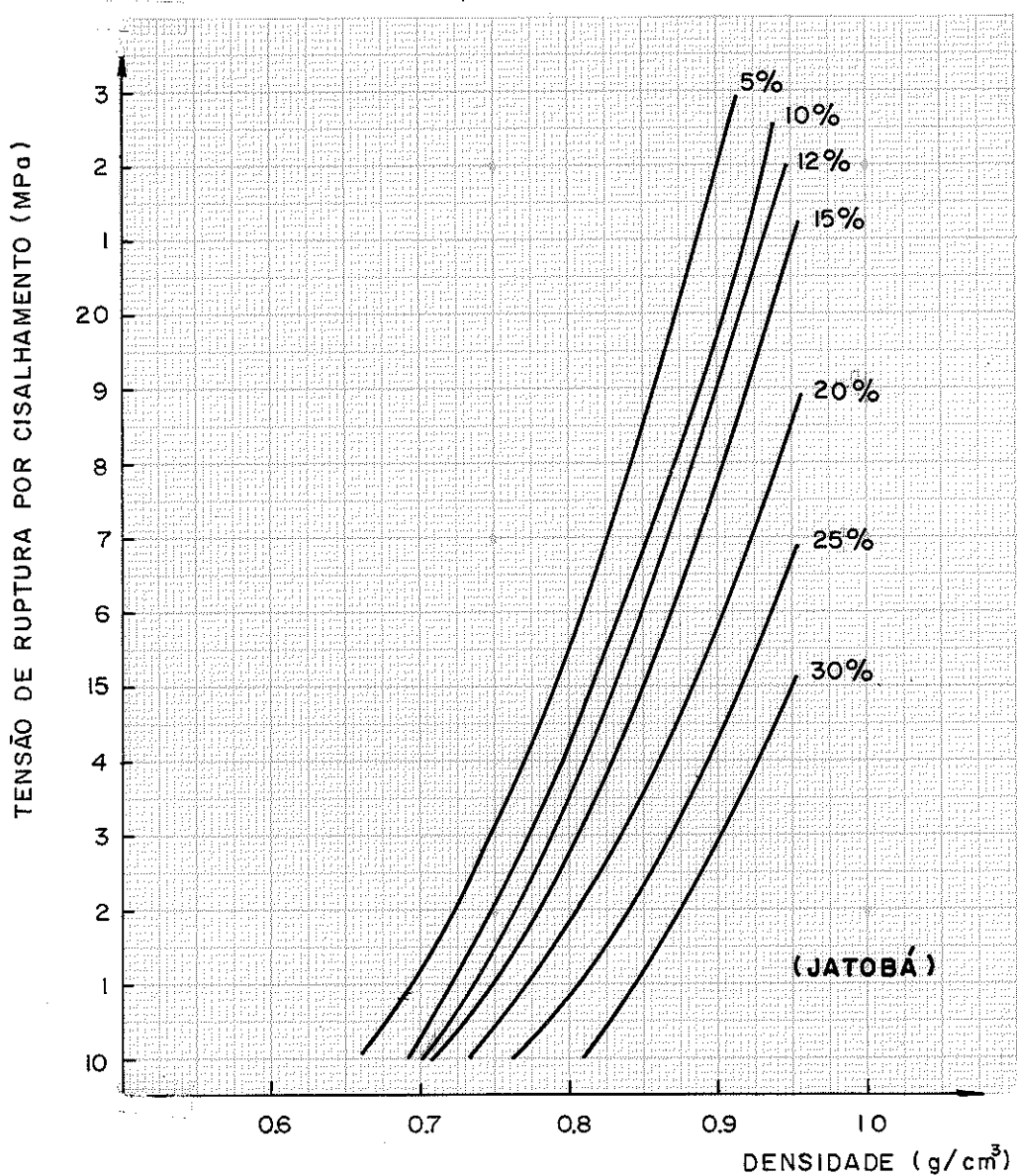


Figura 6.14 - Diagrama tensão de ruptura x densidade

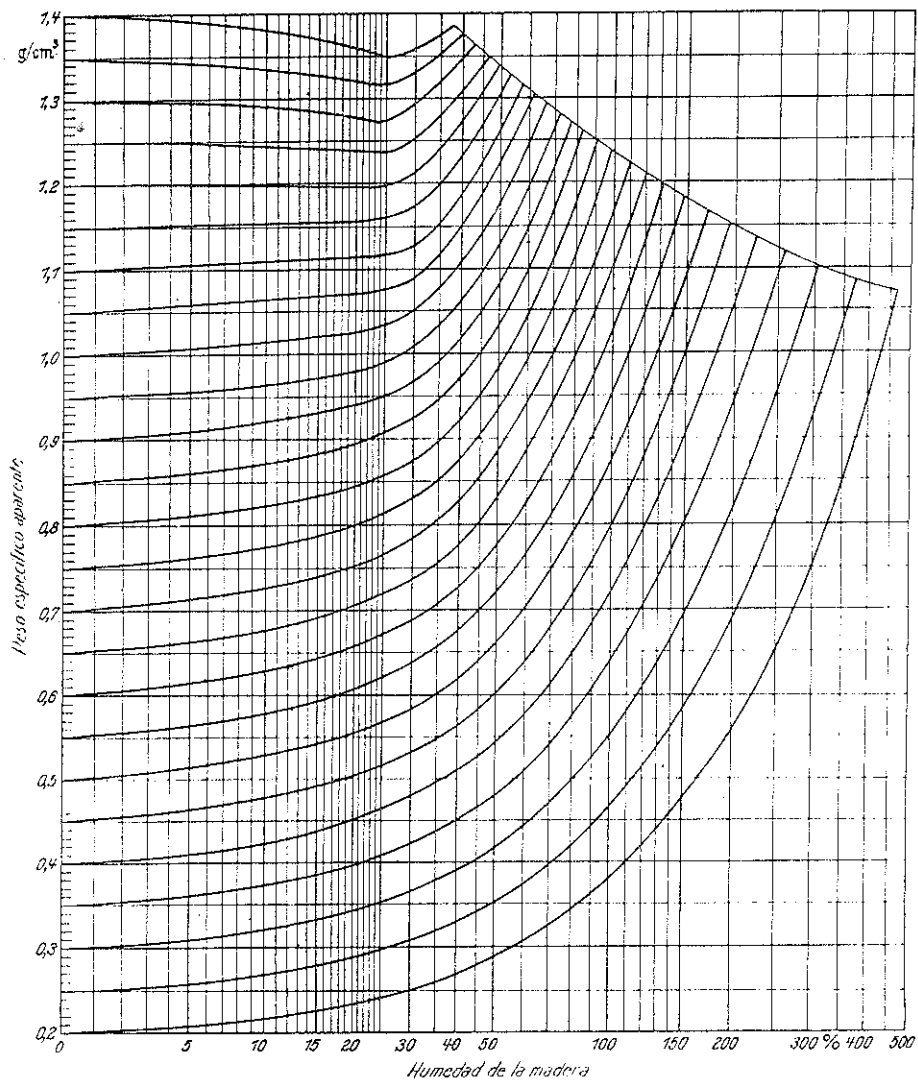


FIGURA 237. — Diagrama humedad-peso específico de la madera. (Según F. Kollmann.)

Figura 6.15 - Diagrama Teor de Umidade x Densidade Aparente da Madeira (Segundo Kollmann) (64).

(64) KOLLMANN, F. - Technologie des holzes und der holzwerkstoffe, p. 337.

6.4.3 - CORREÇÃO DA TENSÃO DE RUPTURA POR CISALHAMENTO
EM FUNÇÃO DO TEOR DE UMIDADE

Com a intenção de generalizar o procedimento anterior para a correção da tensão de ruptura por cisalhamento, testou-se a fórmula (6.5) (65) para as madeiras ensaiadas, obtendo-se um nível de 95% de confiança para utilização desta fórmula para um intervalo de 5 a 25% de umidade.

$$\tau_{12} = \tau_u + \tau_u k(U - 12) \dots\dots\dots (6.6)$$

sendo:

τ_{12} = tensão de ruptura corrigida para umidade de 12%

τ_u = tensão de ruptura numa determinada umidade

U = teor de umidade em %

k = coeficiente angular da tangente à curva $\tau = f(U)$ no ponto considerado.

A utilização da fórmula 6.5 apresenta a vantagem de corrigir diretamente a tensão de cisalhamento para umidade de 12% em função da tensão de cisalhamento e da umidade correspondente sem perder significativamente a precisão.

DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE K

Para o intervalo de 5 a 25% de umidade, a variação da tensão de cisalhamento e o teor de umidade pode ser considerado linear. Diante deste fato, realizou-se uma análise de regressão linear entre a tensão de ruptura e o teor de umidade no intervalo considerado para as espécies ensaiadas.

A análise forneceu as equações 6.7, 6.8 e 6.9 para o Pinho do Paraná, para a Peroba Rosa e para o Jatobá.

(65) LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL - Madeiras: ensaio de corte - E 78

$$\tau = 16,52 - 0,34U \dots\dots\dots (6.7)$$

$$\tau = 19,20 - 0,25U \dots\dots\dots (6.8)$$

$$\tau = 20,90 - 0,18U \dots\dots\dots (6.9)$$

Os valores dos coeficientes de correlação linear obtidos nas análises de regressão são 0,59, 0,67 e 0,56, respectivamente, podendo ser considerados com razoável significância.

O coeficiente da influência da umidade é um décimo da inclinação das retas representadas pelas equações 6.7, 6.8 e 6.9 e estão indicados na tabela 5.8.

ESPÉCIE	COEFICIENTE DA INFLUÊNCIA DA UMIDADE
Pinho do Paraná	0,035
Peroba Rosa	0,025
Jatobá	0,018

Tabela 6.8 - Valores dos Coeficientes da Influência da Umidade

APLICAÇÃO DA FÓRMULA 6.6

A equação 6.6 pode ser aplicada para corrigir a tensão de ruptura de cisalhamento no intervalo de 5 a 25% com precisão aceitável, conforme se verificou através da comparação de médias realizadas entre os resultados experimentais para umidade de 12% e os resultados obtidos pela aplicação da equação 6.6 no intervalo considerado de umidade.

6.4.4 - RELAÇÃO ENTRE A TENSÃO DE RUPTURA DA MADEIRA SECA AO AR E DA MADEIRA VERDE NOS ENSAIOS DE CISA- LHAMENTO

A correção da tensão de cisalhamento examinada no item anterior, apresenta algumas dificuldades, pois o coeficiente apresenta variação devida à espécie de madeira, além da variabilidade dentro da mesma espécie.

Para eliminar em parte esta dificuldade, realizou-se uma análise de regressão com base nos dados indicados na tabela 6.9.

Os dados da tabela 6.9 referem-se aos ensaios realizados para nove espécies de madeira, ensaiando-se madeira seca ao ar e madeira verde. As tensões de ruptura da madeira seca ao ar foram corrigidas para um teor de umidade padrão de 12%.

Com base nestes resultados, realizou-se uma análise de regressão através da subrotina MINITAB implantada no computador IBM-370 da E.E.S.C, apresentando resultados satisfatórios.

Na tabela 6.10 são apresentados resumidamente os resultados da análise de regressão.

A equação 6.7, obtida pela análise de regressão, poderá ser utilizada para corrigir a tensão de ruptura da madeira verde para a umidade padrão de 12%.

ESPÉCIE	BARRA	τ_{12} (MPa)	τ_{sat}
PEROBA ROSA	1	15,72	11,87
	2	15,66	11,35
	3	15,11	11,06
	4	14,69	11,83
PINHO DO PARANÁ	1	11,73	6,03
	2	12,70	6,20
	3	14,10	6,93
	4	11,56	6,05
JATOBÁ	1	21,42	18,50
	2	16,80	14,90
	3	19,20	15,20
EUCALIPTO CITRIODORA	X	22,01	18,62
PINHO PORTUGUÊS	X	9,54	6,84
GAREBU AMARELO	X	19,14	16,78
BICUIBA ROSA	X	21,15	13,45
JATAÍPEBA	X	19,78	15,58
MASSARANDUBA	X	19,93	15,44

Tabela 6.9 - Tensões de Ruptura para Madeira Seca ao Ar e Madeira Verde

TÍTULO: Relação entre as Tensões de Ruptura da Madeira Seca ao Ar e Madeira Verde		
ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS DA ANÁLISE	OBSERVAÇÕES/CONCLUSÕES
Modelo	$y = \beta_0 + \beta_1 x + u$	Diagrama - figura 6.9
Equação	$\tau_{12} = 6,71 + 0,804 \tau_{sat} \dots\dots (6.7)$	
Teste de Correlação	$R^2 = 0,86$	Concluiu-se como altamente significativa.
Teste t	$t_0 = 9,53$	Existe alta significância da variável x no modelo.
	Nível de Significância $\alpha = 0,05\% \quad (66)$	
Teste F	$F(1,15) = 90,78$	A regressão é altamente significativa.
	Nível de Significância $\alpha < 0,1\% \quad (67)$	
Análise de Resíduos	Os resíduos se apresentam numa faixa constante em relação à variável x. A figura 6.10 revela uma distribuição normal para os resíduos.	

Tabela 6.10 - Resultados da Análise de Regressão

(66) Box, G.E.P. et alli - op. cit. p.636

(67) Box, G.E.P. et alli - op. cit. p.631

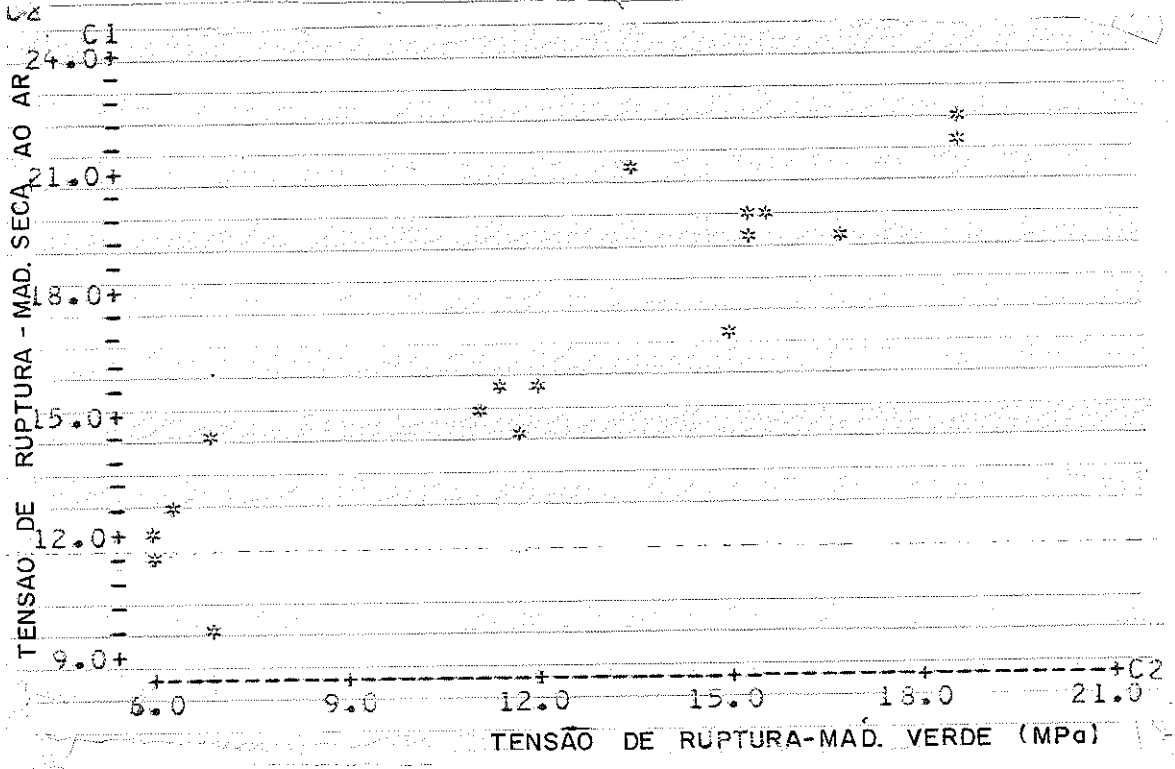


Figura 6.9 - Diagrama $\tau_{12} \times \tau_{sat}$ onde se pode ver uma tendência linear

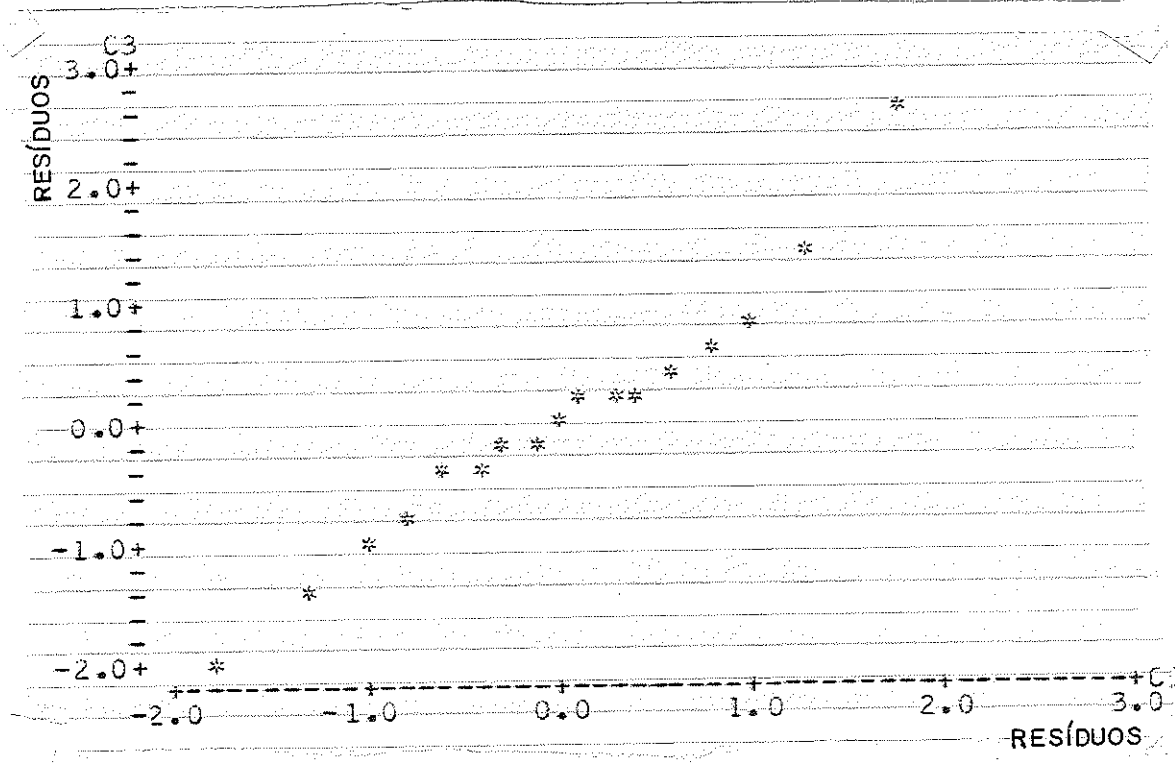


Figura 6.10 - Gráfico Probabilístico

6.5 - CONCLUSÕES

Neste capítulo apresentaram-se dois procedimentos para a correção da tensão de cisalhamento, os quais permitem uma boa aproximação.

O procedimento do item 6.4.2 permite a correção em função da umidade e da densidade aparente correspondente, para as espécies ensaiadas, para um intervalo de 5 a 30%, como indicam os gráficos das figuras 6.9 a 6.14.

A equação 6.6 pode ser utilizada para corrigir a tensão de ruptura por cisalhamento para uma umidade padrão de 12% aplicável para um intervalo de 5 a 25% de umidade. O coeficiente k da fórmula pode ser considerado aproximadamente igual a 0,02 para as dicotiledôneas, e 0,03 para as coníferas.

A correção da tensão de ruptura por cisalhamento da madeira verde para a umidade padrão pode ser feita através da equação 6.7, para qualquer espécie de madeira.

CAP 07 CISCALHAMENTO E COMPRESSÃO PARALELA

7.1 - INTRODUÇÃO

Com a intenção de estimar o valor da tensão de ruptura por cisalhamento em função da tensão de ruptura à compressão paralela da madeira verde, utilizaram-se os resultados obtidos pelo IPT para 200 (duzentas) toras de madeiras nacionais.

Os dados publicados pelo IPT (68), representam a média de 24 (vinte e quatro) corpos de prova de cisalhamento e a média de 40 (quarenta) corpos de prova de compressão paralela de madeira verde, conforme previsto no método do IPT (68) e da A.B.N.T.(69).

7.2 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados foram extraídos da tabela do IPT (68) e estão indicados na tabela 7.1.

Estão indicadas também as densidades aparentes da madeira a 15% de umidade e representam a média aritmética de 40 (quarenta), corpos de prova.

(68) INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - Madeiras nacionais. Tabelas de resultados físicos e mecânicos

(69) A.B.N.T. - Ensaio físicos e mecânicos de Madeira

MADEIRA VERDE

ORDEM	σ_c (MPa)	τ (MPa)	D_{15} (g/cm ³)
1	75,20	20,20	1,21
2	63,90	17,50	1,16
3	49,00	14,70	1,07
4	61,80	17,10	1,06
5	64,80	13,70	1,01
6	73,90	15,10	1,00
7	58,00	14,60	0,96
8	51,00	15,50	1,06
9	71,30	19,80	1,05
10	30,50	13,10	1,05
11	52,10	16,60	1,04
12	69,60	14,90	0,98
13	67,40	17,40	1,04
14	44,30	14,10	0,96
15	49,70	13,60	0,93
16	45,60	14,30	0,91
17	46,00	13,60	0,89
18	43,30	12,30	0,83
19	40,90	11,20	0,73
20	61,80	13,40	1,03
21	58,90	15,50	1,01
22	74,80	15,70	1,01
23	69,00	14,50	0,96
24	55,90	11,70	1,03
25	47,50	12,60	1,01
26	69,50	20,60	1,02
27	63,60	19,90	1,01
28	79,40	17,60	0,97
29	75,60	18,20	0,95
30	69,50	14,80	0,91
31	52,00	15,60	0,91
32	54,50	15,60	1,00
33	67,00	19,30	0,98
34	59,90	18,50	0,95
35	55,30	14,30	0,93
36	55,20	14,70	0,97
37	48,50	11,40	0,97
38	62,90	19,10	0,96
39	46,80	16,10	0,96
40	40,40	14,40	0,86
41	38,10	13,40	0,85
42	47,10	14,80	0,96
43	50,50	14,60	0,88
44	58,20	12,20	0,96
45	59,40	12,40	0,95
46	56,30	13,70	0,95
47	37,30	11,80	0,95
48	35,70	13,10	0,93
49	67,70	14,90	0,94
50	61,80	12,10	0,93

Tabela 7.1 - Resultados Extraídos, das Tabelas do Boletim nº 31 do IPT

MADEIRA VERDE

ORDEM	σ_c (MPa)	τ (MPa)	D_{15} (g/cm ³)
51	57,60	15,30	0,94
52	41,80	13,50	0,87
53	72,30	16,30	0,93
54	58,80	16,70	0,87
55	73,50	17,30	0,84
56	49,50	15,90	0,92
57	57,40	14,20	0,92
58	71,00	12,70	0,92
59	71,90	12,10	0,89
60	39,60	13,00	0,91
61	47,60	14,80	0,91
62	44,20	9,80	0,91
63	62,90	18,90	0,91
64	44,60	14,10	0,91
65	35,00	12,90	0,79
66	41,70	14,50	0,90
67	49,30	13,20	0,90
68	45,20	11,50	0,89
69	58,30	13,80	0,89
70	36,50	14,40	0,89
71	65,30	15,20	0,89
72	52,60	14,80	0,88
73	37,40	12,90	0,88
74	43,50	12,30	0,88
75	35,70	10,70	0,88
76	48,00	15,80	0,88
77	38,10	10,50	0,87
78	51,50	14,10	0,87
79	58,20	12,60	0,87
80	46,60	12,20	0,87
81	41,80	12,00	0,85
82	38,50	12,90	0,81
83	44,00	14,00	0,87
84	52,20	13,40	0,85
85	48,40	13,90	0,84
86	41,60	12,10	0,83
87	36,30	13,10	0,81
88	44,00	13,00	0,87
89	42,90	13,60	0,82
90	46,10	12,20	0,80
91	43,90	11,80	0,79
92	43,00	11,90	0,77
93	34,30	10,10	0,66
94	46,90	14,70	0,86
95	31,60	11,60	0,86
96	51,60	13,20	0,86
97	38,90	13,00	0,83
98	37,20	13,00	0,83
99	45,20	12,20	0,86
100	43,00	10,70	0,82

Tabela 7.1 - Continuação

ORDEM	σ_c (MPa)	τ (MPa)	D_{15} (g/cm ³)
101	38,80	12,00	0,70
102	35,50	10,40	0,70
103	34,60	10,00	0,70
104	46,00	13,20	0,85
105	46,80	12,10	0,85
106	34,50	11,70	0,85
107	31,70	11,50	0,83
108	42,10	12,30	0,83
109	32,70	10,40	0,84
110	43,50	13,10	0,84
111	31,10	11,30	0,84
112	37,80	11,10	0,81
113	45,40	12,60	0,83
114	38,30	11,80	0,83
115	44,10	11,80	0,83
116	47,20	13,30	0,82
117	39,20	12,90	0,82
118	37,30	13,00	0,82
119	45,10	13,00	0,82
120	33,90	10,00	0,82
121	40,60	10,60	0,81
122	45,20	12,20	0,81
123	50,30	13,00	0,81
124	37,70	9,80	0,81
125	40,80	11,30	0,80
126	37,10	10,10	0,67
127	32,00	8,80	0,65
128	52,90	10,70	0,80
129	46,20	9,80	0,76
130	43,40	11,40	0,73
131	40,50	11,40	0,73
132	36,50	11,80	0,80
133	31,20	11,10	0,80
134	33,90	11,40	0,79
135	36,40	10,10	0,79
136	32,50	10,30	0,79
137	43,00	17,70	0,78
138	38,00	8,90	0,78
139	35,00	13,80	0,78
140	39,60	11,10	0,78
141	38,20	12,20	0,78
142	36,70	10,90	0,70
143	39,80	12,60	0,77
144	46,00	10,90	0,77
145	45,40	12,70	0,77
146	45,00	10,40	0,69
147	37,10	11,80	0,76
148	27,50	9,50	0,76
149	32,60	9,80	0,75
150	-----	-----	-----

Tabela 7.1 - Continuação

ORDEM	σ_c (MPa)	τ (Mpa)	D_{15} (g/cm ³)
151	37,20	13,60	0,75
152	39,10	10,70	0,75
153	55,40	12,00	0,75
154	27,60	10,20	0,73
155	50,10	13,80	0,75
156	39,20	12,10	0,72
157	39,30	11,70	0,70
158	48,00	12,00	0,75
159	43,30	12,10	0,73
160	46,50	11,70	0,72
161	43,40	12,50	0,74
162	38,00	10,00	0,74
163	26,90	9,70	0,73
164	34,50	11,60	0,70
165	30,60	9,40	0,73
166	34,60	10,20	0,73
167	35,00	10,00	0,73
168	47,10	12,30	0,73
169	31,60	9,80	0,72
170	36,30	8,70	0,72
171	37,10	10,90	0,72
172	37,50	9,80	0,72
173	38,50	10,90	0,71
174	29,20	12,30	0,71
175	35,60	11,60	0,70
176	27,00	8,80	0,70
177	26,90	9,80	0,69
178	34,50	12,70	0,70
179	36,10	10,00	0,70
180	32,70	9,40	0,69
181	37,30	12,20	0,69
182	37,10	10,30	0,69
183	31,40	10,40	0,69
184	32,60	10,00	0,65
185	37,00	9,20	0,69
186	27,90	8,60	0,63
187	40,80	9,00	0,68
188	25,70	7,50	0,68
189	20,90	5,90	0,68
190	34,40	6,40	0,68
191	40,00	10,70	0,67
192	35,50	10,70	0,67
193	28,20	9,60	0,67
194	29,60	10,90	0,67
195	28,60	8,40	0,66
196	23,30	8,00	0,61
197	35,40	11,10	0,66
198	32,70	11,80	0,66
199	37,60	12,00	0,66
200	31,40	7,30	0,66

Tabela 7.1 -

7.3 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Com base nos resultados apresentados na tabela 7.1, realizou-se uma análise de regressão, para relacionar a tensão de ruptura por cisalhamento e a tensão de ruptura à compressão paralela às fibras, utilizando a subrotina MINITAB implantada no computador IBM-370 da Escola de Engenharia de São Carlos, obtendo-se os resultados resumidos na tabela 7.2.

TÍTULO: Relação entre as tensões de ruptura por cisalhamento e por compressão paralela - Madeira Verde		
ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS DA ANÁLISE	OBSERVAÇÕES/CONCLUSÕES
Modelo	$y = \beta_0 + \beta_1 x + u_i$	Tendo por base o gráfico da figura 7.1.
Equação:	$\tau = 5,22 + 0,16 \sigma_c \dots\dots\dots (7.1)$	Obtida por mínimos quadrados.
Teste de Correlação Linear	$R^2 = 0,59$	Pode-se concluir pela razoável significância da correlação.
Teste F	Valor fornecido pela análise $F(1,197) = 277,4$	Pode-se concluir pela alta significância da regressão.
	Nível de significância $\alpha < 0,1\% \quad (70)$	
Teste t	Valor fornecido pela Análise $t(197) = 16,65$	Pode-se concluir pela alta significância da variável x no modelo.
	Nível de significância $\alpha < 0,05\% \quad (71)$	
Teste de Durbin-Watson	1,73	Nível satisfatório para a realização da Análise de resíduos.
Análise de Resíduos	Fig.7.2 Resíduos x V. Ajustados	Os gráficos dos resíduos não revelam problemas com o modelo adotado.
	Fig.7.3 Resíduos x Variável x	
	Fig.7.4 Gráfico Probabilístico	Pode-se considerar a distribuição normal dos resíduos.

Tabela 7.2 - Resumo dos Resultados da Análise de Regressão

(70) Box, G.E.P. - et alli, op. cit p.636

(71) Box, G.E.P., et alli, op. cit p.631

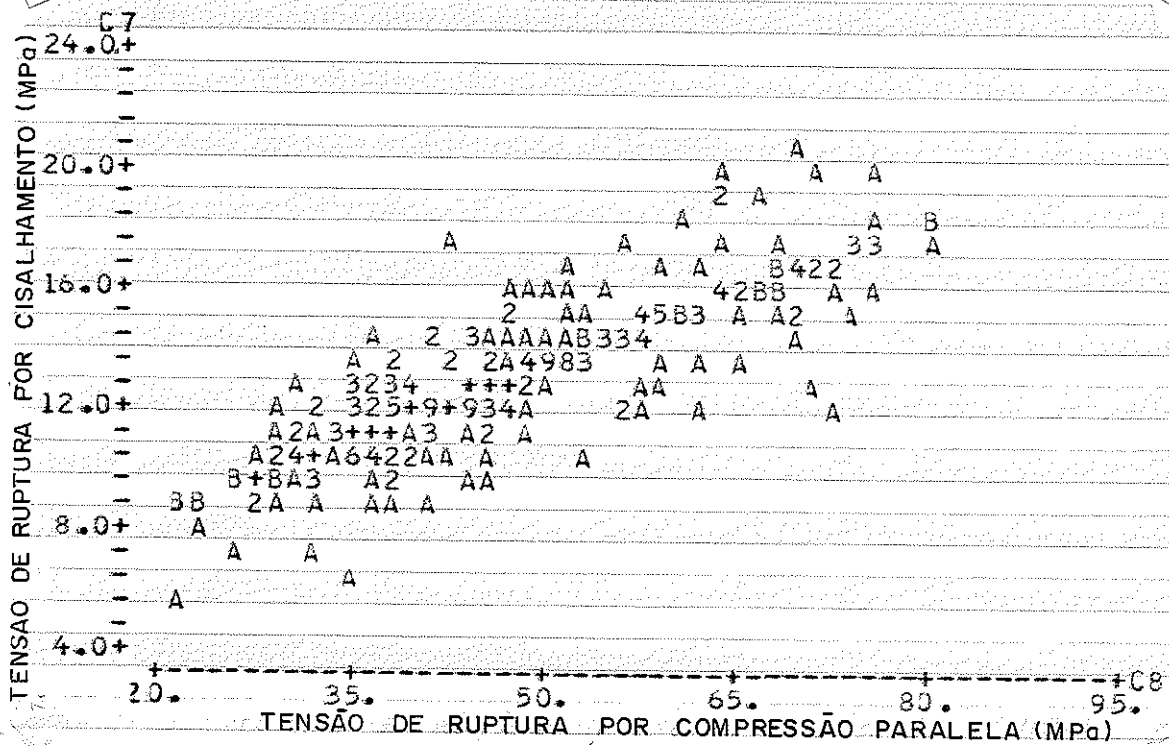


Figura 7.1 - Tensão de Ruptura por Cisalhamento x Tensão de Ruptura por Compressão Paralela - Madeira Verde

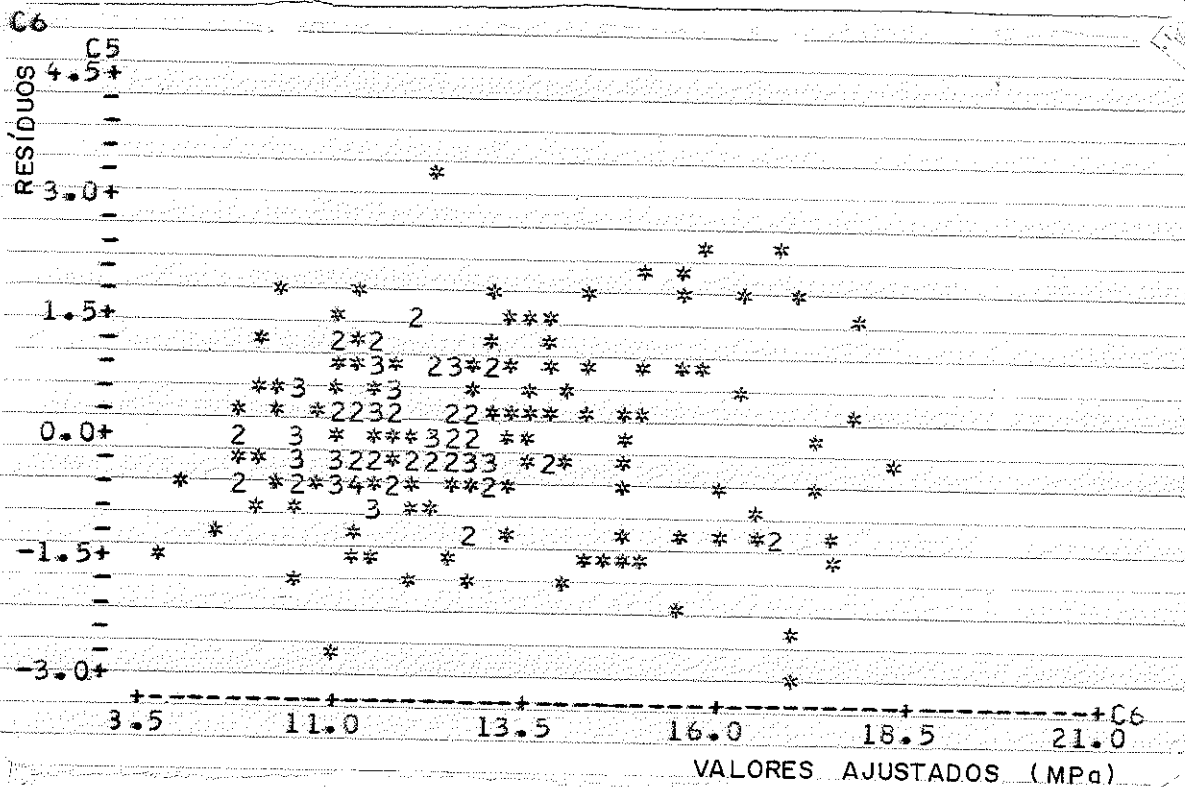


Figura 7.2 - Resíduos x Valores Ajustados

7.4 - CONCLUSÃO

Como se pode observar pela análise de regressão, a relação entre as tensões de ruptura por cisalhamento e por compressão paralela às fibras da madeira verde é linear.

Os resultados apresentados na tabela 7.1 podem ser representados satisfatoriamente pela equação 7.1 isto é, a partir da tensão de ruptura à compressão paralela pode-se estimar a tensão de cisalhamento, para qualquer espécie de madeira.

CAP 08 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CARREGAMENTO NO ENSAIO DE CISALHAMENTO

8.1 - INTRODUÇÃO

Com a finalidade de conhecer a variação da resistência da madeira ao cisalhamento em função da velocidade de carregamento e de contribuir para a revisão dos Métodos de Ensaio para o Estudo de Madeiras Nacionais da ABNT (MB-26) com respeito à velocidade de carregamento, realizou-se uma série de ensaios com variação do tempo de ensaio.

Para ter a influência da espécie de madeira, os ensaios foram feitos utilizando-se corpos de prova de Peroba Rosa e de Pinho do Paraná.

8.2 - METODOLOGIA DE ENSAIO

Foram cortados dez corpos de prova, previstos no MB -26, de barras de madeira escolhidas de maneira a assegurar homogeneidade da madeira em cada barra, para a variação da velocidade de carregamento vir a ser a única diferença entre os ensaios dos corpos de prova de uma única barra. Com esta mesma finalidade, as resistências dos corpos de prova foram corrigidas para a umidade padrão de 12%.

Os corpos de prova foram ensaiados na máquina Universal Amsler do LaMEM, cronometrando-se o tempo de ensaio de maneira a se obter um acréscimo constante de carga até a ruptura.

8.3 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos nos ensaios estão indicados nas tabelas 8.1, para o Pinho do Paraná, e 8.2, para a Peroba Rosa.

PINHO DO PARANÁ - 12%				
BARRA Nº	CORPO DE PROVA	TENSÃO DE RUPTURA (MPa)	TEMPO DE ENSAIO (Minuto)	VELOCIDADE (MPa/Minuto)
1	1	9,55	4,23	2,25
	2	10,69	5,38	1,99
	3	13,01	2,17	5,99
	4	12,21	2,00	6,11
	5	9,66	11,67	0,83
	6	12,05	21,50	0,56
	7	11,52	2,00	5,76
	8	10,51	0,92	11,42
	9	13,69	0,68	20,22
	10	11,71	0,85	13,66
2	1	15,45	30,00	0,51
	2	15,02	20,00	0,75
	3	15,18	12,50	1,21
	4	16,06	8,00	2,00
	5	15,89	6,00	2,65
	6	16,23	5,00	3,25
	7	16,41	5,00	3,28
	8	17,19	3,58	5,21
	9	16,57	3,30	6,63
	10	15,77	2,50	10,51

Tabela 8.1 - Velocidade de Carregamento - Pinho do Paraná

PEROBA ROSA - (12%)				
BARRA Nº	CORPO DE PROVA Nº	TENSÃO DE RUPTURA (MPa)	TEMPO DO ENSAIO EM (Minuto)	VELOCIDADE (MPa/Minuto)
1	1	15,22	18,56	0,82
	2	14,99	6,80	2,20
	3	14,27	3,93	3,63
	4	16,01	5,83	2,75
	5	15,68	3,32	4,72
	6	15,35	3,27	4,69
	7	15,69	4,75	3,30
	8	16,25	3,22	5,05
	9	15,76	1,46	10,76
	10	15,69	2,15	7,29
2	1	15,13	7,11	2,11
	2	16,45	4,75	3,46
	3	16,80	3,83	4,39
	4	15,60	4,00	3,90
	5	15,20	2,33	6,52
	6	15,50	1,83	8,47
	7	16,58	1,83	9,06
	8	15,88	4,75	3,35
	9	16,12	2,72	5,93
	10	15,57	1,50	10,38

Tabela 8.2 - Velocidade de Carregamento - Peroba Rosa

8.4 - ANÁLISE DE RESULTADOS

Com base nos resultados apresentados nas tabelas 8.1 e 8.2, realizou-se uma análise de regressão linear e obtiveram-se as equações 8.1 e 8.2, para Pinho do Paraná, e 8.3 para a Peroba Rosa.

$$\tau = 10,48 + 0,14 v \dots\dots\dots (8.1)$$

$$\tau = 15,64 + 0,12 v \dots\dots\dots (8.2)$$

$$\tau = 15,36 + 0,07 v \dots\dots\dots (8.3)$$

Os coeficientes de correlação linear apresentados pela análise de regressão foram 0,49 e 0,79, para as barras 1 (um) e 2 (dois) de Pinho do Paraná, respectivamente, e 0,57 para a Peroba Rosa, podendo serem considerados como aceitáveis.

A análise de resíduos realizada não revela nenhum problema com o modelo adotado, como indicam as figuras 8.1 e 8.2, relativas à Peroba Rosa.

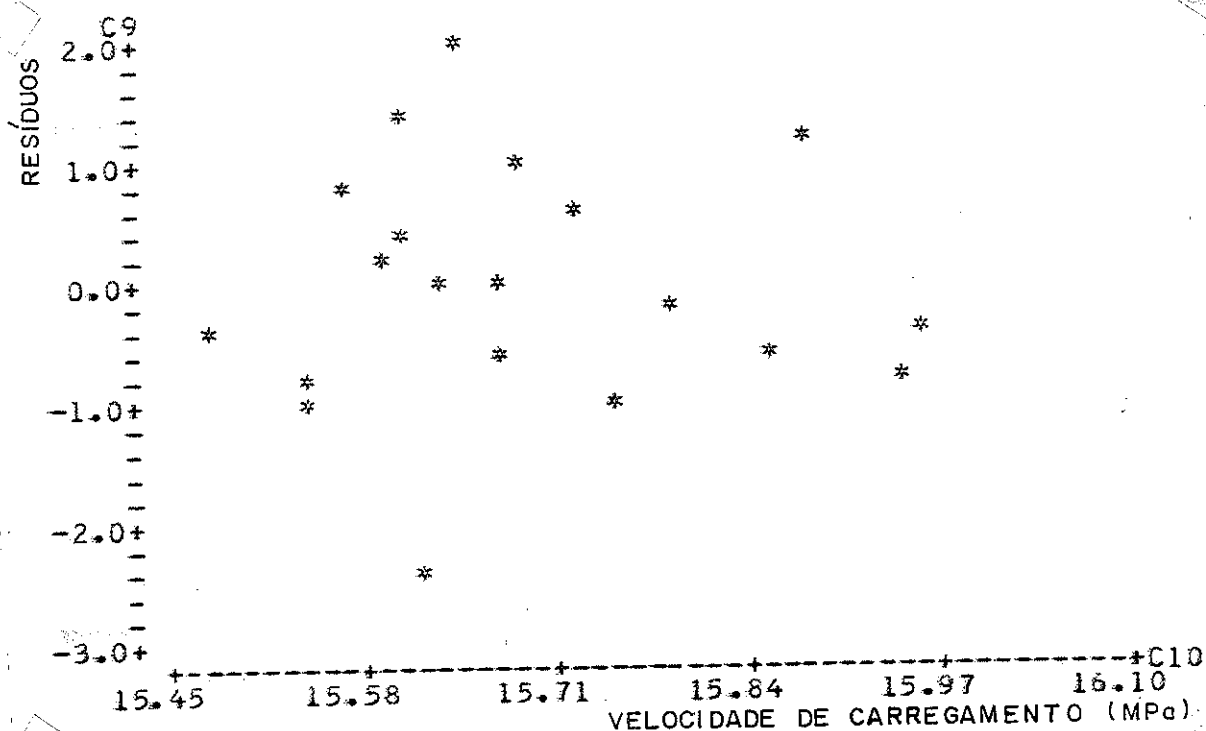


Figura 8.1 - Resíduos x Variável x

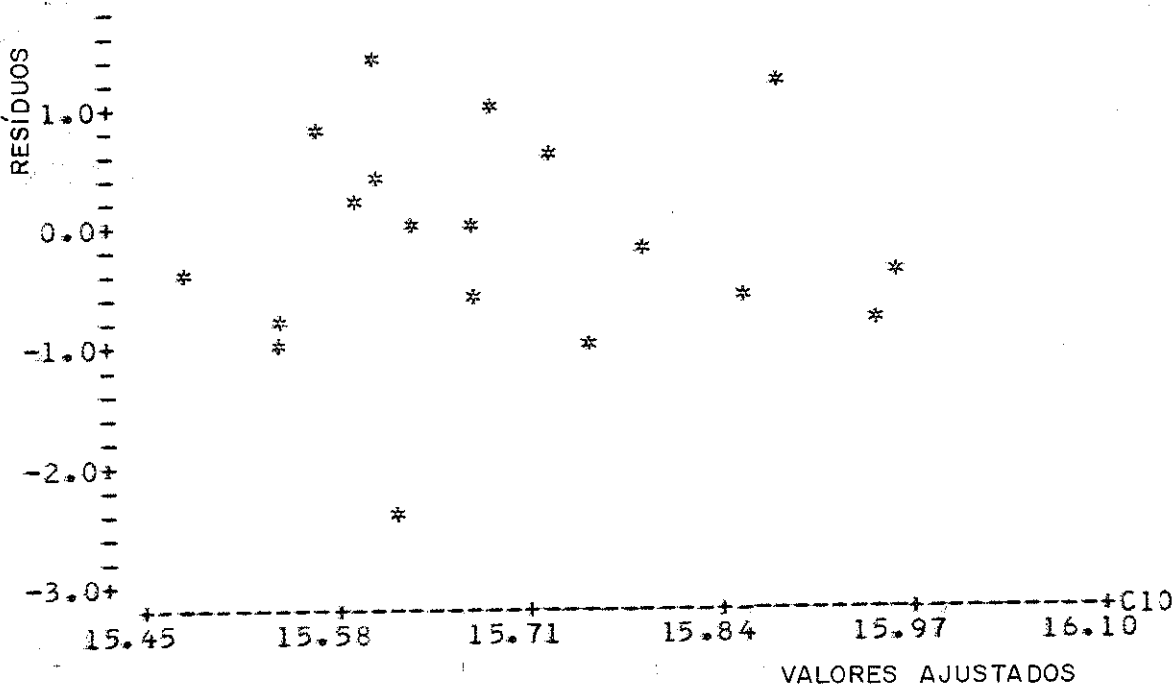


Figura 8.2 - Resíduos x Valores Ajustados

O gráfico probabilístico da figura 8.3 se aproxima de uma reta inclinada de 45° podendo-se considerar uma distribuição normal para os resíduos.

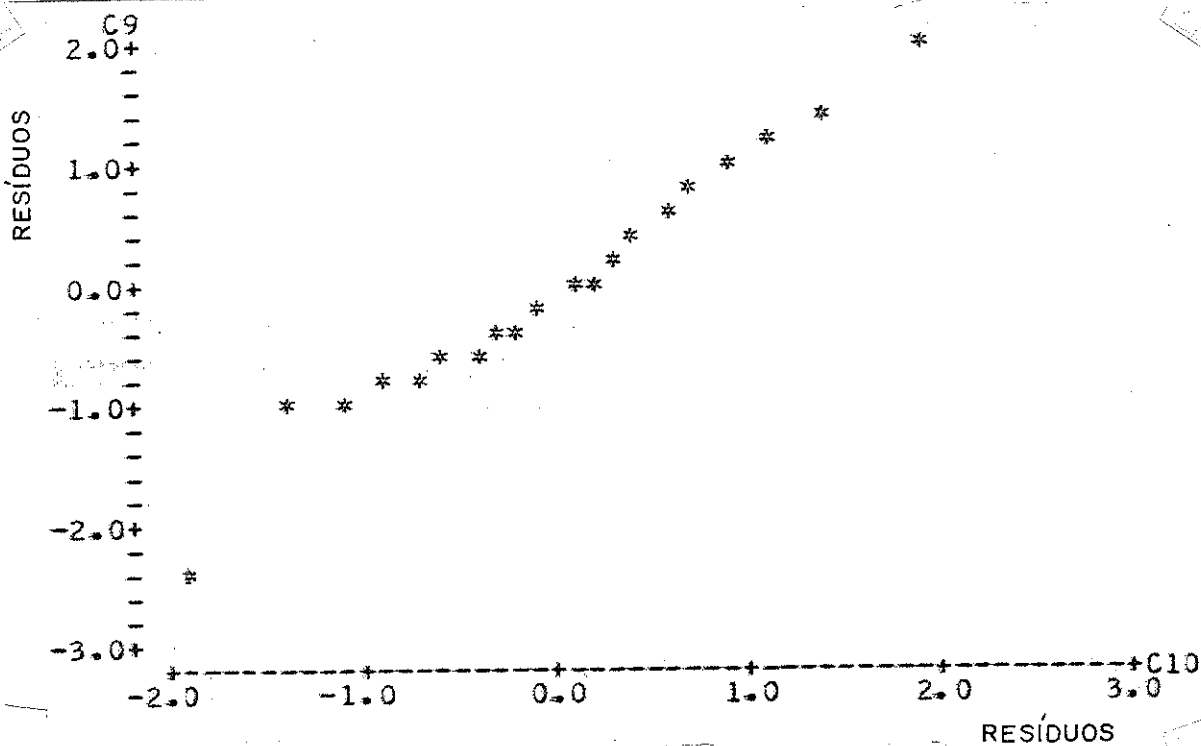


Figura 8.3 - Gráfico Probabilístico - Peroba Rosa

Os diagramas das figuras 8.4 e 8.5 representam graficamente as equações 8.1, 8.2 e 8.3 obtidas pela análise de regressão.

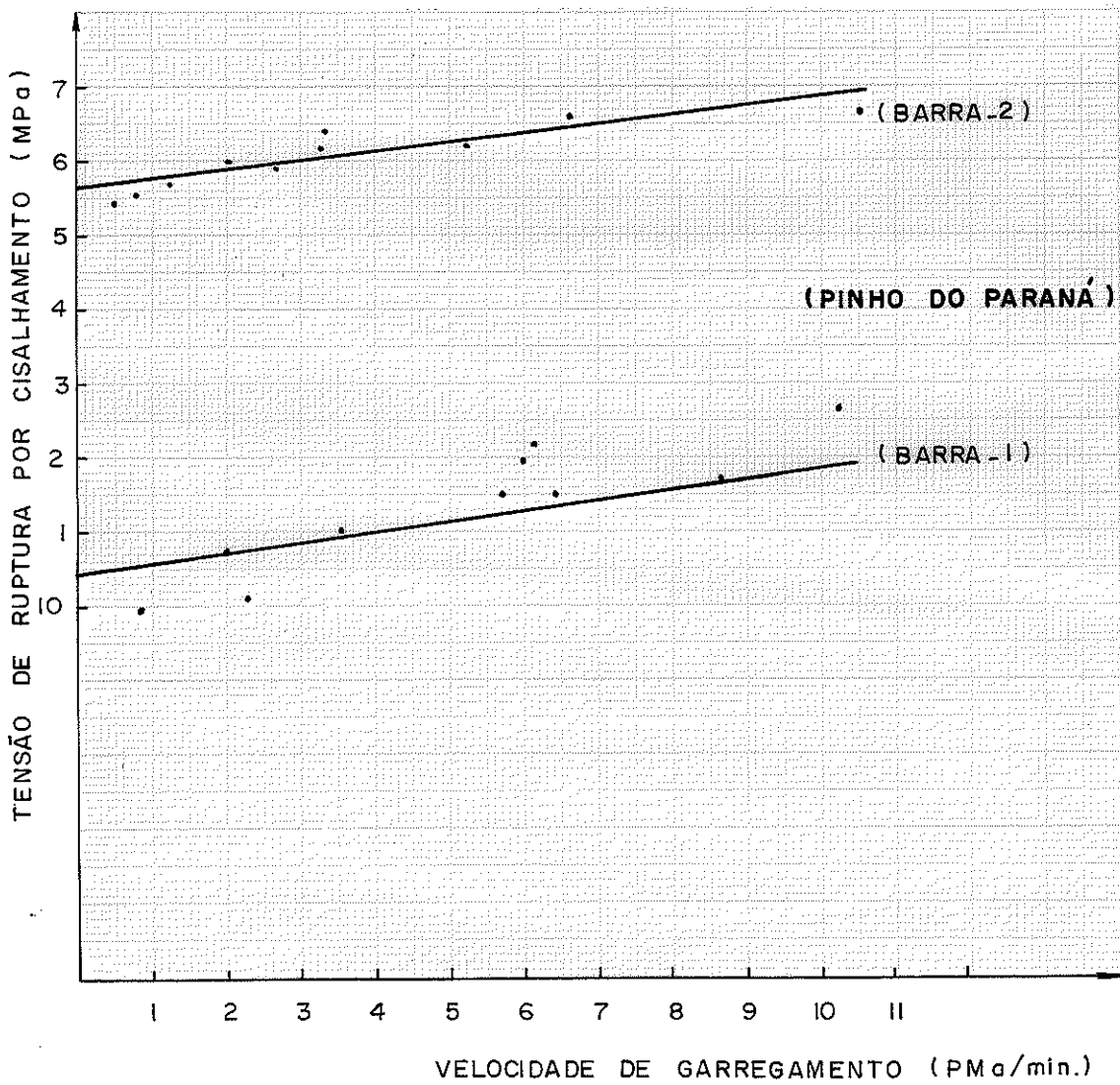


Figura 8.4 - Tensão de Cisalhamento x Velocidade de Carregamento - Pinho do Paraná

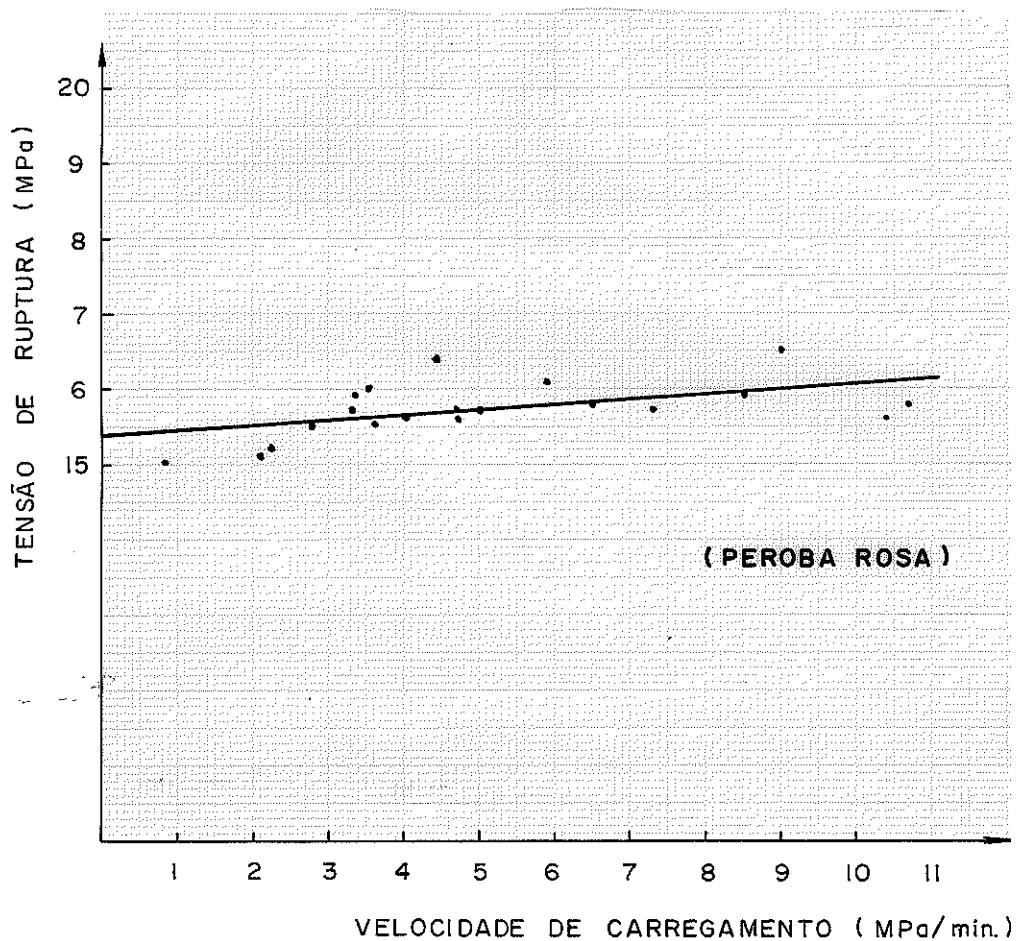


Figura 8.5 - Tensão de Cisalhamento x Velocidade de Carregamento - Peroba Rosa

8.5 - CONCLUSÃO

Através da experimentação realizada neste capítulo, verifica-se a existência de uma pequena influência da velocidade de carregamento no ensaio de cisalhamento prescrito pelo MB-26.

O número de ensaios realizados foi pequeno, contudo pode-se observar uma influência maior no Pinho do Paraná como se pode observar nos diagramas das figuras 8.4 e 8.5.

CAP 09 TENSÃO CARACTERÍSTICA DE CISALHAMENTO DA MADEIRA

9.1 - INTRODUÇÃO

O dimensionamento das estruturas de madeira é feito pelo método das tensões admissíveis, o qual fixa as tensões admissíveis através da tensão de ruptura média dos ensaios, utilizando elevados coeficientes de redução sem considerar nesses coeficientes os fatores favoráveis ou não de variabilidade da madeira.

Na atualidade vem sendo considerada esta variabilidade, adotando-se um limite inferior de resistência, determinado com base experimental e estatística.

9.1.1 - MÉTODO DAS TENSÕES ADMISSÍVEIS

O método das tensões admissíveis não dá ao projetista o nível de segurança da estrutura, isto é, ele não apresenta meios para estimar a segurança da estrutura. Esta dificuldade torna-se mais crítica quando se considera a variabilidade das características da madeira.

As tensões médias de cisalhamento ($\bar{\tau}$), principalmente considerando-se cargas estruturais, causam a impressão falsa de elevada segurança.

A madeira é escolhida para utilização estrutural considerando-se a tensão média ($\bar{\tau}_d$) provocada pelas cargas estruturais, de maneira a se ter:

$$\bar{\tau}_d \leq \tau_{adm} \text{ , figura 9.1}$$

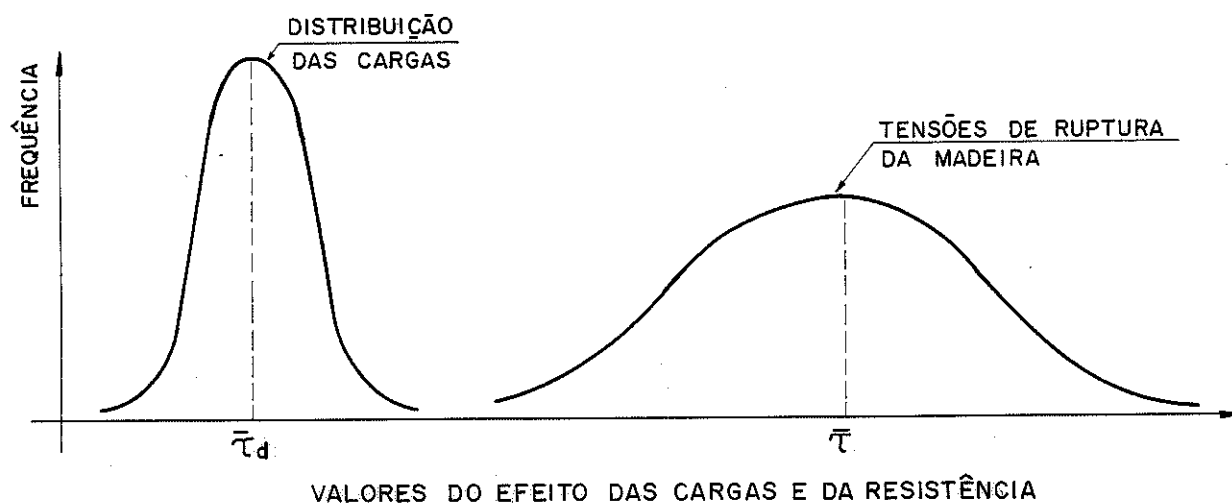


Figura 9.1 - Processo Determinístico no Cálculo das Tensões

A tensão $\bar{\tau}$ é a média aritmética das tensões de ruptura nos ensaios padronizados de cisalhamento.

O intervalo $\bar{\tau}_d - \tau_{adm}$ não tem significado estatístico e não confere ao coeficiente de redução da tensão média indicado pela NB-11 qualquer significado.

$$\tau_{adm} = 0,10 \bar{\tau} \text{ (cisalhamento na flexão)}$$

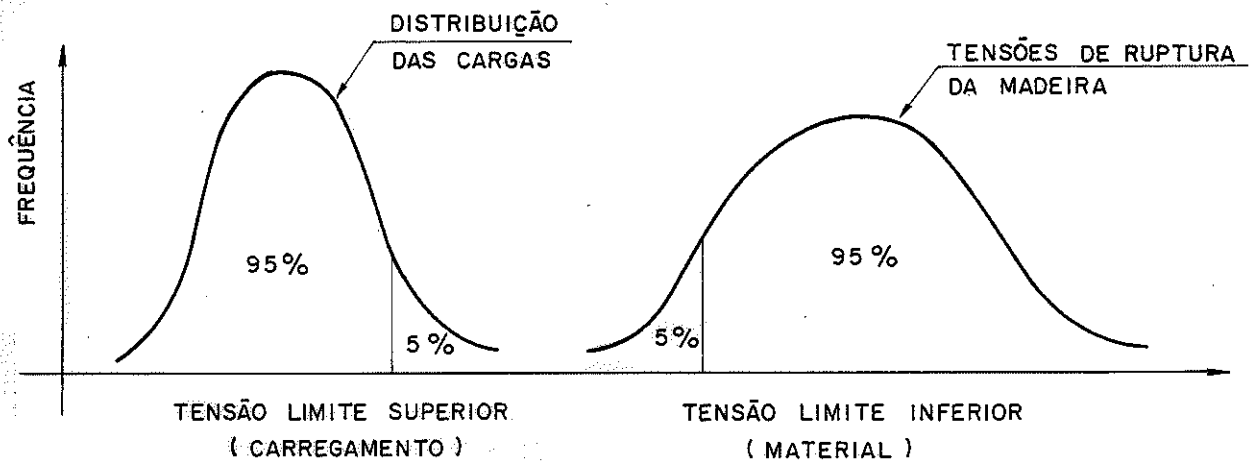
$$\tau_{adm} = 0,15 \bar{\tau} \text{ (cisalhamento nas ligações)}$$

9.1.2 - MÉTODO DOS ESTADOS LIMITES

O método dos Estados Limites consiste na determinação probabilística das cargas, levando em conta uma tensão limite superior, com 95% de probabilidade de que ela não será ultrapassada.

Quanto às tensões na madeira, define-se a tensão limite inferior, com 95% de probabilidade, designada como tensão característica.

O intervalo TLS - TLI é estimado com validade estatística, figura 9.2.



VALORES DO EFEITO DAS CARGAS E DA RESISTÊNCIA DA MADEIRA

Figura 9.2 - Processo Estatístico na Verificação das Tensões no Projeto Estrutural.

9.1.3 - TENSÃO LIMITE INFERIOR - TENSÃO CARACTERÍSTICA

A tensão limite inferior é definida estatisticamente como:

$$f_{wvk} = \overline{f_{wv}} - 1,645 \sigma_w \quad (72) \dots \dots \dots (9.1)$$

sendo:

$\overline{f_{wv}}$ = o valor médio da tensão de ruptura

σ_w = desvio padrão da amostra, considerada como pertencente a uma população de distribuição normal.

A tensão limite inferior é designada como tensão característica.

(72) A.B.N.T. - Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado.

9.2 - DETERMINAÇÃO DA TENSÃO CARACTERÍSTICA DE CISA-
LHAMENTO

Para a determinação da tensão característica de cisalhamento da Peroba Rosa, foram realizados os ensaios padronizados pelo MB-26, em corpos de prova retirados de aproximadamente 50 barras, obtidas ocasionalmente, isto é, em épocas e serrarias diferentes, para garantir a obtenção de amostra aleatorizada.

A madeira foi ensaiada na condição de seca ao ar, com de terminação do teor de umidade, e a tensão de ruptura foi corrigida para a umidade padrão de 12%, utilizando a expressão 6.5.

Os corpos de prova foram protegidos contra o ataque de fungos e insetos, e a ação direta dos raios solares.

9.2.1 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados dos ensaios estão indicados na tabela 9.1 , com as tensões de ruptura corrigidas para um teor de umidade de 12%.

TENSÃO CARACTERÍSTICA - PEROBA ROSA - 12%								
BARRA	τ (MPa)		BÁRRA	τ (MPa)		BARRA	τ (MPa)	
1	14,92		7	14,05	10	17,53		
	11,23			14,56		11	16,45	
2	16,42			16,98		12	17,63	
	17,06			13,67			11,56	
3	15,36			8			15,32	17,16
	18,45						15,29	15,82
15,38	14,86		13		13,91			
13,51	15,05			16,64				
5	16,67			9	13,87	15,69		
	13,44				16,40	14,85		
6	13,46		14,05					
	10,66		13,90					

Tabela 9.1 - Tensões de Ruptura por Cisalhamento da Peroba Rosa

BARRA	τ (MPa)
14	14,40
	14,69
	14,86
	15,50
15	17,32
	14,62
	14,04
	13,83
16	14,01
	13,84
	17,00
	17,97
17	17,02
	14,49
	13,04
	12,14
18	11,82
	9,70
	11,29
	10,80
19	14,89
	12,43
	15,62
	14,64
20	15,69
	13,90
	13,12
	13,02
21	12,33
	13,70
	15,33
	16,45
22	14,73
	16,05
	14,50
	12,08

BARRA	τ (MPa)
23	12,05
	15,02
	12,40
	14,27
24	15,13
	16,85
25	18,12
	13,03
	15,80
	16,43
26	17,80
	18,56
27	17,79
	10,84
	18,22
	14,13
28	13,37
	16,23
	11,88
29	14,56
	13,24
	14,86
	14,27
30	16,26
	15,76
	17,61
	17,45
31	11,82
	14,22
	17,86
32	16,27
	14,17
	12,51
33	12,67
	13,70
	13,54

BARRA	τ (MPa)
34	13,80
	13,13
	13,51
	12,24
35	16,62
	11,82
	12,92
	12,26
36	10,72
	10,85
	12,80
	14,64
37	12,65
	13,71
	14,47
38	13,09
	13,02
	11,46
	12,49
39	14,21
	12,17
	13,95
	14,32
40	15,26
	17,29
	16,30
	16,42
41	16,03
	14,98
Tabela 9.1 Conti- nuação.	

9.2.2 - ANÁLISE DE RESULTADOS

- DISTRIBUIÇÃO POR FREQUÊNCIA

Os dados foram analisados utilizando a subrotina MINITAB, implantada no computador IBM-370 da Escola de Engenharia de São Carlos, no sentido de verificar se a distribuição de frequência pode ser considerada como normal.

- HISTOGRAMA:

O histograma da distribuição de frequência apresentada pela subrotina MINITAB está indicado na figura 9.2 e apresenta relativa simetria e tendência central, características de distribuição normal.

STEM	LEAF	=
18	6	1
18	0124	4
17	566889	5
17	00001334	8
16	6678	4
16	00233344444	12
15	55677888	8
15	000133344	9
14	5556666677899999	16
14	000012223334	12
13	555777788899999	15
13	00001112344	11
12	556789	6
12	0112233344	10
11	568899	6
11	23	2
10	77888	5
10		
9	7	1

Figura 9.2 - Histograma da Distribuição de Frequência

- GRÁFICO PROBABILÍSTICO

O gráfico probabilístico fornecido pelo computador está re-
presentado na figura 9.3 e indica, pela sua linearidade, tratar -se
de uma distribuição normal.

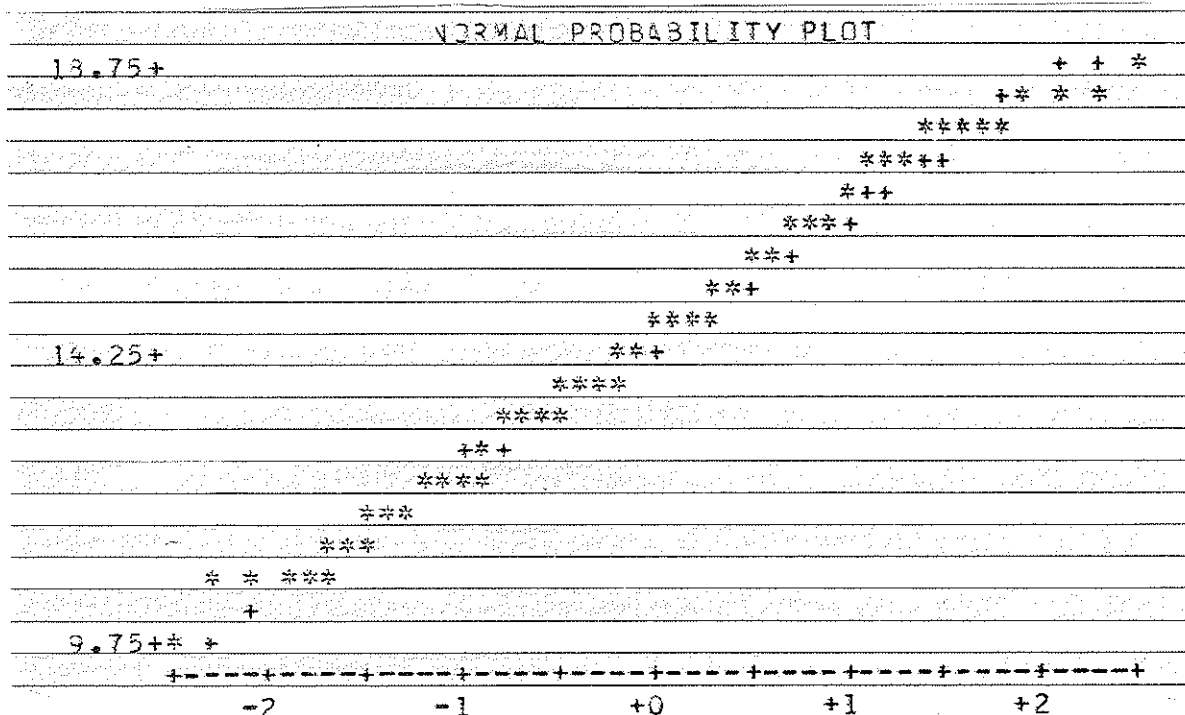


Figura 9.3 - Gráfico Probabilístico - Distribuição Normal

COEFICIENTES DE SIMETRIA

O coeficiente de simetria apresentado pelo programa é k =
0,01635 o qual está próximo de zero, indicando-se tratar de uma
distribuição simétrica, como deve ser a distribuição normal.

MÉDIA DA AMOSTRA

A média aritmética da amostra foi determinada pela expres-
são 9.2 e será indicada por $\bar{\tau}$

$$\bar{\tau} = \frac{\sum \tau_i}{n} \dots\dots\dots (9.2)$$

Utilizando-se dos dados da tabela 9.1, tem-se:

$$\bar{\tau} = 14,51 \text{ MPa}$$

DESVIO PADRÃO DA AMOSTRA

O desvio padrão é dado pela expressão 9.3 e será designado por s.

$$s = \sqrt{\frac{\sum (\tau_i - \bar{\tau})^2}{n - 1}} \dots\dots\dots (9.3)$$

sendo:

τ_i = os resultados individuais dos corpos de prova.

Com base nos resultados dos ensaios, tem-se:

$$s = 1,98 \text{ MPa}$$

- INTERVALO DE CONFIANÇA DA MÉDIA

Considerando que a distribuição de frequência é normal, o intervalo de confiança da média é dado pela expressão 9.4.

$$u_x - t_{(05)} \frac{s_x}{\sqrt{n}} \leq \bar{x} \leq u_x + t_{(05)} \cdot \frac{s_x}{\sqrt{n}} \dots\dots\dots (9.4)$$

No caso dos resultados apresentados na tabela 9.1, tem-se:

$$14,23 \leq \bar{\tau} \leq 14,80$$

- INTERVALO DE CONFIANÇA DO DESVIO PADRÃO

O intervalo no qual deverá estar contido o desvio padrão da população para a distribuição normal é dado pela expressão 9.5.

$$s_x - \frac{1,96}{\sqrt{2(n-1)}} \leq \sigma_x \leq s_x + \frac{1,96}{\sqrt{2(n-1)}} \dots\dots\dots (9.5)$$

Para o caso dos resultados da tabela 9.1, tem-se:

$$1,86 \leq \sigma_x \leq 2,1$$

- TENSÃO CARACTERÍSTICA DE CISALHAMENTO

A tensão característica de cisalhamento da madeira é representada por f_{wk} , tendo por base as iniciais das palavras em inglês, de acordo com a nova norma brasileira de símbolos gráficos (72) e será definida como sendo a tensão de ruptura por cisalhamento correspondente a um quantil de 5%, para uma umidade padrão de 12%.

A distribuição de frequência das tensões de ruptura pode ser considerada normal, conforme os testes apresentados no item 9.4.1.

Portanto a tensão característica pode ser determinada pela expressão 9.1.

Conforme os dados apresentados na tabela 9.1 para a peroba rosa, tem-se:

$$f_{wk} = 10,92 \text{ MPa}$$

9.3 - CONCLUSÃO

A distribuição normal se adapta, com razoável precisão, às tensões de ruptura por cisalhamento e, com isto, a tensão característica pode ser determinada através da expressão 9.1.

Todavia, a experimentação aqui apresentada teve por finalidade introduzir a idéia das tensões características para o cisalhamento da madeira.

(72) - A.B.N.T. - Símbolos Gráficos para Projetos de Estruturas

CAP 10 MODELOS PARA ENSAIOS DE CISALHAMENTO

10.1 - INTRODUÇÃO

Vários pesquisadores têm-se preocupado com o efeito da flexão verificada nos ensaios de cisalhamento em pequenos corpos de prova, devida à excentricidade do carregamento.

Karlsen (73), em 1967, apresentou a influência da relação do comprimento da seção cisalhada pela excentricidade do carregamento, em alguns modelos de ensaio. Verificou a influência desta relação na tensão de ruptura por cisalhamento, figuras 10.1 e 10.2, mas não determinou uma expressão analítica desta relação.

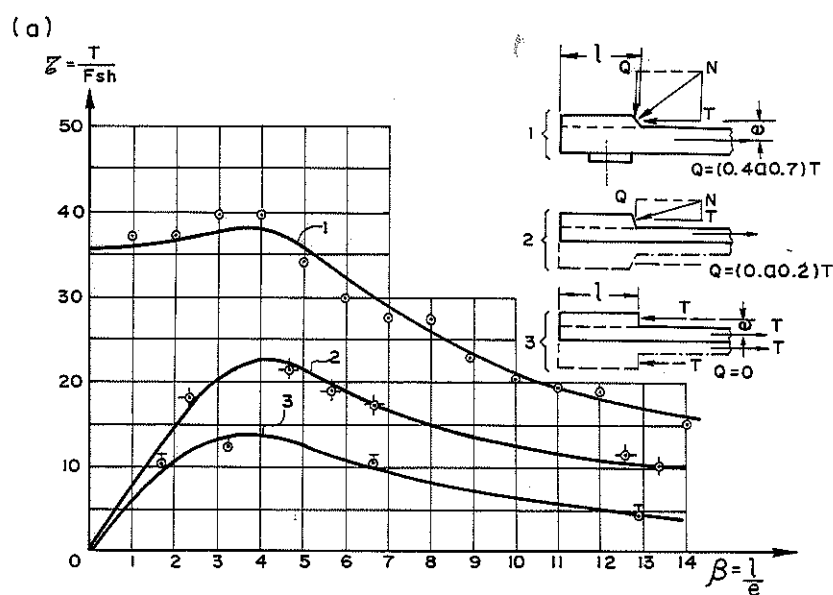


Figura 10.1 - Relação entre a Tensão de Ruptura por Cisalhamento e a Relação l/e

(73) KARLSEN, G.G. - Wooden structures, p.35

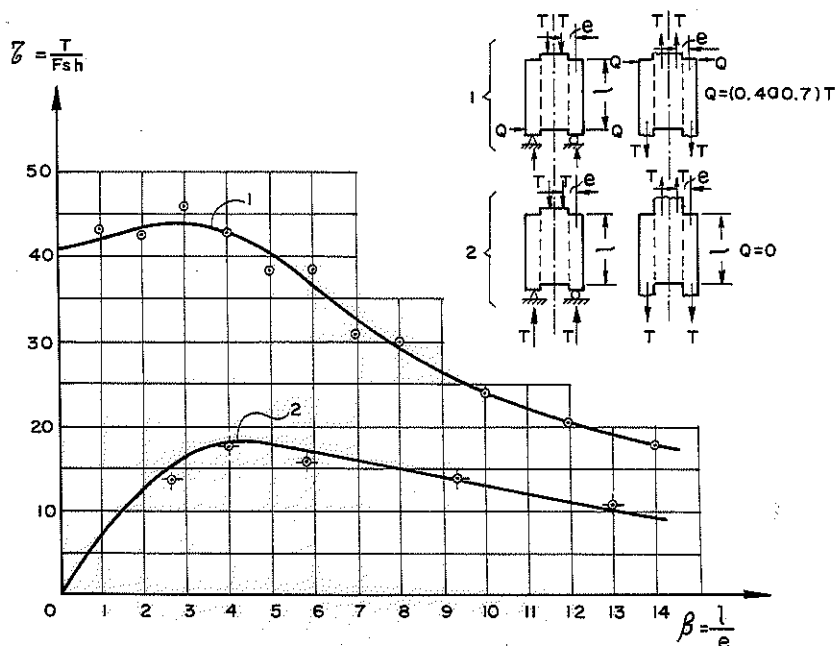


Figura 10.2 - Relação entre a Tensão de Ruptura por Cisalhamento e a relação l/e

Norris (74), em 1957, realizou uma comparação entre as tensões de ruptura por cisalhamento obtidas através de corpos de prova da ASTM e de corpos de prova em forma de painel, figura 10.3a e 10.3b.

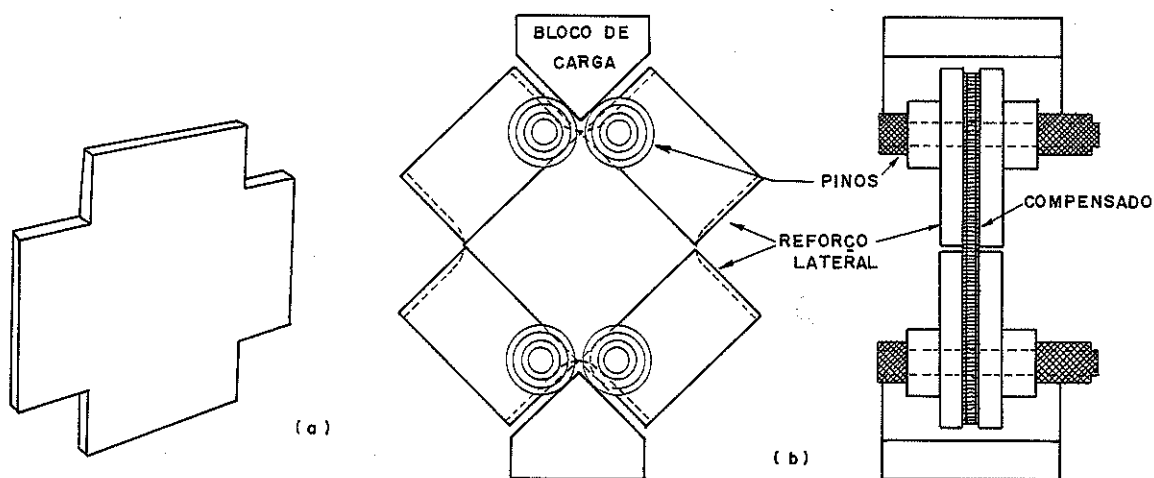


Figura 10.3 - a) Corpo de Prova em Forma de Painel
b) Corpo de Prova Instalado para Ensaio

(74) NORRIS, C. B. - Comparison of standard block shear test with the panel - shear. p.299 -301.

Norris encontrou equivalência entre os resultados obtidos através dos dois modelos de ensaio. A ASTM adotou o modelo em painel para o ensaio de madeira compensada (75).

A distribuição das tensões de cisalhamento é constante na fase plástica do ensaio de corpos de prova na forma de bloco.

É objetivo do presente capítulo um estudo comparativo entre alguns modelos de ensaio e o ensaio padrão do MB-26 da ABNT.

10.2 - EXPERIMENTAÇÃO REALIZADA

10.2.1 - COMPARAÇÃO ENTRE AS TENSÕES DE RUPTURA OBTIDAS PARA O CISALHAMENTO NUM PLANO E O CISALHAMENTO EM DOIS PLANOS

- ENSAIO

Trata-se de realizar ensaios de cisalhamento em dois planos através dos dispositivos esquematizados nas figuras 10.4a e 10.4b. Utilizando madeira de mesmas características, foi feito o ensaio de corpos de prova do MB-26, figura 10.7b.

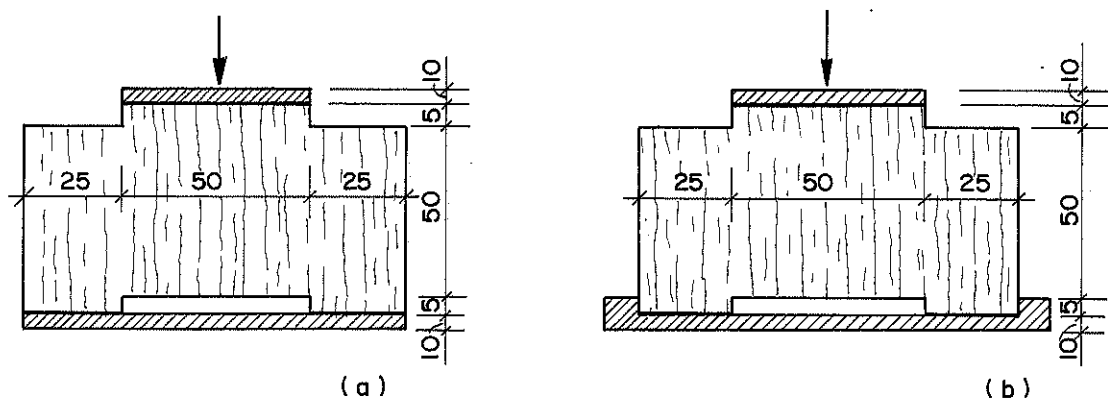


Figura 10.4 - Esquemas dos Dispositivos para Ensaio de Cisalhamento em Dois Planos

(75) ASTM - Testing veneer, plywood, and other glued veneer constructions. D-805 - p.68

Os ensaios foram feitos utilizando-se Pinho do Paraná. Foram retirados 12 (doze) corpos de prova de uma barra homogênea, 4 (quatro) corpos de prova para cada modelo e ensaiados na condição de madeira seca ao ar, a uma velocidade de carregamento de 2,5 MPa por minuto. A ruptura do modelo duplo ocorreu sistematicamente apenas de um lado, figura 10.5.

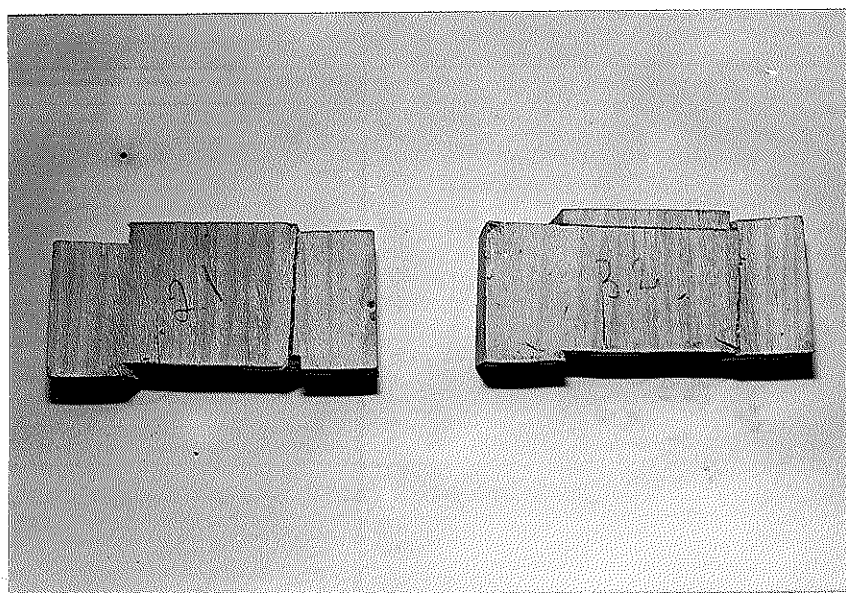


Figura 10.5 - Ruptura Típica de Cisalhamento Associada à Tração Normal

- APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos para a barra de Pinho do Paraná ensaiada estão indicados na tabela 10.1.

TENSÕES DE RUPTURA EM MPa		
Fig. 10.4a (τ_1)	Fig. 10.4b (τ_2)	MB - 26 (τ_3)
7,83	9,50	9,55
9,06	7,90	10,69
7,96	7,74	9,66
9,07	8,83	11,52

Tabela 10.1 - Resultados Obtidos para uma Barra de Pinho do Paraná

Resultados semelhantes foram obtidos no LaMEM para três barras de Pinho do Paraná, conforme modelos das figuras 10.6a e 10.6b.

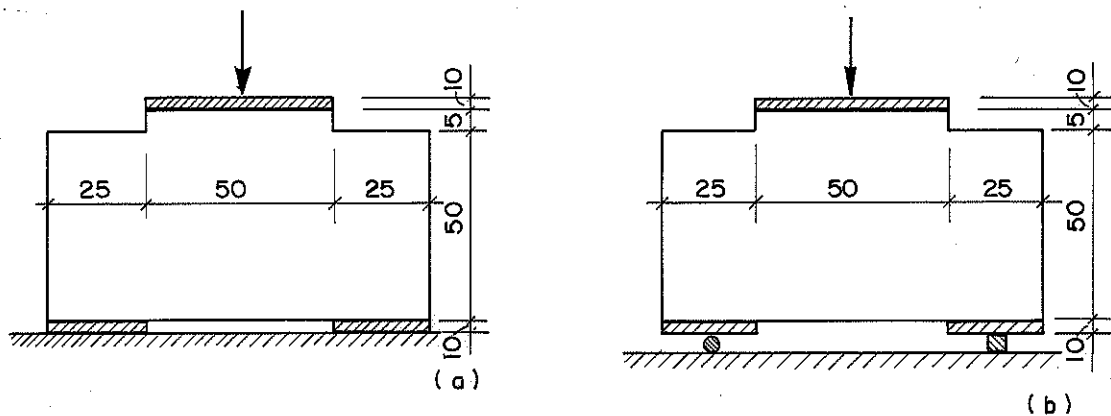


Figura 10.6 - Modelos para Ensaio de Cisalhamento em Dois Planos

Foram ensaiados, também, corpos de prova preparados conforme o modelo indicado na figura 10.7a e o modelo do MB-26, figura 10.7b.

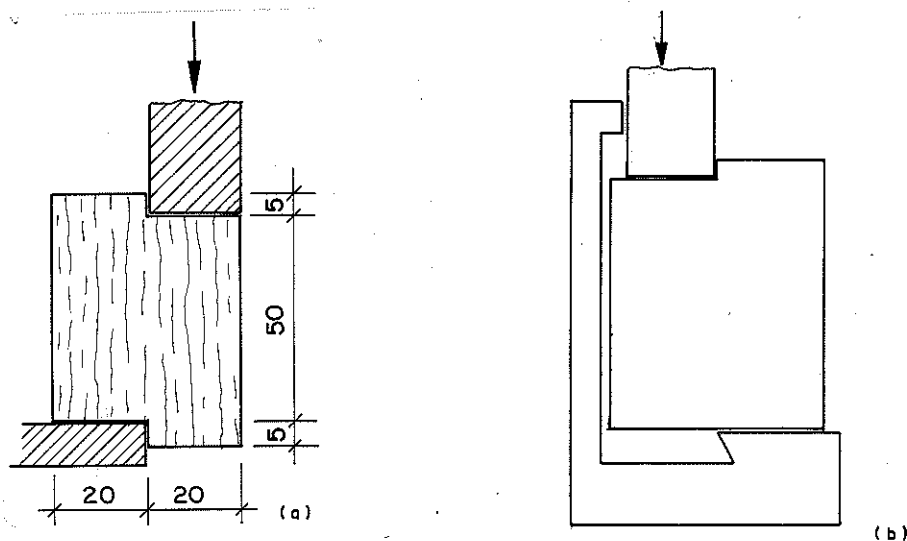


Figura 10.7 - Corpo de Prova para Ensaio de Cisalhamento em um Plano

Os resultados obtidos estão indicados na tabela 10.2 para madeira seca ao ar e para madeira verde e se trata de um experimento em blocos aleatorizados.

BARRA	MODELO	SECA AO AR		MADEIRA VERDE	
		Ruptura (MPa)	Umidade (%)	Ruptura (MPa)	Umidade (%)
1	Fig. 10.6a	5,89	12,55	3,10	63,20
		5,18	12,59	3,27	45,35
	Fig. 10.6b	2,22	12,57	1,67	60,20
		2,29	12,28	1,80	52,35
	Fig. 10.7a	10,59	11,31	4,95	56,22
		8,64	11,29	4,40	48,30
	Fig. 10.7b	11,06	12,39	5,28	50,46
		8,60	11,99	4,92	45,20
2	Fig. 10.6a	6,78	12,40	2,71	51,25
		5,50	12,69	3,00	38,94
	Fig. 10.6b	2,45	12,56	2,02	34,50
		2,49	12,37	1,66	40,30
	Fig. 10.7a	9,29	11,85	4,60	38,90
		9,88	12,25	4,49	42,10
	Fig. 10.7b	8,97	11,97	4,59	53,10
		9,65	12,58	3,85	50,20
3	Fig. 10.6a	11,78	12,20	5,98	40,26
		8,71	12,98	5,98	42,25
	Fig. 10.6b	4,96	11,88	2,85	38,90
		3,85	11,64	3,32	45,60
	Fig. 10.7a	16,73	12,07	7,78	35,80
		14,75	11,74	8,60	32,40
	Fig. 10.7b	16,32	11,84	8,50	39,70
		14,25	11,27	7,50	40,20

Tabela 10.2 - Resultados dos Ensaios Realizados no LAMEM

- ANÁLISE DE RESULTADOS

A análise da ruptura dos corpos de prova para cisalhamento em dois planos mostrou claramente uma ruptura por tração normal às fibras no dispositivo indicado na figura 10.6.b, revelando a

existência de flexão normal às fibras. A figura 10.8 mostra a ruptura por tração normal ocorrida no dispositivo com dois apoios simples.

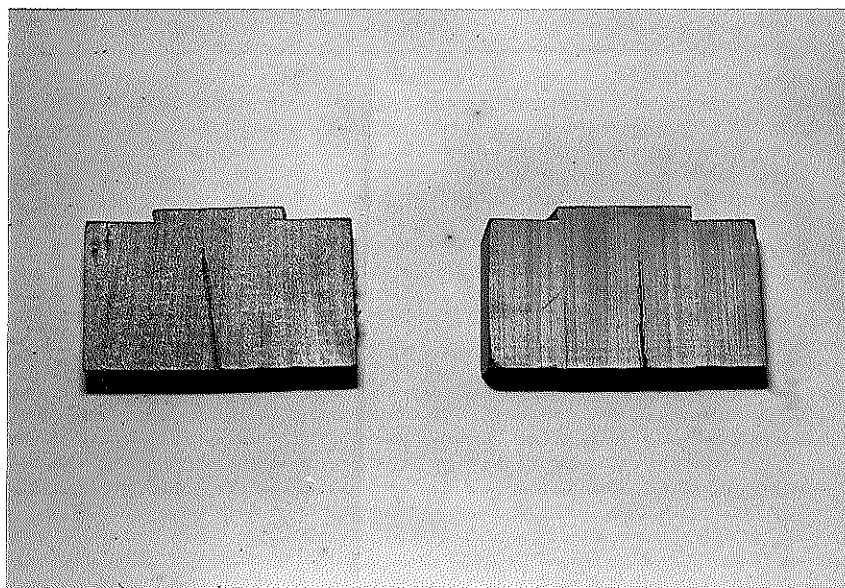


Figura 10.8 - Ruptura por Tração Normal às Fibras

A ruptura verificada nos corpos de prova para cisalhamento em dois planos, figuras 10.4 e 10.6a, sendo os corpos de prova apoiados sobre placas metálicas, com o aparecimento do atrito durante o carregamento, ocorre por cisalhamento associada à ruptura por tração normal, como indicado na figura 10.5. e figura 10.9.

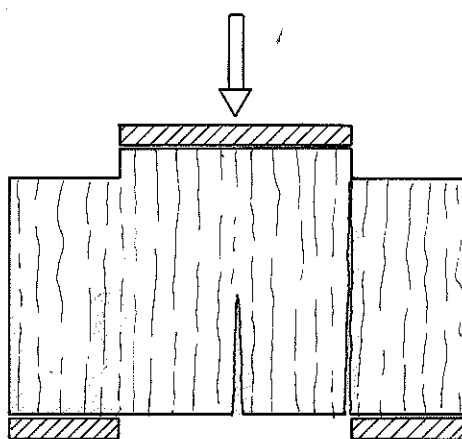


Figura 10.9 - Ruptura por Cisalhamento Associada à Tração Normal

COMPARAÇÃO DE MÉDIAS

A análise estatística realizada para comparar os resultados obtidos através do ensaio do MB-26 e do ensaio para cisalhamento em dois planos, figuras 10.4a e 10.4b, revelou a não significância da hipótese nula, isto é, existe diferença significativa entre os resultados obtidos conforme a tabela 10.3, na qual é apresentado o resultado da análise estatística.

TÍTULO: Comparação de Médias		
ESPÉCIE: Pinho do Paraná		
Especificação	Resultados	Observações/Conclusões
Hipótese Inicial	$\tau_1 = \tau_3$	Validade da Hipótese nula
Desvio Padrão	$s = 0,814$	Dados: Tabela 10.1
Valor de t_0	$t_0 = 3,26$	Dados: tabela 10.1
Nível de Significância	$\alpha = 1,0\%$	Existe evidência da diferença entre as médias
Hipótese Inicial	$\tau_2 = \tau_3$	Validade da hipótese nula
Desvio Padrão	$s = 0,874$	Dados: Tabela 10.1
Valor de t_0	$t_0 = 1,89$	Dados: tabela 10.1
Nível de Significância	$\alpha = 5,0\%$	Existe evidência da diferença entre as médias

Tabela 10.3 - Comparações das Tensões da Ruptura Obtidas pelo Ensaio do MB-26 e pelo Ensaio de Cisalhamento em dois Planos

ANÁLISE DE VARIÂNCIA

Realizou-se uma análise de variância utilizando-se o Mini Tab implantado no computador IBM/370 da EESC, utilizando-se os dados da tabela 10.2, obtidos no LaMEM para a madeira seca ao ar e para a madeira verde. Utilizou-se o modelo indicado pela expressão 10.1.

$$y_{ij} = \mu + T_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \dots\dots\dots (10.1)$$

sendo:

μ = média da população

T_i = resultados obtidos para diferentes tratamentos realizados, isto é, representam os resultados dos ensaios utilizando modelos diferentes de corpos de prova (1 a 4).

β_j = a indicação dos blocos, ou seja, da identificação das barras de Pinho do Paraná (1 a 3).

Verificou-se, através da análise de regressão a validade do modelo adotado e a viabilidade da análise de variância.

A partir dos resultados obtidos, montou-se a tabela 10.4 na qual são apresentadas as comparações entre blocos e tratamentos e os correspondentes níveis de significâncias para a madeira seca ao ar.

C A U S A	G L	S Q	Q M	NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA
Entre Blocos.....	2	111,77	55,88	0,1%
Entre Tratamentos.....	3	299,33	99,78	0,1%
Residual.....	23	441,151	19,18	

Tabela 10.4 - Análise de Variância

A comparação dos blocos e dos tratamentos dois a dois (teste t) é mostrada pela tabela 10.5.

COMPARAÇÕES	t_0	α (%)
B ₁ - B ₃	- 4,18	0,05
B ₂ - B ₃	- 4,00	0,05
T ₁ - T ₄	- 2,33	2,50
T ₂ - T ₄	- 11,65	<<0,05
T ₃ - T ₄	7,18	0,05

Tabela 10.5 - Teste t Realizado na Análise Anterior (Madeira Seca ao Ar).

Os resultados da tabela 10.4 e 10.5 indicam a existência de diferença significativa entre os blocos e entre os tratamentos isto é, os ensaios são estatisticamente diferentes.

CONCLUSÃO

A ruptura por flexão sugere a influência de tração normal às fibras certamente prejudicial à ocorrência de cisalhamento puro.

As diferenças significantes constatadas nos ensaios deste item, bem como os tipos de rupturas observadas, revelam a importância do atrito desenvolvido entre os apoios e o corpo de prova, significativa para promover a ruptura por cisalhamento.

10.2.2 - COMPARAÇÃO ENTRE AS TENSÕES DE RUPTURA OBTIDAS NO ENSAIO PADRÃO DO MB-26 E NO ENSAIO DE CORPOS DE PROVA NÃO SUJEITOS À FLEXÃO

- ENSAIO

A constatação na literatura e na experimentação descrita no item anterior, da influência da flexão nos ensaios de cisalhamento, despertou o interesse pelo aperfeiçoamento do ensaio realizado de acordo com o MB-26. Este ensaio, realizado segundo o esquema da figura 10.10, está sujeito à influência da flexão devida à excentricidade entre a carga de cisalhamento e a reação de apoio. Esta flexão induz o aparecimento de tensões de tração normal (t_n) e de compressão normal (C_n), figura 10.10.

Na tentativa de ensaio segundo esquema no qual não possa ocorrer a flexão, optou-se pela construção do dispositivo apresentado na figura 10.11.

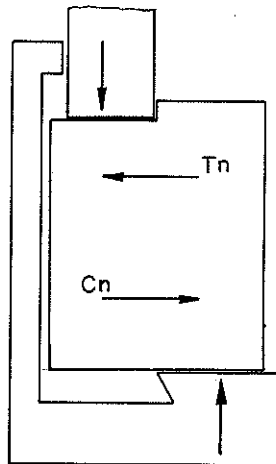


Figura 10.10 - Esforços internos devidos ao Momento Fletor

Para este dispositivo, o corpo de prova poderia ser simplificado, eliminando-se o dente do modelo do MB-26. A preparação do corpo de prova cúbico é mais simples e elimina-se um ponto de concentração de tensões. O corpo de prova cúbico é proposto pela DIN (76) e pela ISO (77).

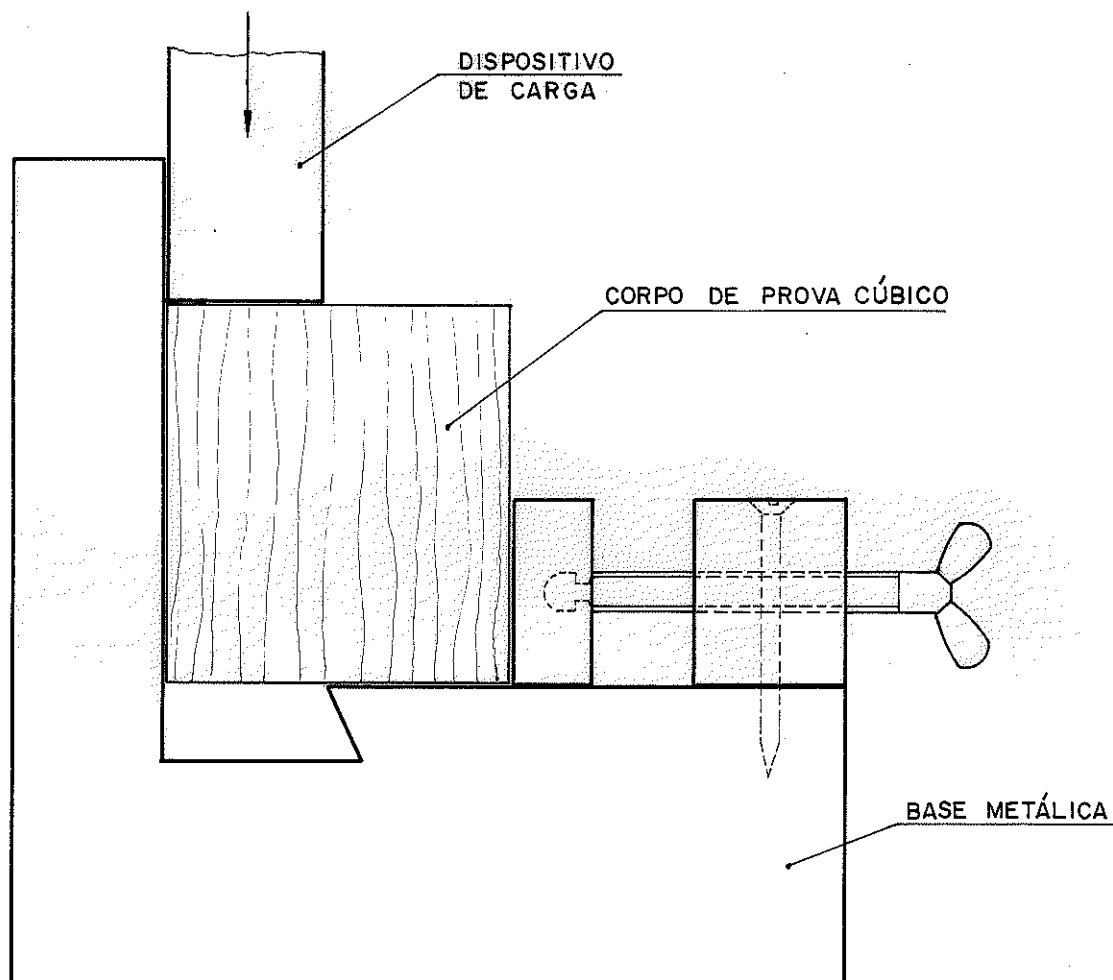


Figura 10.11 - Dispositivo Proposto para Ensaio de Cisalhamento

(76) DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG - Bestimmung der Scherfestigkeit in Faserrichtung - DIN 52 187.

(77) INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - Determination of ultimate shearing stress, parallel to grain - ISO 3347

- APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos são apresentados nas tabelas 10.5 e 10.6, corrigidos para a umidade de 12%, tendo em vista destacar a influência do sistema de ensaio.

ESPÉCIE: Peroba Rosa		
BARRA	TENSÕES DE RUPTURA CORRIGIDAS (MPa)	
	ENSAIO PADRÃO	CORPO DE PROVA PROPOSTO
1	16,92	17,12
	16,58	19,36
2	13,61	15,50
	14,16	13,94
3	16,14	16,97
	15,73	19,10
4	13,51	15,54
	14,08	15,57

Tabela 10.5 - Tensões de Ruptura por Cisalhamento. Umidade de 12%

ESPÉCIE: Jatobá		
	TENSÕES DE RUPTURA CORRIGIDAS (MPa)	
	ENSAIO PADRÃO	CORPO DE PROVA PROPOSTO
1	17,61	20,16
	18,67	20,47
2	16,45	19,40
	19,35	20,27
3	17,25	18,96
	18,85	21,96
4	17,34	19,32
	15,74	19,36

Tabela 10.7 - Tensões de Ruptura por Cisalhamento. Umidade de 12%

- ANÁLISE DE RESULTADOS

- TENSÃO DE CISALHAMENTO PURO

A tensão de cisalhamento puro na madeira é difícil de ser determinada devido à concentração de tensões detectada em todos os ensaios prescritos para este fim.

A seguir será apresentado, como sugestão, um procedimento para determinação da tensão de cisalhamento puro, baseado no ensaio em corpos de prova cúbicos prescritos no item 10.2.2.

Isolando um elemento infinitesimal do plano de ruptura do corpo de prova cúbico, pode-se considerar o estado de tensões indicados na figura 10.12.

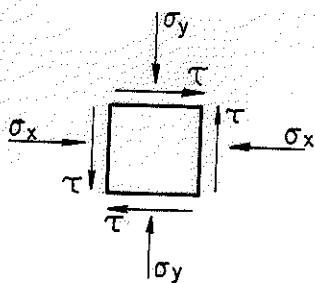


Figura 10.12 - Estado de Tensões num Elemento Infinitesimal

Tem-se $\sigma_x < \sigma_y$ e pode-se utilizar o círculo de Mohr para determinar as tensões de cisalhamento e as tensões de cisalhamento puro, figura 10.13.

A análise é apenas qualitativa, por ser desconhecida a distribuição de tensões normais no plano de ruptura.

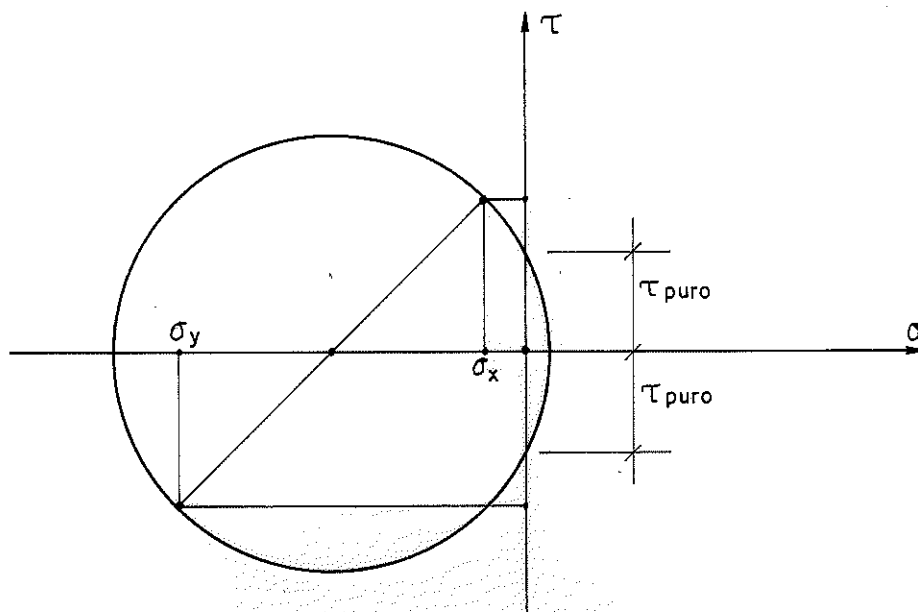


Figura 10.13 - Representação das Tensões no Plano de Mohr

- COMPARAÇÃO DE MÉDIAS

Observa-se, através das tabelas 10.4 e 10.5, uma diferença sistemática entre as tensões de ruptura obtidas através dos ensaios realizados. Esta diferença é confirmada pela análise estatística resumida nas tabelas 10.8 e 10.9, para a Peroba Rosa e para o Jatobá.

TÍTULO: Comparação de Médias		
ESPÉCIE: Peroba Rosa		
ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS	OBSERVAÇÕES/CONCLUSÕES
Hipótese Inicial	$\tau_1 = \tau_2$	Validade da Hipótese Nula
Desvio Padrão	$S = 1,644$	Dados: tabela 10.4
Valor de t_0	$t_0 = 2,20$	Dados: tabela 10.4
Nível de Significância	$\alpha = 2,5\%$	Existe Evidência da Diferença entre as Médias

Tabela 10.8 - Comparação Entre as Tensões de Ruptura Obtidas Através do Ensaio do MB-26, e Através do Ensaio em Corpos de Prova Cúbicos

TÍTULO: Comparação de Médias		
ESPÉCIE: Jatobá		
ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS	OBSERVAÇÕES/CONCLUSÕES
Hipótese Inicial	$\tau_1 = \tau_2$	Validade da Hipótese Nula
Desvio Padrão	$s = 1,065$	Dados: tabela 10.5
Valor de t_0	$t_0 = 3,530$	Dados: tabela 10.5
Nível de Signifi- cância	$\alpha = 0,25\%$ (78)	Há evidência da diferença entre as médias das populações

Tabela 10.9 - Comparação entre as Tensões de Ruptura obtidas Através do Ensaio do MB-26 e Através do Ensaio em Corpos de Prova Cúbicos

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos ensaiando-se os corpos de prova do MB-26 e o corpo de prova proposto, segundo os esquemas de ensaio apresentados anteriormente, são mais elevados para o modelo proposto.

Esta diferença confirma as hipóteses implícitas na proposição do novo dispositivo de ensaio: A eliminação dos esforços de tração normal levará à ruptura dos corpos de prova com tensões de cisalhamento mais elevadas.

CAP 11 PROPOSTAS E PESQUISAS FUTURAS

11.1 - PROPOSTAS

No presente trabalho houve a preocupação de estudar o comportamento da madeira ao cisalhamento, com a intenção de contribuir para a revisão do método de ensaio e da norma brasileira para o cálculo e execução das estruturas de madeira, na parte referente ao cisalhamento.

Apoiados na revisão da literatura pertinente, na experimentação desenvolvida e nas conclusões de cada capítulo, são feitas as propostas seguintes:

1.^a) Com base no estudo e conclusões do capítulo 3:

a)- Há necessidade da aleatorização na coleta das barras para ensaio dos corpos de prova de cisalhamento paralelo ou normais às fibras, sem a preocupação do paralelismo das camadas de crescimento em relação as faces da barra, prevista na redação vigente do MB-26.

b)- Há possibilidade da utilização de peças sujeitas ao cisalhamento normal às fibras, denominado "rolling shear" na literatura internacional, utilizando a expressão 3.2 para estimar o cisalhamento normal a partir do paralelo às fibras, sem a necessidade de adoção de mais um ensaio para a caracterização das madeiras.

2.^a) Com base no estudo e conclusões do capítulo 4, a tensão de cisalhamento na flexão poderá ser calculada considerando-se a altura da viga e a largura das placas de apoio e de carregamento, figura 11.1 e 11.2.

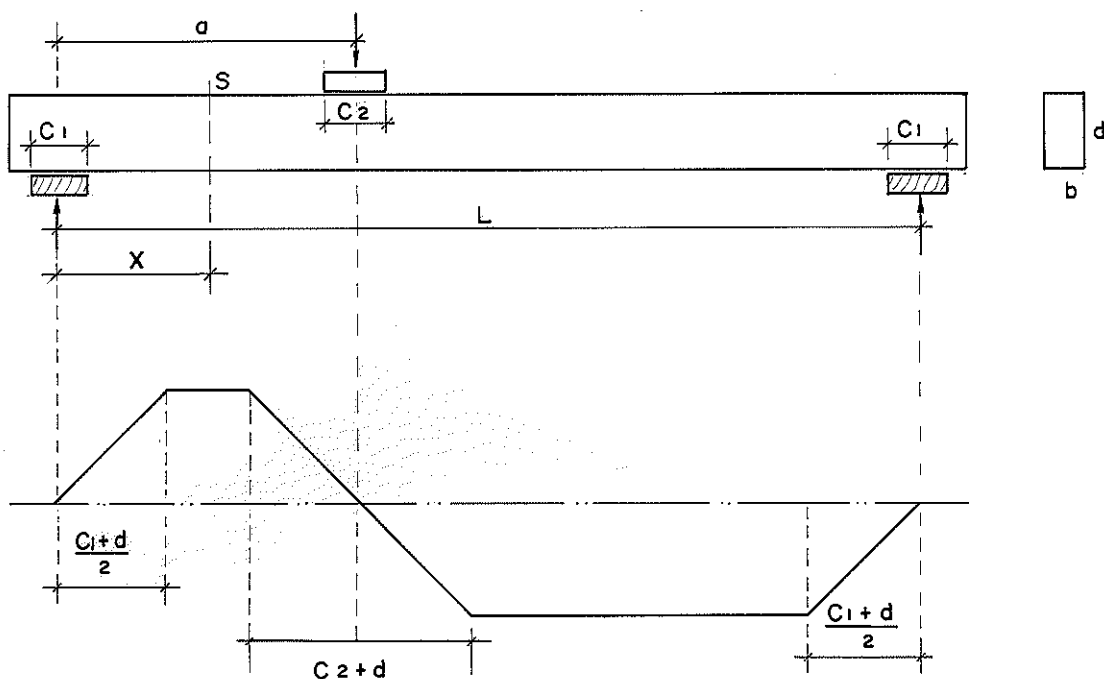


Figura 11.1 - Esforço Cortante - Flexão - Carga Concentrada Para verificação do cisalhamento na flexão.

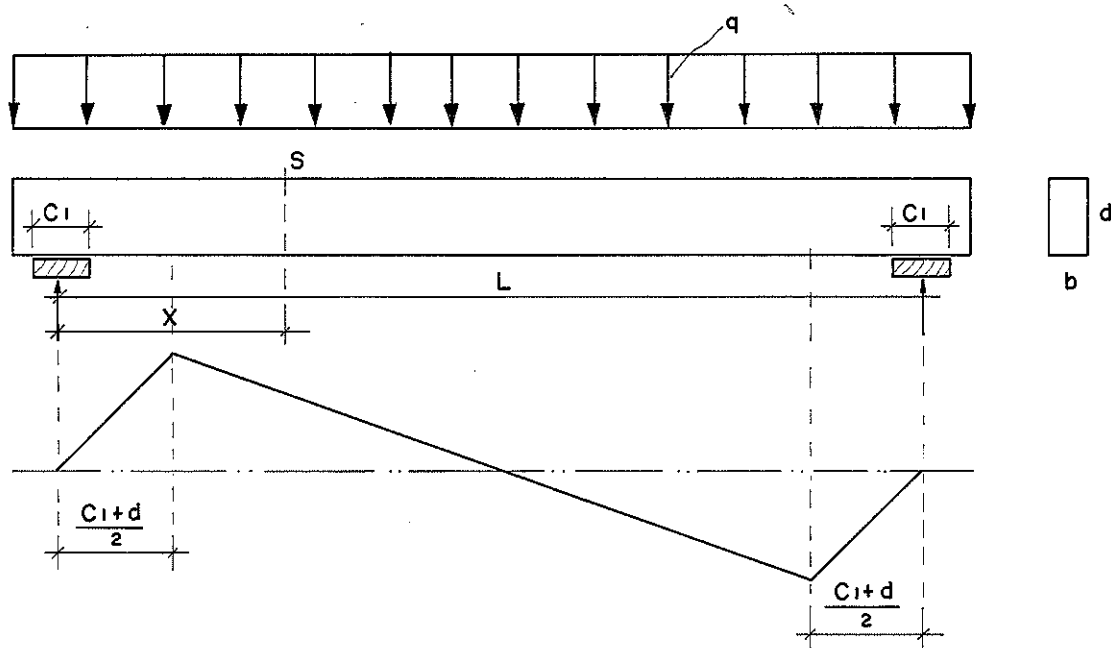


Figura 11.2 - Esforço Cortante - Flexão - Carga Uniformemente Distribuída - Para verificação do cisalhamento na flexão.

A adoção destes diagramas corresponde à utilização do cálculo apresentado a seguir:

$$\text{Para } x \leq \frac{C_1 + d}{2}$$

tem-se:

$$\tau = \frac{V S}{b I} \cdot \frac{2x}{C_1 + d} \dots\dots\dots (11.1)$$

$$\text{Para } x > \frac{C_1 + d}{2},$$

tem-se:

$$\tau = \frac{V S}{b I} \dots\dots\dots (11.2)$$

para:

$$a - \frac{C_2 + d}{2} \leq x \leq a + \frac{C_2 + d}{2},$$

tem-se:

$$\tau = \frac{V S}{b I} \cdot \frac{2(x - a)}{C_2 - d} \dots\dots\dots (11.3)$$

3.^a) A influência da umidade e da densidade na resistência ao cisalhamento poderá ser considerada utilizando-se o diagrama de Kollmann para a correção da densidade com a variação da umidade, e dos diagramas apresentados no capítulo 6 para a correção da resistência ao cisalhamento, adotando-se 12% como umidade padrão para a madeira seca ao ar.

4.^a) Considerando-se o estudo e as conclusões do capítulo 9, recomenda-se a adoção da tensão característica para o cisalhamento, coincidente com a tensão limite inferior ao nível de 95% de probabilidade.

5.^a) Com base no estudo e nas conclusões do capítulo 10, é proposta a realização dos ensaios de cisalhamento, utilizando-se o corpo de prova cúbico com aresta de 5 cm e dispositivo de ensaio capaz de minimizar o momento fletor devido à excentricidade entre a carga e a reação de apoio no ensaio de cisalhamento.

6^a) Com base na revisão bibliográfica e na Norma Brasileira de Símbolos Gráficos para Projetos de Estruturas é sugerida a adoção da notação complementar apresentada a seguir.

NOTAÇÃO	DESCRIMINAÇÃO
f_w	Resistência da Madeira
f_{wv}	Resistência da Madeira ao cisalhamento paralelo às fibras.
\bar{f}_{wv}	Resistência Média da Madeira ao Cisalhamento
f_{wvk}	Resistência Característica da Madeira ao Cisalhamento
f_{wvd}	Resistência de Cálculo da Madeira ao Cisalhamento

11.2 - PESQUISAS FUTURAS

O estudo teórico e experimental da madeira submetida ao cisalhamento deve prosseguir, destacando-se a amostragem, o método de ensaio, a influência do tamanho do corpo de prova, a determinação de coeficientes de minoração da resistência característica, a influência da temperatura, a influência do nível de mão de obra disponível e outros.

Estes temas não dizem respeito apenas ao cisalhamento, mas também as demais propriedades, como a compressão, a tração, a flexão, etc...

BIBLIOGRAFIA

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS- Standard method of testing small clear specimens of timber, ASTM Design D-143-52, Philadelphia, PA., 1976.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- Cálculo e execução de estruturas de madeira - NB-11. Rio de Janeiro, ABNT, 1951.
- _____ - Ensaio físico e mecânico de madeiras - MB-26. Rio de Janeiro, ABNT, 1940.
- _____ - Projeto e execução de obras de concreto armado: procedimento - NB-1. Rio de Janeiro, ABNT, 1978.
- _____ - Símbolos gráficos para projetos de estruturas: simbologia - Projeto de Norma 2:03.12-001. Rio de Janeiro, ABNT, Dez. 1981.
- BENDTSEN, B.A. & PORTER, S.- Comparison of results from standard 2-inch with 1 - 1/2-inch shear block tests. Forest Products Journal, 28(7): 54-56, July, 1978.
- BOX, G.E.P.; HUNTER, W.G.; HUNTER, J.S.- Statistics for experimenters. Madison, 1978.
- BROTERO, F.A.- Estudo dos caracteres físicos e mecânicos das madeiras. São Paulo, Escola Politécnica de São Paulo, Laboratório de Ensaio de Materiais, Março, 1932. 59p. (Boletim nº 8).
- COWAN, W.C.- Shear stress in two wood beams over wood block supports. USDA-FS-FPL, (2249), Aug. 1962.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG- Bestimmung der Scherfestigkeit in Faserrichtung - DIN 52 187. Berlin, Mai, 1979.
- _____ - DIN 1052- Holzbanwerke, Berechnung und Ausführung, Oktober, 1969. Blatt 1.

- FOREST PRODUCTS LABORATORY- Wood handbook: basic information on wood as a material of construction with data for its use in design and specification. Washington, D.C., FPL-FS-USDA, 1955. 528p. (Agriculture Handbook nº 72).
- _____ - Wood handbook: wood as an engineering material. Washington, D.C., FPL-FS-FPL, 1974. (Agriculture Handbook Nº 72).
- FOSCHI, R.O. & BARRET, J.D.- Longitudinal shear strength of Douglas-fir. Canadian Journal of Civil Engineering, 3(2): 198-208, 1976.
- HELLMEISTER, J.C.- Sobre a determinação das características físicas da madeira. São Carlos, EESC-USP, 1973. Tese (Doutor - Engenheiro).
- HOFFMAN, R. & VIEIRA, S.- Análise de regressão: uma introdução à econometria. São Paulo, HUCITEC; EDUSP, 1977. (Economia e Planejamento). 339p.
- HOOLEY, R.F. & HIBBERT, P.D.- Stress concentration in timber beams. Journal of the Structural Division, ASCE, 93(2): 127-139, 1967.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS- Madeiras nacionais: tabela de resultados de ensaios físicos e mecânicos. Sep. da 2. ed. do Boletim nº 31 do IPT. São Paulo, 1956.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION- Determination of ultimate shearing stress parallel to grain - ISO 3347. 1976.
- KARLSEN, G.G.- Wooden structures. Moscou, Mir Publishers, 1967.
- KEENAN, F.J.- Shear strength of wood beams. Forest Products Journal, 24(9): 63-70, Sept. 1974.

- KOLLMANN, F.- Technologie des holzes und der holzwerkstoffe.
2. ed. Berlin, Spring Verlag, 1951. 1048p. v.1.
- LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL- Madeiras: ensaio de corte - E78. Lisboa, LNEC, 1960. (Especificações - Série B - Secção 5).
- L'ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION- Essai de cisailment - NFB 51-012. Paris, AFNOR, 1942.
- LIU, Jen Y.- Shear strength of wood beams: a Weibull analysis. Journal of the Structural Division, 106(10): 2035-2052, Oct. 1980.
- LONGWORTH, J.- Longitudinal shear strength of timber beams. Forest Products Journal, 27 (8): 19-23, Aug. 1977.
- MANDERY, W.L.- Relationship between perpendicular compressive stress and shear strength of wood. Wood Science: 177-182, Jan. 1969.
- MEADOWS JR., John C.- Longitudinal shear in wooden beams. Journal of the FPRS, 6 (9), Sept. 1956.
- NEWLIN, J.A.; HECK, G.E.; MARCH, H.W.- New method of calculating longitudinal shear in checked wooden beams. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 1944. p. 739-744.
- NORRIS, Charles B.- Comparison of standard block-shear test with the panel-shear test. Forest Products Journal, 7(9): 299-301, Sept. 1957.
- PARADINE, C.G. & RIVETT, B.H.P.- Métodos estatísticos para tecnologistas. Trad. de Miguel C. Santoro. São Paulo, Polígono; EDUSP, 1974.
- PEARSON, R.G.; KLOOT, N.H.; BOYD, J.D.- Timber engineering design handbook. Melbourne, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, 1958. 248p.

- PIGOZZO, Júlio Cesar- Influência da umidade e da densidade na resistência à compressão da madeira. Orientação do Prof. Dr. João Cesar Hellmeister. São Carlos, EESC-USP, 1982. Dissertação (Mestre - Engenharia de Estruturas).

- RADCLIFFE, B.M. & SUDDARTH, S.K.- The notched beam shear test for wood. Sep. de: Forest Products Journal, 5(2), April, 1955.

- TIMOSHENKO, Stephen P.- History of strength of materials. New York, McGraw-Hill, 1963. 452p.

- _____ - Resistência dos materiais. Trad. por J.R. de Carvalho. Rio de Janeiro, Ao Livro Técnico, 1971. V.1-2.

- TORRES ZANDER, Júlio Ricardo- Cálculo e fabricação de peças de madeira laminada. Orientação do Prof. Dr. João Cesar Hellmeister. São Carlos, EESC-USP, 1979. Dissertação (Mestre - Engenharia de Estruturas).

