

ESTUDO DA SOLICITAÇÃO DE
COMPRESSÃO NORMAL ÀS FIBRAS DA MADEIRA

ANTONIO ALVES DIAS

Tese apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos, da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para a obtenção do
Título de Doutor em Engenharia de Estruturas.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr

São Carlos
1994

FOLHA DE APROVAÇÃO

Tese defendida e aprovada em 14/12/1994
pela Comissão Julgadora:



Prof. Tit. FRANCISCO ANTONIO ROCCO LAHR (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos - USP)



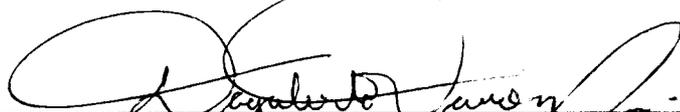
Prof. Tit. CARLITO CALIL JUNIOR
(Escola de Engenharia de São Carlos - USP)



Prof. Dr. PEDRO AFONSO DE OLIVEIRA ALMEIDA
(Escola Politécnica - USP)



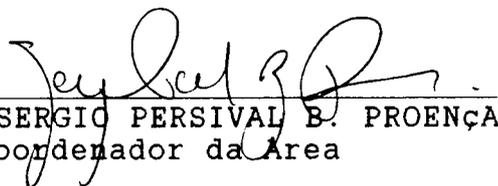
Prof. Dr. FRANCISCO ANTONIO ROMERO GESUALDO
(Universidade Federal de Uberlândia - MG)



Prof. Dr. DAGOBERTO DARIO MORI
(Escola de Engenharia de São Carlos - USP)



Prof. Dr. JURANDYR POVINELLI
Presidente da CPG



Prof. Dr. SERGIO PERSIVAL B. PROENÇA
Coordenador da Área

Aos meus pais,
Antonio e Maria da Conceição

À minha filha e à minha esposa,
Beatriz e Tânia

D541e

Dias, Antonio Alves

Estudo da solicitação de compressão normal às fibras da madeira / Antonio Alves Dias.-- São Carlos, 1994.

144p.

Tese (Doutorado).-- Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 1994.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr

1. Madeira - compressão normal. 2. Madeira - propriedades mecânicas. I. Título

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr, pela orientação deste trabalho, pelo incentivo, e pela constante demonstração de amizade e apreço.

Ao Prof. Dr. Carlito Calil Jr., pelo apoio concedido como chefe do LaMEM, pela completa disposição para discutir assuntos referentes a este trabalho e a experimentação realizada, e pela amizade.

Ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira-UNESP, na figura do seu chefe, Prof. Dr. Milton Dall'Aglio Sobrinho, pelo apoio concedido. Aos amigos do DEC, pelo convívio, auxílio e troca de idéias.

Ao Engenheiro Osmar Barros Jr., pela ajuda na identificação de espécies de madeira.

Aos amigos do LaMEM (Arnaldo, Bragato, Cláudio, Cido, Dino, Jaime, José Francisco, Marivaldo, Regina, Roberto, Silvana, Sílvio), pelo auxílio na realização deste trabalho.

À Tânia, minha esposa.

SUMÁRIO

Lista de figuras	i
Lista de tabelas	iv
Lista de abreviaturas e siglas	vi
Lista de símbolos	vii
Resumo	viii
Abstract	ix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Interesse e contextualização do estudo	2
1.3 Objetivos	3
1.4 Estruturação do trabalho	3
2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA	5
2.1 Constituição da madeira	5
2.2 Aspectos do comportamento da madeira na solicitação de compressão normal às fibras	10
2.3 Normalização a respeito da solicitação de compressão normal às fibras	13
2.4 Trabalhos técnicos sobre o assunto	21
2.5 Considerações finais	31
3 EXPERIMENTAÇÃO PRELIMINAR PARA DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA DO CORPO-DE-PROVA	32
3.1 Compressão parcial ou compressão total?	32
3.2 Influência da geometria do corpo-de-prova	39
4 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DA MADEIRA NA SOLICITAÇÃO DE COMPRESSÃO NORMAL ÀS FIBRAS	54
4.1 Procedimentos adotados	54
4.2 Resultados obtidos	60
4.3 Ensaio Complementares	72
4.4 Comentários e conclusões	78

5 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE E DIREÇÃO DO CARREGAMENTO .	80
5.1 Procedimentos adotados	80
5.2 Resultados obtidos	83
5.3 Análise dos Resultados	92
5.4 Comentários e conclusões	100
6 DEFINIÇÃO DAS DIMENSÕES DO CORPO-DE-PROVA	101
6.1 Procedimentos adotados	102
6.2 Resultados obtidos	104
6.3 Análise dos resultados	105
6.4 Comentários e conclusões	108
7 DEFINIÇÃO DA VELOCIDADE DE CARREGAMENTO	111
7.1 Procedimentos adotados	112
7.2 Resultados obtidos	113
7.3 Análise dos resultados	116
7.4 Comentários e conclusões	123
8 PROPOSTA DE MÉTODO PARA O ENSAIO DE COMPRESSÃO NORMAL ÀS FIBRAS DA MADEIRA	125
8.1 Ensaio de compressão normal às fibras	125
8.2 Comentários	129
9 ALGUMAS CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DO CRITÉRIO DE DIMENSIONAMENTO	130
9.1 Relação entre a resistência à compressão paralela e a resistência à compressão normal	130
9.2 Coeficiente de majoração	133
9.3 Comentários e sugestões	136
10 CONCLUSÃO	137
11 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	139

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1-	Seção transversal de um tronco de árvore ...	7
Figura 2.2-	Estrutura microscópica das coníferas	9
Figura 2.3-	Estrutura microscópica das dicotiledôneas	10
Figura 2.4-	Definição de seções e direções principais para uma peça retangular de madeira	11
Figura 2.5-	Modelo da estrutura da madeira e modo de ruptura da estrutura interna em compressão normal às fibras	12
Figura 2.6-	Ensaio de compressão normal às fibras	14
Figura 2.7-	Esquema do ensaio e resistência convencional (σ_y) da ISO-3132	16
Figura 2.8-	Parâmetros para determinar o coeficiente k_{c, ρ_0}	20
Figura 2.9-	Corpo-de-prova utilizado e resistência à compressão normal convencionalizada	26
Figura 2.10-	Critério proposto por Madsen	27
Figura 2.11-	Diagrama tensão x deformação	30
Figura 3.1-	Esquema do ensaio para o corpo-de-prova com dimensões nominais iguais a 50 x 50 x 150 mm ³	35
Figura 3.2-	Esquema do ensaio para o corpo-de-prova com dimensões nominais iguais a 50 x 50 x 50 mm ³	36
Figura 3.3-	Tensão para comparação dos resultados	36
Figura 3.4-	Deformações medidas na altura total do corpo-de-prova	40
Figura 3.5-	Deformações medidas na parte central do corpo-de-prova	41
Figura 3.6-	Análise de resíduos - Peroba Rosa	44
Figura 3.7-	Análise de resíduos - Maçaranduba	44
Figura 3.8-	Análise de resíduos - Cambará	48
Figura 3.9-	Análise de resíduos - Peroba Rosa	49
Figura 3.10-	Análise de resíduos - Maçaranduba	49
Figura 3.11-	Diagramas σ x ϵ (Maçaranduba)	53
Figura 4.1-	Esquema do ensaio	56
Figura 4.2-	Orientação dos anéis de crescimento	56

Figura 4.3-	Diagrama σ x ϵ (réplica 1-Peroba Rosa) ...	59
Figura 4.4-	Diagramas σ x ϵ (Peroba Rosa)	61
Figura 4.5-	Diagramas σ x ϵ (Goiabão)	63
Figura 4.6-	Diagramas σ x ϵ (Maçaranduba)	65
Figura 4.7-	Diagramas σ x ϵ (Guapuruvu)	67
Figura 4.8-	Diagramas σ x ϵ (Ipê)	69
Figura 4.9-	Diagramas σ x ϵ (Peroba do Norte)	71
Figura 4.10-	Orientação dos anéis de crescimento	73
Figura 4.11-	Ensaio realizado no equipamento DARTEC ..	73
Figura 4.12-	Diagramas Força x deformação- Eucalipto Citriodora	74
Figura 4.13-	Diagramas Força x deformação- Castanheira	74
Figura 4.14-	Diagramas Força x deformação- Maçaranduba	75
Figura 5.1-	Esquema dos ensaios	81
Figura 5.2-	Obtenção dos corpos-de-prova	82
Figura 5.3-	Diagramas σ x ϵ (1 MPa/min - saturada) ...	86
Figura 5.4-	Diagramas σ x ϵ (2,5 MPa/min - saturada) .	87
Figura 5.5-	Diagramas σ x ϵ (5 MPa/min - saturada) ...	88
Figura 5.6-	Diagramas σ x ϵ (10 MPa/min - saturada) ..	89
Figura 5.7-	Diagramas σ x ϵ (2,5 MPa/min - seca ao ar)	90
Figura 5.8-	Diagramas σ x ϵ (5 MPa/min - seca ao ar) .	91
Figura 5.9-	Valores médios obtidos	94
Figura 5.10-	Análise de resíduos - σ (saturada)	95
Figura 5.11-	Análise de resíduos - ϵ (saturada)	95
Figura 5.12-	Análise de resíduos - E (saturada)	96
Figura 5.13-	Análise de resíduos - σ (seca ao ar)	96
Figura 5.14-	Análise de resíduos - ϵ (seca ao ar)	97
Figura 5.15-	Análise de resíduos - E (seca ao ar)	97
Figura 6.1-	Orientação dos anéis de crescimento	103
Figura 6.2-	Valores médios obtidos - Tauari	106
Figura 6.3-	Valores médios obtidos - Peroba do Norte	107
Figura 7.1-	Orientação dos anéis de crescimento	113
Figura 7.2-	Valores médios obtidos	117
Figura 7.3-	Análise de resíduos - σ	118
Figura 7.4-	Análise de resíduos - ϵ	119

Figura 7.5- Análise de resíduos - E	119
Figura 7.6- Análise de resíduos - σ	120
Figura 7.7- Análise de resíduos - ϵ	120
Figura 7.8- Análise de resíduos - E	121
Figura 8.1- Dimensões dos corpos-de-prova	126
Figura 8.2- Ensaio de compressão normal	127
Figura 8.3- Diagrama carga x deformação	128
Figura 9.1- Situação de carregamento para comparar os coeficientes de majoração ...	134
Figura 9.2- Coeficientes de majoração da resistência em função da extensão de aplicação de carga	135

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1-	Coeficiente γ' da norma NBR-7190	17
Tabela 2.2-	Coeficiente K_B da norma CSA-086	18
Tabela 2.3-	Coeficiente K_7 da norma australiana	19
Tabela 2.4-	Coeficiente K_4 da norma BS-5268	19
Tabela 2.5-	Valores do Coeficiente $k_{c,90}$ do Eurocode n ^o 5	20
Tabela 3.1-	Resultados obtidos para o corpo-de-prova cúbico do par 17	37
Tabela 3.2-	Valores de $\sigma_{1\%}$ obtidos nos ensaios	38
Tabela 3.3-	Valores de $\sigma_{1\%}$ (MPa) - Peroba Rosa	42
Tabela 3.4-	Valores de $\sigma_{1\%}$ (MPa) - Maçaranduba	43
Tabela 3.5-	Análise de variância - Peroba Rosa	45
Tabela 3.6-	Análise de variância - Maçaranduba	45
Tabela 3.7-	Valores de $\sigma_{1\%}$ (MPa) - Cambará	47
Tabela 3.8-	Valores de $\sigma_{1\%}$ (MPa) - Peroba Rosa	47
Tabela 3.9-	Valores de $\sigma_{1\%}$ (MPa) - Maçaranduba	48
Tabela 3.10-	Análise de variância - Cambará	50
Tabela 3.11-	Análise de variância - Peroba Rosa	50
Tabela 3.12-	Análise de variância - Maçaranduba	50
Tabela 4.1-	Espécies, umidades e pesos específicos ..	55
Tabela 4.2-	Ensaio da réplica 1 - Peroba Rosa	58
Tabela 4.3-	Valores obtidos-Peroba Rosa (seca ao ar)	60
Tabela 4.4-	Valores obtidos-Peroba Rosa (saturada) ..	60
Tabela 4.5-	Valores obtidos-Goiabão (seca ao ar)	62
Tabela 4.6-	Valores obtidos-Goiabão (saturada)	62
Tabela 4.7-	Valores obtidos-Maçaranduba (seca ao ar)	64
Tabela 4.8-	Valores obtidos-Maçaranduba (saturada) ..	64
Tabela 4.9-	Valores obtidos-Guapuruvu (seca ao ar) ..	66
Tabela 4.10-	Valores obtidos-Guapuruvu (saturada) ...	66
Tabela 4.11-	Valores obtidos - Ipê (seca ao ar)	68
Tabela 4.12-	Valores obtidos - Ipê (saturada)	68

Tabela 4.13- Valores obtidos-	
Peroba do Norte (seca ao ar)	70
Tabela 4.14- Valores obtidos-	
Peroba do Norte (saturada)	70
Tabela 4.15- Valores obtidos - Eucalipto Citriodora .	76
Tabela 4.16- Valores obtidos - Castanheira	77
Tabela 4.17- Valores obtidos - Maçaranduba	77
Tabela 5.1- Valores obtidos - saturada	83
Tabela 5.2- Valores obtidos - seca ao ar	85
Tabela 5.3- Médias e coef. de variação-saturada	92
Tabela 5.4- Médias e coef. de variação-seca ao ar ...	93
Tabela 5.5- Análise de variância	98
Tabela 5.6- Testes de hipóteses	99
Tabela 5.7- Testes de hipóteses para as interações	100
Tabela 6.1- Resultados obtidos - Tauari	104
Tabela 6.2- Resultados obtidos - Peroba do Norte ...	105
Tabela 6.3- Médias e coef. de variação-Tauari	108
Tabela 6.4- Médias e coef.de variação-Peroba do Norte	108
Tabela 7.1- Resultados obtidos	114
Tabela 7.2- Médias e coeficientes de variação	116
Tabela 7.3- Análise de variância	122
Tabela 7.4- Testes de hipóteses	122
Tabela 9.1- Valores obtidos nos ensaios	132
Tabela 9.2- Valores médios e relação entre eles	133

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ASTM - American Society for Testing and Materials
- BSI - British Standards Institution
- CSA - Canadian Standards Association
- COPANT - Comissão Panamericana de Normas Técnicas
- DIN - Deutsche Institut für Normung
- LAMEM - Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira da EESC-USP
- NFOPA - National Forest Products Association
- NDS - National Design Specifications for Wood Constructions
- IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas
- ISO - International Organization for Standardization
- SAA - Standards Association of Australia

LISTA DE SÍMBOLOS

- a - distância entre o fim do carregamento e a extremidade da peça, dimensão transversal do corpo-de-prova
- b - largura da peça
- C_b - Coeficiente de majoração (NDS)
- E - módulo de elasticidade
- $E_{c,90}$ - módulo de elasticidade normal às fibras
- F - força, teste estatístico
- $F_{1\%}$ - Força para $\epsilon = 1\%$
- $f_{c,0}$ - resistência da madeira à compressão paralela
- $f_{c,90}$ - resistência da madeira à compressão normal
- h - altura da peça
- K_B - coeficiente de majoração (CSA-086)
- K_4 - coeficiente de majoração (BS-5268)
- K_7 - coeficiente de majoração (norma australiana)
- $K_{c,90}$ - coeficiente de majoração (Eurocode nº 5)
- l - extensão de aplicação da carga
- l_1 - distância entre carregamentos
- s - quadrados médios
- U - teor de umidade
- ϵ - deformação específica
- γ' - Coeficiente de majoração (NBR-7190)
- ρ_{12} - peso específico aparente para U = 12%
- σ - tensão normal
- $\bar{\sigma}_n$ - tensão admissível na compressão normal (NBR-7190)
- σ_C - limite de resistência da madeira verde na compressão paralela (NBR-7190)
- $\sigma_{1\%}$ - tensão para $\epsilon = 1\%$
- $\sigma_{r,0.2\%}$ - tensão para ϵ residual = 0,2%
- $\sigma_{r,1\%}$ - tensão para ϵ residual = 1 %

ABSTRACT

This work presents an experimental study about compression perpendicular to the grain in wood, for which characterization test is not indicated by NBR-6230 (Physical and mechanical tests in wood). Several points were discussed: specimen geometry, speed of testing, direction of loading referred to the growth rings and moisture conditions. Based on the experimental data, a testing procedure is proposed in order to be employed in wood characterization in compression perpendicular to the grain.

Keywords: Wood - compression perpendicular
Wood - mechanical properties

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo teórico e experimental a respeito da solicitação de compressão normal às fibras da madeira, para a qual não é previsto ensaio para caracterização, atualmente, na NBR-6230 (Ensaio físicos e mecânicos de madeiras). Foram abordados aspectos referentes à geometria do corpo-de-prova, velocidade de aplicação de carga, direção do carregamento em relação aos anéis de crescimento e condições de umidade. Com base nos resultados obtidos, é proposto método de ensaio para caracterização da madeira solicitada por compressão normal às fibras.

Palavras-chave: Madeira - compressão normal
Madeira - propriedades mecânicas

1 INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

Atualmente, a utilização da madeira como material estrutural, no Brasil, tem ocorrido em níveis inferiores ao que seria desejado, apesar das amplas possibilidades de emprego deste material. Possuindo boas qualidades, tais como disponibilidade, fácil trabalhabilidade, boa relação entre o seu peso específico e a sua resistência às solicitações mecânicas, sua utilização fica, às vezes, inviabilizada, pelo não conhecimento total de suas propriedades.

Para que ocorra um bom aproveitamento da madeira como material estrutural, com relação aos aspectos de segurança e custos, é necessário o pleno conhecimento das características de resistência e de elasticidade das espécies de madeira com uso mais promissor.

Nos últimos anos, tem ocorrido uma mudança radical nos conceitos relacionados à segurança estrutural. Os critérios de dimensionamento baseados no Método das Tensões Admissíveis, que têm como característica principal o fato de serem baseados em conceitos determinísticos de verificação de segurança estrutural, mesmo sabendo-se que os parâmetros envolvidos (resistência dos materiais, ações, etc) são variáveis aleatórias, caíram em desuso.

Para se ter uma abordagem mais clara do problema do dimensionamento de peças estruturais, têm sido

introduzidos, na medida do possível, conceitos probabilísticos nos critérios de dimensionamento.

Atualmente, no Brasil, as normas referentes ao dimensionamento das estruturas de concreto armado e aço já estão fundamentadas em critérios semi-probabilísticos, enquanto a norma referente ao dimensionamento de estruturas de madeira, cujo texto original data de 1951, ainda é baseada no Método das Tensões Admissíveis, estando em processo de revisão para adequá-la aos novos conceitos de verificação de segurança estrutural.

Estudos iniciais efetuados indicaram a necessidade de reflexão sobre vários aspectos, antes da transposição para a nova norma. Entre eles, o caso da solicitação de compressão normal às fibras. Não está previsto método brasileiro de ensaio para caracterizar a madeira face este tipo de solicitação, sendo o dimensionamento efetuado em função da resistência da madeira na compressão paralela às fibras, certamente uma aproximação insatisfatória.

Este trabalho apresenta os resultados obtidos em estudos efetuados com a finalidade de propor um método de ensaio para a caracterização da madeira na solicitação de compressão normal às fibras, e fornece subsídios para o estabelecimento de critério de dimensionamento para esta forma de solicitação.

1.2 Interesse e contextualização do estudo

A solicitação de compressão normal às fibras ocorre com maior assiduidade na região dos apoios da peças estruturais, com forças relativamente altas aplicadas em uma direção na qual a madeira apresenta menor resistência, comparada com a compressão paralela, em função de sua constituição anatômica.

O conhecimento da resistência da madeira na compressão normal às fibras é de fundamental importância para o dimensionamento de ligações, e em um sistema estrutural para pontes de madeira de utilização recente no exterior e praticamente inédito no Brasil: trata-se do tabuleiro protendido transversalmente, que consiste na união de peças de madeira, por intermédio de uma compressão transversal, estabelecendo um comportamento de placa.

O interesse deste estudo é fornecer informações a respeito da solicitação de compressão normal às fibras da madeira, tendo em vista o processo de revisão a que estão submetidas as normas "NBR-6230/80 - Ensaaios Físicos e Mecânicos de Madeiras" e NBR-7190/82 - Cálculo e Execução de Estruturas de Madeira".

1.3 Objetivo

O objetivo principal deste trabalho é propor um método de ensaio para caracterização da madeira na solicitação de compressão normal às fibras e fornecer subsídios para o estabelecimento do critério de dimensionamento de peças de madeira face a esta solicitação.

1.4 Estruturação do trabalho

No trabalho realizado foram feitos vários estudos com a finalidade de propor um método de ensaio para a compressão normal às fibras.

Após a revisão bibliográfica, são abordados, no capítulo 3, aspectos referentes à influência da geometria dos corpos-de-prova e do método de ensaio, nos resultados.

No capítulo 4, estão apresentados os estudos efetuados para definição da resistência da madeira na compressão normal às fibras.

É observado, no capítulo 5, o comportamento da madeira com a variação dos parâmetros direção e velocidade de carregamento.

No capítulo 6 são feitos estudos para estabelecer as dimensões do corpo-de-prova.

A velocidade do ensaio é definida a partir do capítulo 7.

O capítulo 8 apresenta a proposta de método de ensaio para a compressão normal às fibras.

No capítulo 9, são feitas algumas considerações a respeito do critério de dimensionamento para a compressão normal às fibras, e as principais conclusões do trabalho são apresentadas no capítulo 10.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A madeira, devido à sua constituição anatômica, apresenta comportamento peculiar com relação à resistência às solicitações mecânicas. Sua constituição faz com que seja mais apta a resistir a determinados tipos de solicitações. Não sendo um material isotrópico, a direção destas solicitações tem importância fundamental.

É necessário um bom conhecimento da estrutura interna da madeira para que se possa entender o comportamento de elementos estruturais deste material, quando submetidos às diferentes formas de solicitações mecânicas.

Por este motivo, esta revisão bibliográfica aborda, inicialmente, alguns aspectos referentes às peculiaridades específicas do material, para, posteriormente, focar mais diretamente o assunto compressão normal às fibras.

2.1 Constituição da madeira

Diversos autores já abordaram, de modo conveniente e abrangente, assuntos referentes à classificação botânica das árvores, sua fisiologia e crescimento, constituição química, e aspectos de sua estrutura microscópica e macroscópica. Podem ser citados, no tocante a livros,

GIORDANO (1951), KARLSEN (1967), KOLLMANN & CÔTÉ JR. (1968), TAYLOR et al. (1978), BODIG & JAYNE (1982). Vários pesquisadores da área de madeiras também apresentam interessantes resumos direcionados para os tópicos referentes as características voltadas à sua aplicação estrutural, podendo-se citar, entre autores brasileiros, HELLMEISTEIR (1973), ROCCO LAHR (1990) e MASCIA (1991).

Assim, este trabalho aborda apenas aspectos essenciais para a sua compreensão, apresentando resumo baseado nestes autores citados.

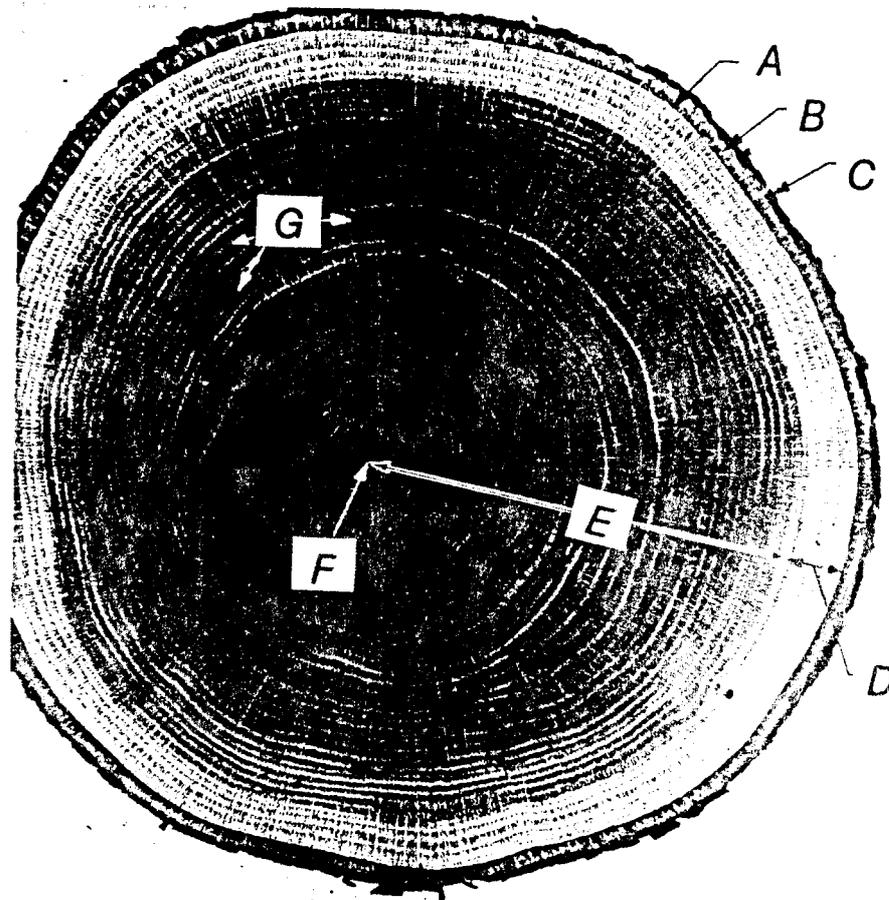
2.1.1 Estrutura macroscópica da madeira

Comparada com outros materiais utilizados na construção civil, a madeira se destaca pela maneira peculiar como é formada.

A árvore tem um crescimento vertical acompanhado de um crescimento transversal, devidos às novas camadas que se sobrepõem às mais antigas. A medula, parte central do tronco, resultante do crescimento vertical inicial, é geralmente mais fraca e defeituosa. Cada camada formada anualmente é conhecida como anel de crescimento. O conjunto de anéis de crescimento constitui o lenho da madeira. Este se apresenta recoberto pela casca da árvore, estando separados pela parte propriamente viva da árvore, o câmbio, camada muito delgada que origina os elementos anatómicos constituintes do lenho e da casca.

As camadas que constituem os anéis de crescimento não se desenvolvem uniformemente durante todo o ano. Inicialmente, é formada a madeira inicial, ou primaveril, apresentando células maiores, com paredes finas. A madeira tardia, ou de verão, ao contrário, é constituída por células menores, com paredes mais grossas. Este

crescimento diferenciado permite a distinção entre as camadas de crescimento anual. Em países com clima mais frio, por apresentarem estações no ano bem caracterizadas, existe uma maior diferenciação entre os anéis de crescimento do que o observado em nosso país.



- | | |
|--------------------|---------------------|
| A - camada cambial | E - cerne |
| B - casca interna | F - medula |
| C - casca externa | G - raios medulares |
| D - alburno | |

FIGURA 2.1 - Seção transversal de um tronco de árvore
Fonte: FOREST PRODUCTS LABORATORY (1987)

O lenho pode ser dividido em duas partes, no tocante

a funções fisiológicas da árvore. As camadas mais externas, o alburno, conduzem a seiva bruta das raízes da árvore até as folhas. Na parte central do lenho, conhecida como cerne, estão armazenadas as substâncias provenientes da seiva elaborada, não utilizadas pelas células no desenvolvimento da árvore. Por este motivo, a madeira do cerne é mais escura, mais densa, mais resistente ao ataque de fungos e insetos e menos permeável do que a madeira do alburno. Apresenta também maior resistência às solicitações mecânicas de compressão. Como o cerne nada mais é do que o alburno consolidado pela lenta deposição de substâncias da seiva elaborada ao longo dos anos, as espécies de madeira com crescimento mais lento geralmente apresentam o lenho constituído por maior porcentagem de cerne, do que espécies com crescimento mais acelerado, como, por exemplo, as mais comumente utilizadas em reflorestamento, dos gêneros *Pinus* e *Eucaliptus*.

2.1.2 Estrutura microscópica da madeira

Em uma árvore existem células com funções específicas referentes ao suporte físico, de armazenamento de substâncias e de transporte de seiva. Os principais tipos de células que constituem a madeira são os traqueídes, vasos, fibras e raios medulares. Árvores pertencentes à subdivisão botânica das gimnospermas apresentam diferenças nestes elementos em comparação com as da subdivisão das angiospermas.

As espécies de madeira da classe das coníferas (gimnospermas) são constituídas principalmente por traqueídes e raios medulares. Os traqueídes são células alongadas que constituem a maior parte da madeira das coníferas (em torno de 90%), com comprimento entre 3 e 5 mm e diâmetro entre 40 a 60 μm , sendo os principais

responsáveis pela resistência mecânica. Os raios medulares são constituídos por células curtas, se dispendo radialmente da casca até o centro das árvores. Os traqueídes e os raios medulares têm a função de transportar seiva. A figura 2.2 apresenta, esquematicamente, a estrutura microscópica das coníferas.

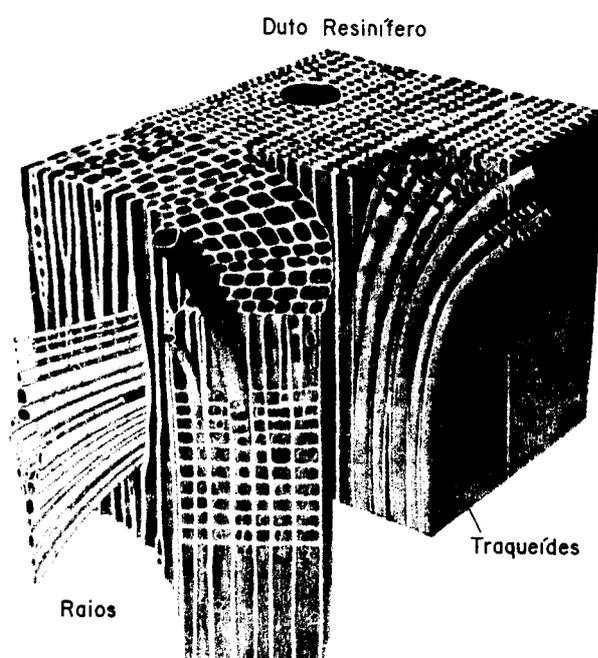


FIGURA 2.2 - Estrutura microscópica das coníferas
Fonte: TAYLOR et al. (1978)

As espécies de madeira da classe das dicotiledôneas (angiospermas) são constituídas principalmente por fibras, vasos e raios medulares. Os vasos tem diâmetro entre 0,02 a 0,5 mm, e são designados por poros da madeira quando observados em um corte transversal. Podem constituir de 20 até 50% da madeira. Assim como os raios medulares, têm a função de transportar seiva. As fibras são as principais responsáveis pela resistência mecânica, perfazendo em torno de 50% da madeira das dicotiledôneas. São células longas, com comprimento entre 0,7 a 1,4 mm,

apresentando paredes espessas. A figura 2.3 apresenta, esquematicamente, a estrutura microscópica das dicotiledôneas.

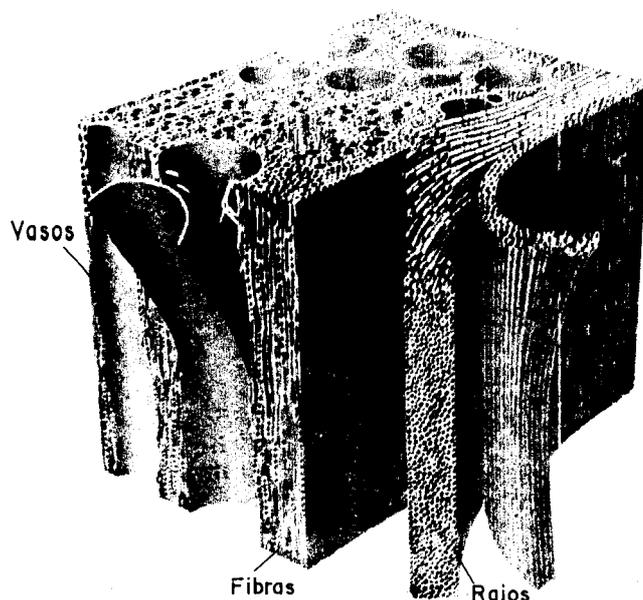


FIGURA 2.3 - Estrutura microscópica das dicotiledôneas
Fonte: TAYLOR et al. (1978)

2.2 Aspectos do comportamento da madeira na solicitação de compressão normal às fibras

Conforme já salientado, os elementos anatômicos fibras e traqueídes são os principais responsáveis pela resistência mecânica das dicotiledôneas e das coníferas, respectivamente. Doravante, quase sempre, ambos serão denominados fibras, indistintamente.

Conhecendo-se detalhes referentes à fisiologia e ao crescimento das árvores e a estrutura interna da madeira, pode-se admiti-la como um material ortotrópico, escolhendo os eixos de simetria elástica de modo conveniente, isto é, coincidentes com direções preferenciais da madeira.

As três direções principais de uma peça de madeira são:

- Longitudinal (L): direção paralela às fibras.
- Tangencial (T): direção tangente aos anéis de crescimento.
- Radial (R): direção dos raios, ao se considerar os anéis de crescimento como circulares.

Comumente, a direção longitudinal (L) é denominada direção paralela às fibras da madeira. As outras duas, radial (R) e tangencial (T), bem como outras perpendiculares à longitudinal, são denominadas por direções normais às fibras da madeira.

Na figura 2.4 estão definidas as direções principais e os planos definidos pelas mesmas, para uma peça retangular de madeira.

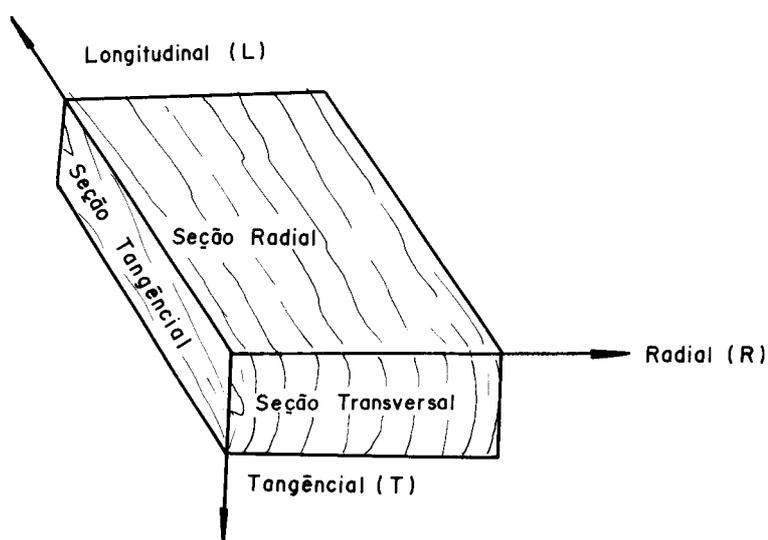


FIGURA 2.4 - Definição de seções e direções principais para uma peça retangular de madeira

Fonte: BODIG & JAYNE (1982)

O comportamento da madeira quando solicitada por compressão normal é bem distinto do que ocorre, por exemplo, nos casos de compressão paralela, tração paralela ou normal às fibras. Isto pode ser melhor compreendido analisando-se a estrutura interna do material.

Efetuada-se um ensaio de compressão normal às fibras em uma peça de madeira, verifica-se um trecho inicialmente linear no diagrama tensão x deformação. Posteriormente, se observa um aumento proporcionalmente maior nas deformações em relação às tensões. As deformações atingem valores grandes sem a ocorrência de ruptura.

Segundo HELLMEISTER (1973), "após ser atingido o limite de deformação elástica, as fibras e vasos ou traqueídes admitem grande deformação plástica e começam a ser facilmente esmagados".

MADSEN et al. (1982) sugerem que o mecanismo de ruptura na solicitação de compressão normal às fibras pode ser visualizado, num modelo muito simplificado, como esmagamento das paredes das células, conforme figura 2.5. Salientam que, devido à presença de nós ou outras características de crescimento, o mecanismo de ruptura real é muito mais complicado.

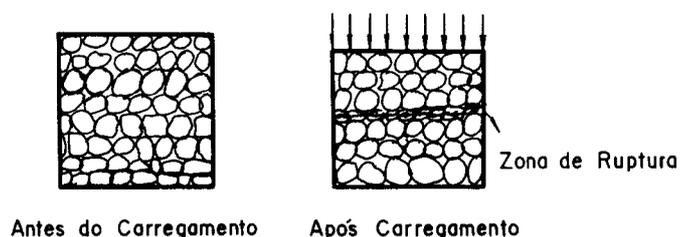


FIGURA 2.5 - Modelo da estrutura da madeira e modo de ruptura da estrutura interna em compressão normal às fibras

Fonte: MADSEN et al. (1982)

Na maioria dos casos, a orientação mais crítica para a solicitação de compressão normal às fibras é a aplicada sobre a seção radial, isto é, na direção tangencial aos anéis de crescimento. BOLZA & KLOOT (1963) apresentam banco de dados de propriedades mecânicas de madeiras australianas, onde este fato pode ser constatado: poucas espécies apresentam maior resistência para o caso de carga aplicada na direção radial e, quando isto ocorre, existe pequena diferença entre as duas situações.

2.3 Normalização a respeito da solicitação de compressão normal às fibras

São apresentados no item 2.3.1 os métodos de ensaio para caracterização da madeira na solicitação de compressão normal às fibras. O item 2.3.2 apresenta aspectos de critérios de dimensionamento para esta forma de solicitação.

2.3.1 Métodos de ensaios para caracterização

A ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), não prevê no Método Brasileiro "NBR-6230 - Ensaios Físicos e Mecânicos de Madeiras", de 1980, denominação atual do MB-26, de 1940, o ensaio para caracterização da madeira para o caso de compressão normal às fibras.

O texto preliminar proposto pelo LABORATÓRIO DE MADEIRA E DE ESTRUTURAS DE MADEIRA (LAMEM) em 1987, "Madeira - Determinação de suas Características", para a revisão e atualização dos "Métodos adotados no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) para o Estudo das Madeiras Nacionais", BROTERO (1929), que é a base da

atual NBR-6230, apresenta método para o ensaio de compressão normal às fibras. "Para se determinar a resistência e o módulo de elasticidade na compressão normal às fibras são utilizados corpos-de-prova prismáticos de seção transversal nominal 50 x 50 mm. O comprimento nominal do corpo-de-prova é 150 mm. A aplicação de carga é feita através de uma peça metálica considerada rígida de 50 x 100 mm, posicionada sobre o terço médio do corpo-de-prova. O corpo-de-prova é apoiado sobre um bloco de aço de 50 x 50 x 150 mm. Dois relógios comparadores são instalados nos dois lados do corpo-de-prova". A figura 2.6 apresenta o esquema deste ensaio.

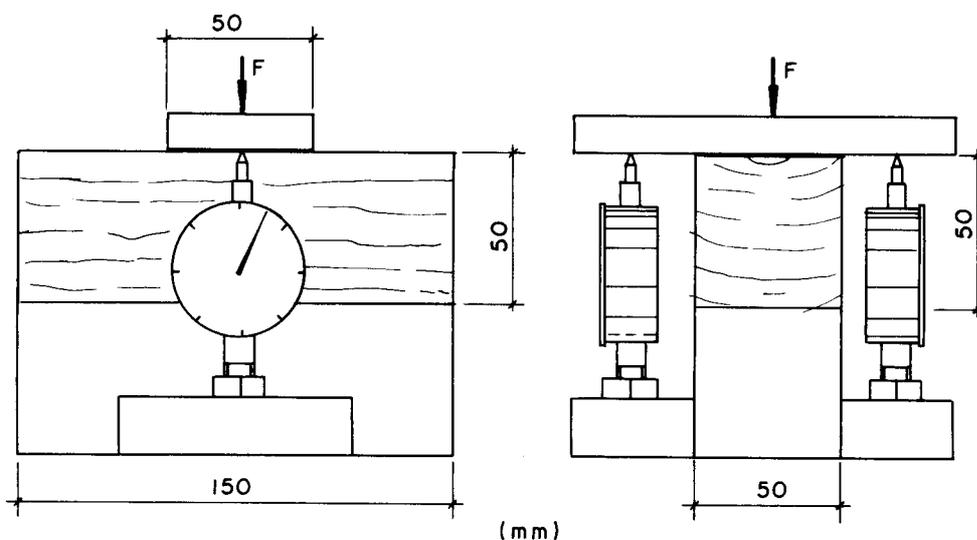


FIGURA 2.6 - Ensaio de compressão normal às fibras
Fonte: LAMEM (1987)

A velocidade de carga empregada neste ensaio é 10 MPa por minuto. Não é prevista direção preferencial para a aplicação da carga. O módulo de resistência à compressão normal às fibras é estimado como igual à razão entre a carga que provoca uma deformação específica igual a 1% (0,5 mm) e a área de contato entre a peça metálica superior e o corpo-de-prova. Os ensaios são feitos em corpos-de-prova de madeira verde e de madeira seca ao ar.

A AMERICAN SOCIETY FOR TESTING E MATERIALS (ASTM) apresenta em 1993, na norma "D143-83 - Standard Methods of Testing Small Clear Specimens of Timber", método de ensaio com corpo-de-prova e disposição análogos ao mostrado na figura 2.6. Estipula controle da velocidade de deformação (0,3 mm/minuto) e direção para aplicação da carga (na direção tangencial). Os valores obtidos são a tensão que provoca deformação igual a 2,5 mm e a tensão no limite de proporcionalidade.

A COMISSÃO PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS (COPANT) apresenta em 1972 método de ensaio COPANT-466, idêntico ao da ASTM, para a compressão perpendicular às fibras da madeira.

A INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO), apresenta na norma ISO-3132, de 1975, método de ensaio que utiliza corpos-de-prova com seção transversal quadrada com 20 mm de lado e comprimento, medido na direção das fibras, entre 30 e 60 mm. Se os anéis de crescimento da madeira ensaiada tiverem espessura superior a 4 mm, a seção transversal pode ser aumentada de forma que o corpo-de-prova tenha, no mínimo, 5 anéis. O objetivo deste ensaio é determinar, por intermédio do diagrama carga x deformação, a resistência convencional (σ_y), considerada como a tensão no ponto onde a tangente do ângulo formado pela tangente à curva e o eixo das cargas seja 50% maior do que o seu valor no trecho reto do diagrama (figura 2.8). O ensaio deve ser conduzido com controle de velocidade de carga ou deformação, de modo que a resistência convencional seja atingida em $1,5 \pm 0,5$ minutos após o começo do carregamento. O carregamento é efetuado nas direções radial e tangencial. O teor de umidade deve ser determinado e a resistência convencional deve ter o seu valor ajustado, quando necessário, para um teor de umidade igual a 12%. A figura 2.7 apresenta as dimensões do corpo-de-prova, esquema do ensaio, e modo de determinar a resistência convencional.

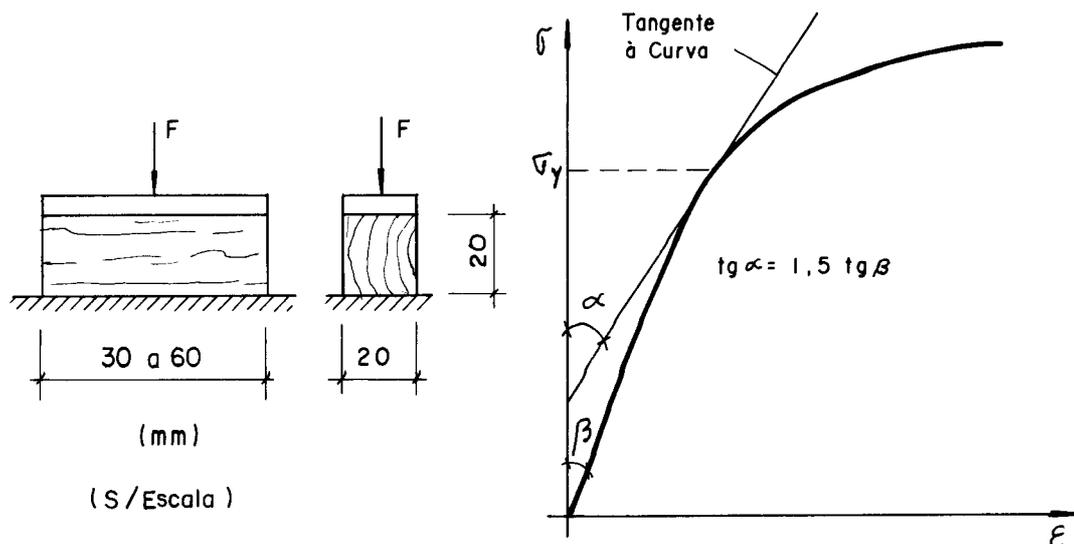


FIGURA 2.7 - Esquema do ensaio e determinação da resistência convencional (σ_y) da ISO-3132

2.3.2 Critérios de dimensionamento

Uma característica peculiar do dimensionamento para a sollicitação de compressão normal às fibras é que, freqüentemente, existe uma contribuição adicional para a resistência das peças, pois a carga de esmagamento se distribui para as regiões adjacentes à de aplicação do esforço.

Este efeito é considerado majorando-se a tensão básica definida em ensaios de caracterização, de acordo com parâmetros geométricos do carregamento (extensão de aplicação das cargas, distância do fim do carregamento até a borda da peça, etc). Assim, a tensão atuante, definida pela área de contato na região de aplicação do esforço, é comparada com um valor majorado de resistência do material.

Como não estão previstos ensaios para caracterização da madeira na sollicitação de compressão normal às fibras

no método brasileiro NBR-6230 (1980), os parâmetros necessários ao dimensionamento são obtidos em função da sua resistência à compressão paralela às fibras. A norma da ABNT, de 1982, "NBR-7190-Cálculo e Execução de Estruturas de Madeira", atual denominação da NB-11, datada de 1951, estipula que as tensões atuantes de compressão normal às fibras não deverão ultrapassar o seguinte valor:

$$\bar{\sigma}_n = 0,06 \sigma_C \gamma'$$

sendo:

σ_C = limite de resistência da madeira verde na compressão paralela às fibras

γ' = coeficiente de majoração

Quando a extensão da carga aplicada, medida na direção das fibras, for maior ou igual a 150 mm, este coeficiente de majoração é igual a 1. Se a extensão da carga aplicada for menor que 150 mm, e esta estiver afastada pelo menos 75 mm da extremidade da peça de madeira, este coeficiente é fornecido pela tabela 1.1:

TABELA 1.1 - Coeficiente γ' da norma NBR-7190

Extensão (mm)	10	20	30	40	50	75	100	≥150
γ'	2,00	1,70	1,55	1,40	1,30	1,15	1,10	1,00

A NATIONAL FOREST PRODUCTS ASSOCIATION (NFOPA) apresenta em 1991, na norma "NDS - NATIONAL DESIGN SPECIFICATIONS FOR WOOD CONSTRUCTION", critério estipulando o valor da resistência de cálculo para

compressão perpendicular às fibras não deve ser modificado no caso da carga de esmagamento estar situada na extremidade da peça, e quando a extensão de aplicação da carga, medida na direção das fibras, for igual ou superior a 150 mm, independentemente da localização da carga em relação à extremidade da peça. Quando a extensão do esmagamento for inferior a 150 mm e o final da aplicação da carga estiver distante pelo menos 75 mm da extremidade da peça, é permitida uma majoração deste valor, multiplicando-o pelo coeficiente C_b :

$$C_b = \frac{l_b + 0,375}{l_b} \left\{ \begin{array}{l} l_b \text{ (em polegadas) é a extensão} \\ \text{de aplicação da cargas medida} \\ \text{na direção paralela às fibras} \end{array} \right\}$$

Os valores de cálculo para a resistência à compressão normal às fibras, fornecidos pela NDS (1991), são baseados em cargas que provocam deformação igual a 1 mm, ou 0,5 mm no caso de situações onde a deformação é crítica. Estes valores são modificados por coeficientes que consideram as condições de umidade e temperatura nas quais as peças serão utilizadas.

A norma da CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION (CSA), de 1989, "CSA-086 - ENGINEERING DESIGN IN WOOD", modifica a resistência da madeira na compressão normal às fibras por coeficientes que consideram a umidade e tratamentos (preservativos ou contra fogo) utilizados na madeira. A resistência é majorada pelo coeficientes K_B , dado na tabela 2.2, em função da extensão de aplicação de carga, se são satisfeitas condições geométricas análogas às da NDS (1991).

TABELA 2.2 - Coeficiente K_B da norma CSA-086

extensão (mm)	≤12,5	25	50	75	100	≥150
K_B	1,75	1,40	1,20	1,13	1,10	1,00

Da mesma forma, a norma da STANDARDS ASSOCIATION OF AUSTRALIA para estruturas de madeira , versão "draft", fornece o coeficiente (K_7) de majoração da resistência para a compressão normal às fibras, dado na tabela 2.3, em função da geometria do carregamento. Esta resistência também é modificada por coeficientes que consideram a duração da carga, a umidade e a temperatura.

TABELA 2.3- Coeficiente K_7 da norma australiana

extensão (mm)	12	25	50	75	125	≥ 150
K_7	1,85	1,60	1,30	1,15	1,05	1,00

Para situações de carregamento análogas às anteriores, a norma BS-5268 da BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI), de 1991, fornece o coeficiente (K_4) de majoração dado na tabela 2.4, em função da extensão do carregamento. Os valores de resistência também são modificados por coeficientes que consideram a condição de umidade e tempo de duração da carga.

TABELA 2.4 - Coeficiente K_4 da norma BS-5268

extensão (mm)	10	15	25	40	50	75	100	≥ 150
K_4	1,74	1,67	1,53	1,33	1,20	1,14	1,10	1,00

O EUROCODE N^o 5 "COMMON UNIFIED RULES FOR TIMBER STRUCTURES", versão draft, apresentado pela COMMISSION OF

THE EUROPEAN COMMUNITIES (1991) estipula que a carga atuante pode ser aumentada se o comprimento de carregamento (l) é pequeno. Neste caso, a resistência de cálculo pode ser majorada pelo coeficiente $k_{c,90}$, cujos valores estão especificados na tabela 2.5, em função dos parâmetros "a" (distância do final do carregamento até a extremidade da peça), " l " (extensão de aplicação da carga, medida na direção das fibras) e " l_1 " (distância entre o final do carregamento considerado e outro carregamento, porventura existente). A figura 2.8 apresenta os parâmetros geométricos utilizados para determinar o coeficiente de majoração. A resistência também é modificada por coeficiente que considera o tempo de duração do carregamento e o teor de umidade.

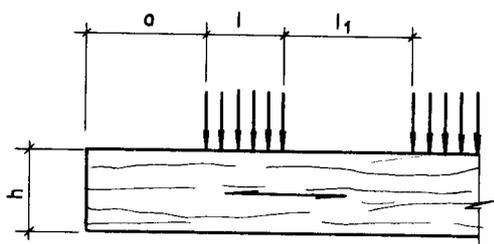


FIGURA 2.8 - Parâmetros para determinar o coeficiente $k_{c,90}$
 Fonte: EUROCODE N^o 5 (1991)

TABELA 2.5 - Valores do Coeficiente $k_{c,90}$ do Eurocode n^o 5

Condições geométricas	Coeficiente $k_{c,90}$		
	$l_1 < 150 \text{ mm}$	$l_1 \geq 150 \text{ mm}$	
		$a \geq 100 \text{ mm}$	$a < 100 \text{ mm}$
$l \geq 150 \text{ mm}$	1	1	1
$150 \text{ mm} > l \geq 15 \text{ mm}$	1	$1 + \frac{150-l}{170}$	$1 + \frac{a(150-l)}{17000}$
$15 \text{ mm} > l$	1	1,8	$1 + \frac{a}{125}$

A norma DIN 1052, do DEUTSCHE INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN), de 1988, estipula que, se a distância do fim da aplicação da carga até a borda da peça for superior a 100 mm (no caso de peça com altura maior que 60 mm) ou a 75 mm (no caso de peça com altura menor ou igual a 60 mm), e se a distância do carregamento e outro porventura existente for superior a 150 mm, a resistência à compressão normal às fibras pode ser majorada pelo coeficiente dado em função da extensão de aplicação do carregamento (1) medida na direção das fibras, não considerando valores superiores a 1,8:

$$k_{D\perp} = \left(\frac{150}{l} \right)^{0,25}$$

2.4 Trabalhos técnicos sobre o assunto

BODIG (1965a) apresenta trabalho enfocando o efeito da anatomia da madeira na relação tensão x deformação, para o caso da solicitação de compressão transversal às fibras. Utilizou quatro espécies de madeira, selecionadas de acordo com suas características anatómicas, cada uma representando um tipo diferente. Os corpos-de-prova ensaiados tinham dimensões iguais a 20x 12,5x 12,5 mm, nas direções longitudinal, radial e tangencial, respectivamente. Aponta a não linearidade do diagrama tensão x deformação, para valores baixos de tensão, creditando esta distorção a problemas presentes nos ensaios, tais como irregularidades na superfície e não paralelismo entre faces dos corpos-de-prova. Salienta que a direção das cargas em relação aos anéis de crescimento para determinada espécie pode ser mais importante do que

diferenças entre espécies, para efeito de classificação das curvas tensão x deformação. Observa mecanismos diferentes de ruptura, para cargas aplicadas nas direções radial e tangencial: no primeiro caso, ocorre ruptura inicial nas camadas mais fracas dos anéis de crescimento que, com a continuidade da compressão, se propaga para as camadas mais resistentes; no segundo caso, ocorre ruptura das camadas mais resistentes dos anéis de crescimento, com mecanismo semelhante ao de colunas esbeltas.

BODIG (1965b) apresenta trabalho a respeito da influência das características de crescimento nas propriedades mecânicas da espécie de madeira Douglas-Fir (*Pseudotsuga menziesii*), para o caso da compressão na direção radial. Utilizou corpos-de-prova com dimensões iguais a 10 x 25 x 25 mm, nas direções longitudinal, radial e tangencial, respectivamente. Concluiu que as quatro propriedades mecânicas observadas (tensão no limite de proporcionalidade, tensão máxima, deformação específica para carga máxima e módulo de elasticidade) não têm relação com as características de crescimento analisadas (peso específico, densidade de anéis de crescimento e a porcentagem de madeira tardia presente nos anéis de crescimento).

BODIG (1966) apresenta trabalho realizado onde estudou a influência de cinco fatores (umidade, altura do corpo-de-prova, velocidade de carga, direção das cargas e espécies de madeira) em várias propriedades de elasticidade e resistência da madeira na compressão transversal (tensão no limite de elasticidade, tensão máxima, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, deformação específica no limite de elasticidade e deformação específica na tensão máxima). Utilizou corpos-de-prova com dimensões 10 x 25 x 25 mm, nas direções longitudinal, tangencial e radial, respectivamente, exceto no estudo da influência da

altura. Para o estudo da influência do teor de umidade foram utilizados três níveis: madeira seca, madeira seca ao ar (teor de umidade variando entre 10 e 18 por cento) e madeira verde. Conclui que o teor de umidade modifica significativamente o diagrama tensão x deformação após o trecho linear, e todas as propriedades examinadas, exceto a deformação específica na tensão máxima. Para o estudo da influência da altura do corpo-de-prova utilizou a espécie Douglas-Fir, seca ao ar, carga na direção radial, sendo alterada apenas a dimensão na direção radial (foram utilizadas alturas iguais a 25 mm, 37,5 mm, 50 mm e 75 mm para os corpos-de-prova). Concluiu que todas as propriedades foram modificadas significativamente pela variação na altura dos corpos-de-prova. O módulo de elasticidade foi a propriedade mais influenciada, verificando-se um acréscimo no seu valor a medida que se aumenta a altura do corpo-de-prova. Observa que a influência da altura pode ser devido a distribuição não uniforme das deformações.

KUNESH (1968) investigou efeitos de geometria do carregamento (dimensão do corpo-de-prova na direção do carregamento e área de aplicação da carga) e do teor de umidade em características de elasticidade e de resistência da madeira na solicitação de compressão transversal (módulo de elasticidade, tensão no limite de proporcionalidade e tensões para deformações iguais a 2,5; 5 e 10 por cento). Utilizou duas espécies de madeira e três níveis para os teores de umidade, aplicando as cargas na direção radial. Em uma primeira fase do trabalho, aplicou as cargas na superfície total dos corpos-de-prova, variando a altura dos mesmos e a área da superfície de carregamento. Em uma segunda fase, realizou ensaios com carregamento parcial, semelhantes ao da ASTM, variando a altura dos corpos-de-prova. Concluiu que todas as propriedades analisadas são alteradas pelos fatores investigados. A tensão no limite de proporcionalidade

diminui com o aumento do teor de umidade, da altura e da área de carregamento. O módulo de elasticidade aumenta com o acréscimo da altura do corpo-de-prova, e diminui com o aumento da umidade e da área de carregamento. A geometria do corpo-de-prova afeta as propriedades, uma vez que, fixada a altura, áreas menores de carregamento proporcionam a obtenção de valores maiores para as mesmas.

KENNEDY (1968) estudou a influência de características anatômicas (orientação dos anéis em relação à direção de aplicação das cargas, porcentagem de madeira mais resistente nos anéis de crescimento, peso específico, volume de raios e diferença de densidade dentro dos anéis de crescimento) em características mecânicas (módulo de elasticidade e tensão no limite de proporcionalidade). Utilizou nove espécies de madeira com teor de umidade entre 4 e 5,5 por cento. Os corpos-de-prova utilizados apresentam dimensões iguais a 20 x 20 x 50 mm, nas direções radial, tangencial e longitudinal, respectivamente. Obteve resultados que indicam que a direção das cargas em relação aos anéis de crescimento e o peso específico influenciam fortemente as duas propriedades mecânicas analisadas. Salienta que não é possível generalizar o comportamento, tanto das coníferas como das dicotiledôneas, de forma que o método de ensaio da ASTM, indicando a direção das cargas como tangencial, pode resultar em valores máximos para determinadas espécies, e mínimos para outras.

BODIG (1969) analisou experimentalmente a contribuição de áreas adjacentes à de carregamento na resistência ao esmagamento. Realizou ensaios de esmagamento com cargas aplicadas em faixas do comprimento da peça (sendo carregada em toda a sua largura), e cargas aplicadas por chapas de esmagamento quadradas afastadas das arestas da face carregada. Observou que a

contribuição das áreas adjacentes é muito significativa, sendo que o aumento da capacidade de resistência é maior para o caso das cargas aplicadas pelas chapas quadradas.

BENDTSEN et al. (1978), BENDTSEN & GALLIGAN (1979a) e BENDTSEN & GALLIGAN (1979b) salientam que a inexistência de rupturas ou deformações excessivas registradas, devidas à compressão perpendicular às fibras, em estruturas convencionais, sugerem que o valor da tensão admissível corrente nos Estados Unidos, baseado no limite de proporcionalidade, é muito conservativo. Desenvolvem um procedimento para caracterizar o comportamento da madeira face a esta solicitação, utilizando dados já existentes, obtidos pelo método de ensaio da ASTM; menores restrições são impostas para o caso de compressão perpendicular às fibras, quando deformações maiores podem ser aceitas.

FERGUS et al. (1981) apresentam trabalho sobre as tensões de esmagamento recomendadas para o projeto de construções leves de madeira. Utilizaram três configurações diferentes de ensaio de compressão perpendicular às fibras da madeira: análogo ao da ASTM, compressão entre madeira e madeira, e compressão metal contra madeira. Os resultados evidenciaram diferença significativa entre o ensaio da ASTM e o caso de compressão entre madeira e madeira, caso muito comum na prática. Salientam que os deslocamentos estruturais devidos ao esmagamento da madeira por compressão normal são de menor magnitude do que os provenientes por outras causas.

MADSEN et al. (1982) tecem críticas ao método de ensaio da ASTM, afirmando que as propriedades obtidas são corretas apenas para configurações de carregamento semelhantes à do ensaio. Utilizam corpo-de-prova com dimensões iguais a 38 mm e 90 mm nas direções

transversais, e 145 mm na direção longitudinal, com toda a área carregada. Salientando que o material apresenta comportamento dúctil, e que é difícil definir um estado limite último, definem a tensão de escoamento σ_y conforme mostrado no diagrama tensão x deformação da figura 2.9.

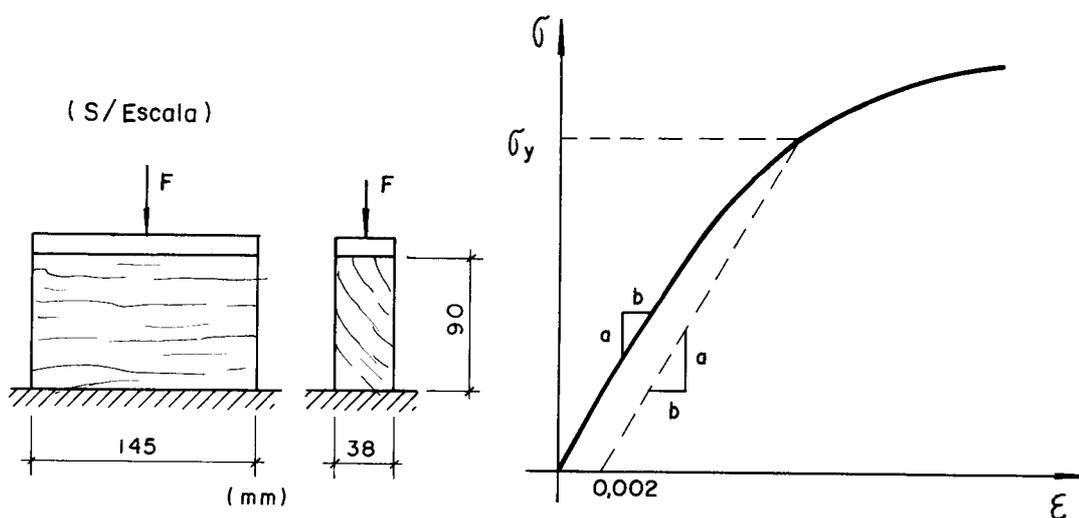


FIGURA 2.9 - Corpo-de-prova utilizado e resistência à compressão normal convencional
Fonte: MADSEN et al. (1982)

Apresentam critério de dimensionamento, baseado em estados limites, que considera a contribuição das áreas adjacentes à do carregamento. Neste critério, se a chapa de esmagamento cobre o comprimento total da peça, o comprimento da chapa é dado por:

$$l = \frac{P_y}{\sigma_y b}$$

sendo l o comprimento da chapa na direção das fibras, P_y a carga de dimensionamento, b a largura da peça de madeira e σ_y a tensão de escoamento definida anteriormente. Se a chapa não cobre o comprimento total

da peça de madeira (que possui altura D), isto é, existem as distâncias L_1 e L_2 das bordas da chapa de carregamento até as bordas da peça, o seu comprimento l pode ser reduzido de $L_1/4$ (mas não mais do que $D/4$) e de $L_2/4$ (mas não mais do que $D/4$). Este comprimento reduzido l_r não deve ser menor do que $l/3$. A figura 2.10 permite visualização gráfica deste critério, que foi proposto por MADSEN (1989) para ser incluído no "CIB W18 - Structural Timber Design Code".

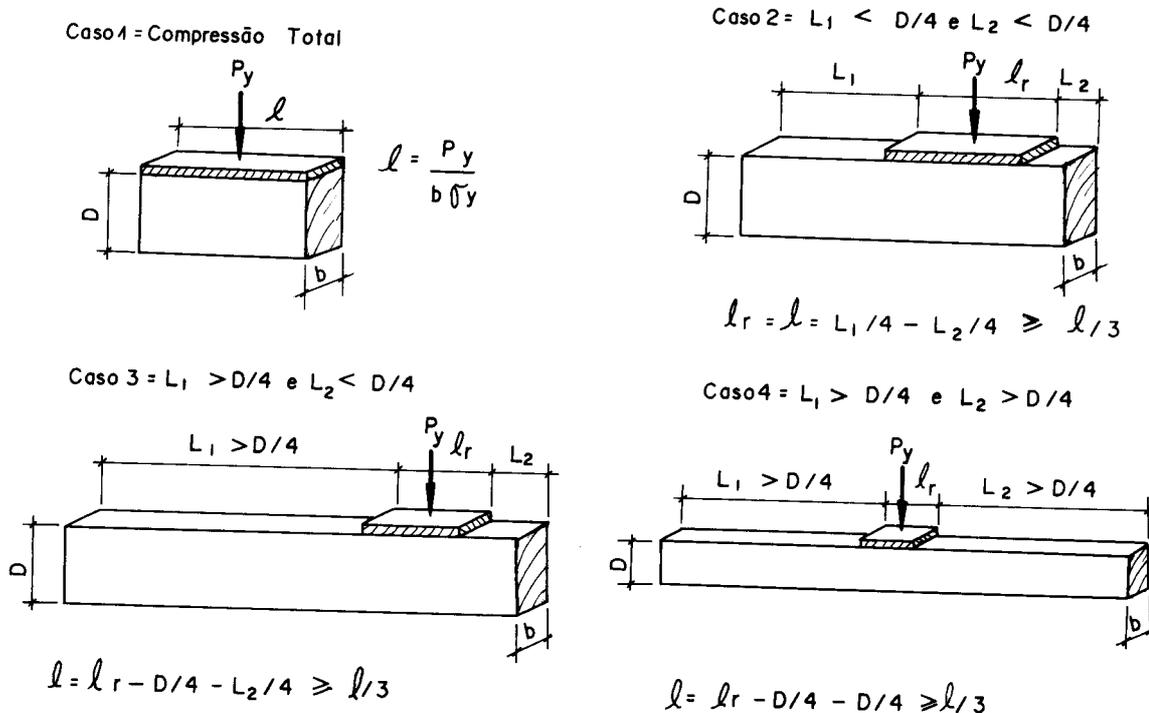


FIGURA 2.10 - Critério proposto por Madsen

Fonte: MADSEN (1989)

BODIG & JAYNE (1982) observam que o método de ensaio da ASTM para compressão perpendicular às fibras foi desenvolvido em torno do ano de 1900, com o intuito de simular o apoio de uma viga de madeira. Salientam que os resultados obtidos através deste ensaio não devem ser usados para determinar as características reais da

madeira solicitada por compressão normal às fibras, pois a resistência adicional às deformações ao longo do fim da chapa de carregamento causa comportamento diferente ao que o corpo-de-prova teria caso sua superfície estivesse totalmente carregada. Concluem que, por causa das características peculiares deste ensaio de compressão normal, os resultados obtidos têm utilidade limitada, exceto com a finalidade de comparar espécies, o que é um infortúnio, pois o conhecimento da resistência real da madeira para o caso de compressão transversal às fibras é essencial em várias utilizações estruturais.

JOHNSON (1983) realizou trabalho com o objetivo de determinar características referentes à compressão normal em madeira laminada, que não apresenta direção preferencial para os anéis de crescimento, em comparação com o método de ensaio da ASTM que especifica que a carga deve ser aplicada apenas paralela aos anéis de crescimento.

HELLMEISTER (1986) apresentou estudo desenvolvido a respeito da "Metodologia do ensaio de peças de madeira à compressão normal às fibras", estudando a diferença existente no carregamento total ou parcial do corpo-de-prova, e a influência do tamanho da peça de madeira na sua resistência, tendo obtido as correlações existentes em cada caso, para a espécie Eucalipto Citriodora (*Eucaliptus citriodora*).

WOLCOTT et al. (1989) afirmam que o método de ensaio da ASTM para compressão perpendicular às fibras não mede compressão pura. Realizaram ensaios utilizando corpos-de-prova de madeira e de acrílico, de seção quadrada com aresta igual a 20 mm, e altura variando entre 3 e 40 mm, com o objetivo de avaliar a influência de características macroscópicas dos corpos-de-prova e de procedimentos de ensaio. Salientam que a qualidade das superfícies de aplicação das cargas dos corpos-de-prova (rugosidade e

não paralelismo entre as faces) pode ter maior influência no resultado do ensaio do que a excentricidade na aplicação da carga. Nos ensaios de compressão pura efetuados com corpos-de-prova de acrílico foi observado, da mesma forma que o ocorrido para o caso de corpos-de-prova de madeira, que o módulo de elasticidade aumenta com o acréscimo na altura do corpo-de-prova, e que a tensão de escoamento não é afetada por este motivo.

FUSCO & ALMEIDA (1989) afirmam que a tensão determinada a partir do ensaio de compressão normal proposto pelo LAMEM (1987) não pode representar a resistência à compressão normal às fibras da madeira. Salientam que ensaios simplificados desta natureza surgiram em época na qual haviam muitas dificuldades para realizar ensaios mecânicos, devido à pouca disponibilidade de laboratórios, fazendo com que fossem imaginados ensaios simplificados nos próprios canteiros de obras, com a finalidade de controle de qualidade dos materiais empregados, afirmando que o funcionamento de um dormente de madeira sugere o ensaio de compressão transversal com carga parcial. Concluem que o ensaio indireto de compressão normal é, na realidade, um ensaio de flexão e que, por melhores que possam ser as correlações dos seus resultados com os ensaios diretos, nos quais as tensões atuantes são conhecidas sem a necessidade de emprego de teorias baseadas em hipóteses, não é aceitável pretender caracterizar a madeira por meio de tal ensaio.

ALMEIDA (1990) verificou a existência de três modos de ruptura em peças submetidas à compressão normal às fibras, caracterizados de acordo com a orientação da carga em relação aos anéis de crescimento. Observou, em ensaios efetuados, que as peças comprimidas têm rupturas dúcteis, precedidas de compactação do material, mas que, no caso de compressão oblíqua em relação às direções radial e tangencial, ocorrem rupturas frágeis.

FELDBORG (1991) apresenta trabalho a respeito da determinação de propriedades mecânicas da madeira em peças com tamanho estrutural. No tocante ao caso de compressão normal às fibras, utilizou corpos-de-prova obtidos por laminação, tendo seção transversal com dimensões iguais a 175 mm na direção longitudinal e 115 mm na direção transversal às fibras, e altura igual a 261 mm. Os ensaios foram efetuados para duas condições distintas de aplicação do carregamento, efetuado em toda a seção transversal: carga centrada e carga com excentricidade igual a 10 mm, na direção transversal, não tendo obtido diferenças significativas em valores de resistência e de rigidez. Não verificou ruptura para deformações iguais a 3%, sugerindo uma resistência convencional (σ_{max}), definida como a tensão que provoca deformação específica igual a $0,01 + \sigma_{max}/E$, conforme figura 2.11. O módulo de elasticidade E é a inclinação da linha 1, determinado no trecho compreendido entre valores de tensões iguais a $0,1 \sigma_{max}$ e $0,4 \sigma_{max}$.

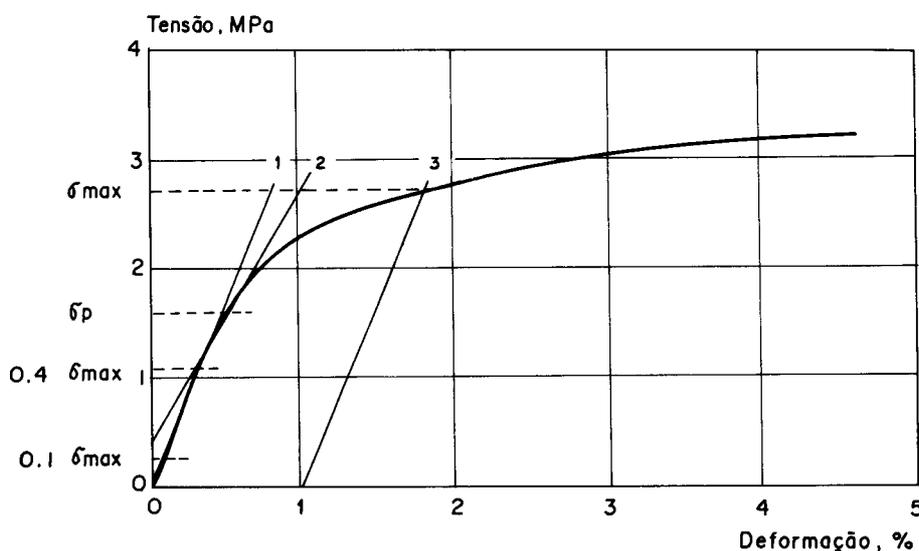


FIGURA 2.11 - Diagrama tensão x deformação

Fonte: FELDBORG (1991)

FUSCO (1993) apresenta "Uma proposta de normalização

das resistências da madeira estrutural" indicando que a resistência à compressão normal às fibras deve "ser determinada em um ensaio de compressão uniforme, com duração total de 3 a 8 minutos, em corpos-de-prova de seção quadrada de 5 cm de lado e com comprimento de 10 cm", comentando que "usualmente o corpo-de-prova pode ser obtido pela superposição de dois blocos cúbicos de 5 cm de aresta".

2.5 Considerações finais

Na avaliação da bibliografia consultada verificou-se a existência de duas formas antagônicas para os métodos de ensaio de compressão normal às fibras da madeira. Os métodos de ensaio da ASTM e COPANT especificam que o ensaio deve ser realizado com compressão parcial do corpo de prova, enquanto que o da ISO especifica compressão total.

A avaliação da bibliografia consultada, seja a nível de normalização, seja no que se refere a artigos técnicos, permite admitir a plena validade dos objetivos deste trabalho, conforme o que consta no item 1.3.

3 EXPERIMENTAÇÃO PRELIMINAR PARA DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA DO CORPO-DE-PROVA

Com o objetivo de estabelecer a geometria do corpo-de-prova para caracterizar a madeira na solicitação de compressão normal às fibras, foi desenvolvida experimentação para analisar a influência de alguns fatores geométricos que podem ter influência nos resultados obtidos nos ensaios.

Em uma série inicial de ensaios, cujos resultados estão apresentados no item 3.1, foi verificada a diferença existente entre os resultados obtidos em ensaios utilizando corpos-de-prova com carregamento total e parcial.

O item 3.2 apresenta os resultados obtidos em ensaios efetuados com o objetivo de analisar a influência da altura e comprimento do corpo-de-prova, assim como a forma utilizada para a medição das deformações ocorridas.

3.1 Compressão parcial ou compressão total?

A primeira dúvida surgida quando da revisão da literatura foi referente ao esquema de ensaio para caracterizar a madeira na solicitação de compressão normal às fibras.

Apesar de não estarem previstos no Método NBR-6230(1980), ensaios para caracterização da madeira face a esta solicitação foram introduzidos entre os de rotina do Instituto de Pesquisa Tecnológica (IPT), sendo efetuados

nos moldes do proposto pela ASTM, segundo HELLMEISTER (1983). Desta forma, já existe, embora incipiente, banco de dados de ensaios para espécies de madeira nacionais, com resultados obtidos por intermédio de ensaios com compressão parcial na face de carregamento do corpo-de-prova, como os citados por NOGUEIRA (1991) e BORTOLETTO Jr. (1993).

O texto preliminar proposto pelo LAMEM (1987), "Madeira - Determinação de suas Características" , para a revisão e atualização dos métodos de ensaios do IPT para o estudo das madeiras nacionais, mantém o procedimento tradicional de carregar parcialmente o corpo-de-prova, sendo adotado como módulo de resistência à compressão normal às fibras a tensão que provoca deformação específica igual a 1%. Também não é especificada direção preferencial, em relação aos anéis de crescimento, para aplicação das cargas.

Aproveitando programa de caracterização de espécies de madeira do Estado de Roraima, desenvolvido no LaMEM, em 1991, no qual os ensaios de compressão normal às fibras foram realizados nos moldes do método de ensaio proposto pelo LaMEM (1987), foi conduzida experimentação com o objetivo de verificar a diferença existente entre os resultados obtidos em ensaios com compressão parcial e compressão total da face de aplicação de carga do corpo-de-prova.

3.1.1 Procedimentos adotados

De 34 peças de madeira de diversas espécies, das quais haviam sido extraídos 34 corpos-de-prova utilizados no programa de caracterização, com dimensões nominais de 50 x 50 x 150 mm, sendo esta última dimensão medida na direção das fibras, foram também obtidos 34 corpos-de-prova cúbicos, com arestas de dimensões nominais iguais a 50 mm, constituindo 34 pares de corpos-de-prova. A seguir

estão relacionadas as espécies utilizadas, com os pesos específicos (para teor de umidade igual a 12%) das peças de madeira dos quais foram obtidos os pares:

- par 01: Casca Grossa (*Vochysia spp*) - $\rho_{12} = 7,9 \text{ kN/m}^3$
 02: Ipê (*Tabebuia spp*) - $\rho_{12} = 10,6 \text{ kN/m}^3$
 03: Quarubarana (*Erisma uncinatum*) - $\rho_{12} = 7,8 \text{ kN/m}^3$
 04: Quarubarana (*Erisma uncinatum*) - $\rho_{12} = 7,6 \text{ kN/m}^3$
 05: Ipê (*Tabebuia spp*) - $\rho_{12} = 11,6 \text{ kN/m}^3$
 06: Peroba do Norte (*Goupia glabra*) - $\rho_{12} = 8,8 \text{ kN/m}^3$
 07: Peroba do Norte (*Goupia glabra*) - $\rho_{12} = 8,8 \text{ kN/m}^3$
 08: Angelim Pedra (*Hymenolobium petraeum*) - $\rho_{12} = 7,3 \text{ kN/m}^3$
 09: Cedro Amargo (*Cedrela odorata*) - $\rho_{12} = 5,3 \text{ kN/m}^3$
 10: Cedro Amargo (*Cedrela odorata*) - $\rho_{12} = 5,0 \text{ kN/m}^3$
 11: Cedro Doce (*Cedrela spp*) - $\rho_{12} = 4,5 \text{ kN/m}^3$
 12: Peroba do Norte (*Goupia glabra*) - $\rho_{12} = 8,7 \text{ kN/m}^3$
 13: Angelim Pedra (*Hymenolobium petraeum*) - $\rho_{12} = 7,2 \text{ kN/m}^3$
 14: Umirana (*Qualea retusa*) - $\rho_{12} = 7,3 \text{ kN/m}^3$
 15: Angelim Pedra (*Hymenolobium petraeum*) - $\rho_{12} = 8,6 \text{ kN/m}^3$
 16: Tatajuba (*Bagassa guianensis*) - $\rho_{12} = 7,6 \text{ kN/m}^3$
 17: Tatajuba (*Bagassa guianensis*) - $\rho_{12} = 7,8 \text{ kN/m}^3$
 18: Tatajuba (*Bagassa guianensis*) - $\rho_{12} = 6,9 \text{ kN/m}^3$
 19: Tatajuba (*Bagassa guianensis*) - $\rho_{12} = 9,1 \text{ kN/m}^3$
 20: Tatajuba (*Bagassa guianensis*) - $\rho_{12} = 9,8 \text{ kN/m}^3$
 21: Louro Preto (*Ocotea neesiana*) - $\rho_{12} = 6,7 \text{ kN/m}^3$
 22: Peroba do Norte (*Goupia glabra*) - $\rho_{12} = 7,9 \text{ kN/m}^3$
 23: Mandioqueira (*Qualea albiflora*) - $\rho_{12} = 8,6 \text{ kN/m}^3$
 24: Mandioqueira (*Qualea albiflora*) - $\rho_{12} = 8,2 \text{ kN/m}^3$
 25: Mandioqueira (*Qualea albiflora*) - $\rho_{12} = 8,3 \text{ kN/m}^3$
 26: Mandioqueira (*Qualea albiflora*) - $\rho_{12} = 9,2 \text{ kN/m}^3$
 27: Mandioqueira (*Qualea albiflora*) - $\rho_{12} = 8,5 \text{ kN/m}^3$
 28: Mandioqueira (*Qualea albiflora*) - $\rho_{12} = 8,5 \text{ kN/m}^3$
 29: sem identificação - $\rho_{12} = 7,2 \text{ kN/m}^3$
 30: Jatobá (*Hymenae spp*) - $\rho_{12} = 11,1 \text{ kN/m}^3$
 31: Jatobá (*Hymenae spp*) - $\rho_{12} = 10,3 \text{ kN/m}^3$
 32: Angelim Araroba (*Vataireopsis araroba*) - $\rho_{12} = 9,2 \text{ kN/m}^3$
 33: Angelim Araroba (*Vataireopsis araroba*) - $\rho_{12} = 8,1 \text{ kN/m}^3$
 34: Angelim Araroba (*Vataireopsis araroba*) - $\rho_{12} = 6,7 \text{ kN/m}^3$

Os ensaios foram realizados em máquina universal de ensaios, marca Amsler, com capacidade de 250 kN, e as deformações foram medidas por intermédio de dois relógios comparadores com precisão de centésimo de milímetro, dispostos um de cada lado do corpo-de-prova. Foi mantida velocidade constante de aplicação de carga (acréscimo de tensão igual a 10 MPa por minuto), e cada par de corpos-de-prova foi ensaiado nas mesmas condições de umidade (acima do ponto de saturação das fibras) e direção de aplicação das cargas em relação aos anéis de crescimento. As figuras 3.1 e 3.2 apresentam os esquemas dos ensaios realizados.

Foi adotada a tensão que provoca deformação específica igual a 1% na direção de aplicação da carga, $\sigma_{1\%}$, conforme figura 3.3, como base de comparação dos resultados obtidos. No caso dos ensaios com compressão parcial, a tensão é definida como sendo a transmitida na área de contato entre a peça de madeira e a chapa de aço utilizada para distribuição da carga aplicada.

Para a obtenção da tensão utilizada como forma de comparação dos resultados, $\sigma_{1\%}$, foi adotado o procedimento descrito a seguir.

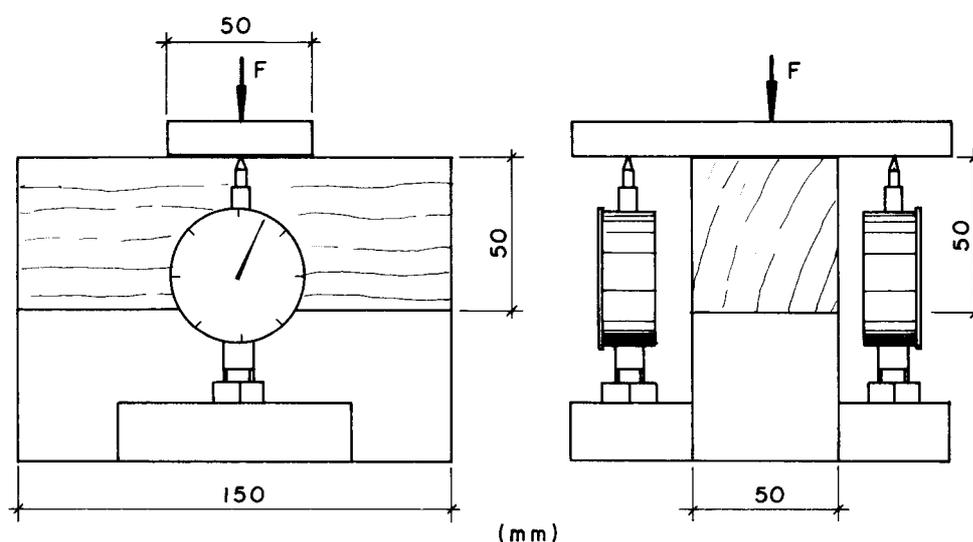


FIGURA 3.1 - Esquema do ensaio para o corpo-de-prova com dimensões nominais iguais a 50 x 50 x 150 mm

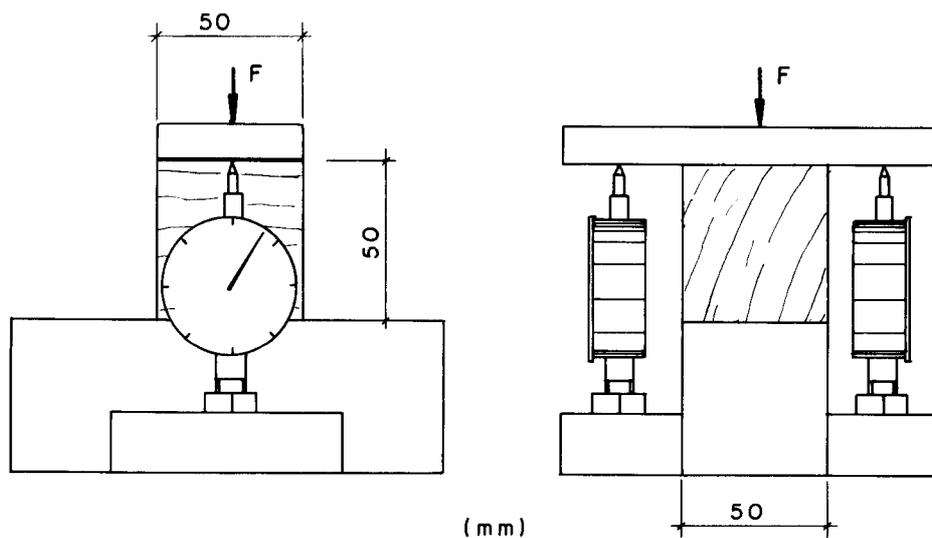


FIGURA 3.2 - Esquema do ensaio para o corpo-de-prova com dimensões nominais iguais a 50 x 50 x 50 mm

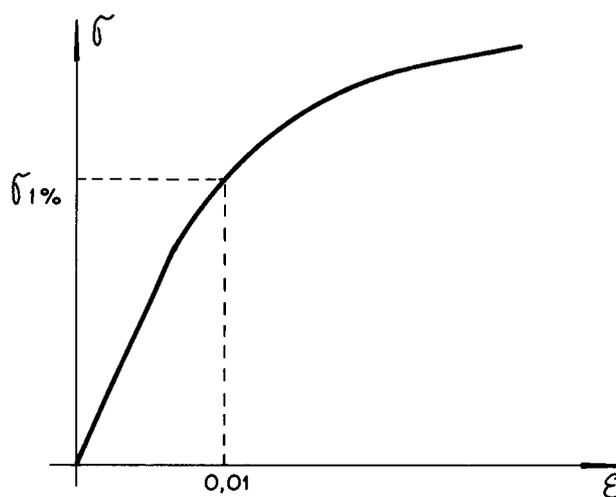


FIGURA 3.3 - Tensão para comparação dos resultados

Em cada ensaio, são registradas as deformações correspondentes a incrementos constantes de carga, adotando-se no cálculo a média das leituras dos dois relógios. Como exemplo, são apresentados os resultados obtidos no ensaio do corpo-de-prova com dimensões nominais 50 x 50 x 50 mm, do par 17:

TABELA 3.1 - Resultados obtidos para o corpo de prova cúbico do par 17

Carga (N)	Deformação (mm/100)		
	leituras		valor médio
0	0	0	0,0
3000	12	8	10,0
6000	24	16	20,0
9000	34	22	28,0
12000	47	36	41,5
15000	66	59	62,5

A carga que provoca deformação específica igual a 1% (50 centésimos de milímetro) é obtida por interpolação linear a partir dos valores das cargas que provocam deformações imediatamente anterior e posterior ao valor de 1%:

$$F_{1\%} = 12000 + \frac{(15000-12000)}{(62,5-41,5)} \times (50-41,5) = 13210 \text{ N}$$

A partir deste valor de carga, medida a área de esmagamento do corpo-de-prova (50,00 x 51,42 mm), obtém-se a tensão normal que provoca a deformação específica igual a 1% (0,5 mm):

$$\sigma_{1\%} = \frac{13210}{50 \times 51,42} = 5,14 \text{ N/mm}^2 = 5,14 \text{ MPa}$$

3.1.2 Resultados obtidos

A tabela 3.2 apresenta os valores obtidos para a tensão normal que provoca deformação específica igual a 1%, nos ensaios realizados.

TABELA 3.2 - Valores de $\sigma_{1\%}$ obtidos nos ensaios

Número do par	$\sigma_{1\%}$ (MPa)	
	50x50x50 mm	50x50x150 mm
01	1,60	3,99
02	10,38	15,18
03	4,55	6,76
04	5,59	9,02
05	8,29	12,75
06	8,96	11,61
07	6,47	9,92
08	5,13	7,46
09	1,98	3,18
10	2,12	3,27
11	2,70	3,85
12	9,64	10,80
13	6,39	8,79
14	6,65	10,55
15	9,43	12,00
16	4,06	7,29
17	5,14	5,28
18	6,06	8,65
19	8,03	14,93
20	9,75	13,80
21	5,99	9,69
22	7,09	10,94
23	4,64	9,95
24	6,13	12,24
25	4,93	10,69
26	8,33	12,02
27	8,52	10,84
28	8,86	10,57
29	2,68	3,34
30	14,68	15,77
31	12,37	18,66
32	3,71	5,95
33	4,35	6,22
34	4,89	6,09

3.1.2 Análise dos resultados

Em uma simples observação, se evidencia uma grande diferença entre os resultados obtidos nos ensaios dos dois tipos de corpos-de-prova.

Com o intuito de comprovar formalmente esta diferença, é efetuado teste estatístico da hipótese de não haver diferença entre os resultados obtidos utilizando os dois tipos diferentes de corpos-de-prova, por intermédio do teste "t" para dados pareados, conforme SNEDECOR & COCHRAN (1977), ou BOX et al. (1978). Utilizou-se o comando "ttest" do programa estatístico MINITAB, conforme RYAN et al. (1976), obtendo-se a diferença existente dentro dos pares e efetuando o teste de hipótese nula desta diferença. Os resultados obtidos do programa indicam que pode-se rejeitar a hipótese nula em um nível de significância superior a 99,99%.

3.2 Influência da geometria do corpo-de-prova

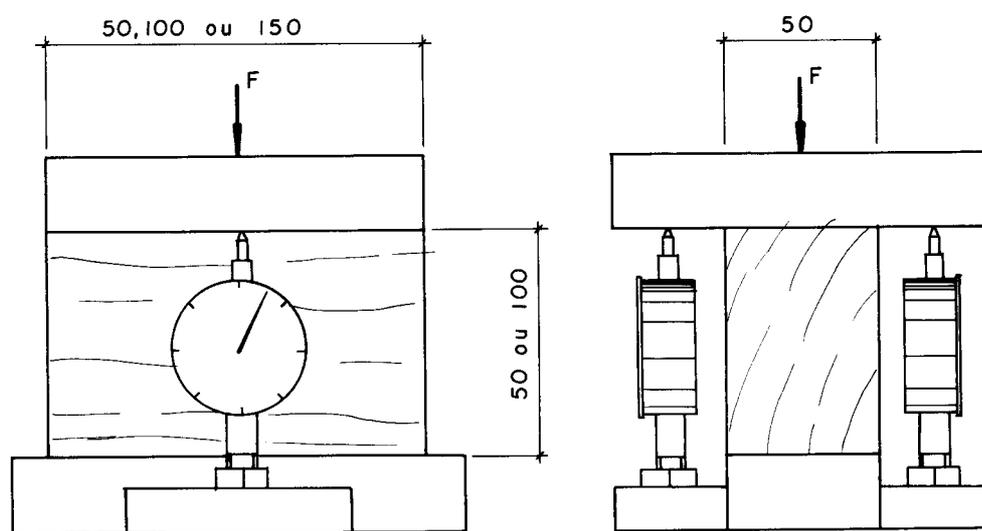
O objetivo de realizar esta série de ensaios é analisar a influência de fatores geométricos na obtenção dos resultados. Foram observadas as possíveis interferências causadas pelas variações na altura e no comprimento (medido na direção das fibras) dos corpos-de-prova, assim como no método empregado para medir as deformações.

3.2.1 Procedimentos adotados

Nestes ensaios, os corpos-de-prova tiveram aplicação de carga na superfície total da face de carregamento.

A largura dos corpos-de-prova foi mantida constante e igual a 50 mm, nominalmente. Os fatores a serem observados foram divididos em duas classificações. Para a variável comprimento do corpo-de-prova, foram atribuídos valores nominais iguais a 50 mm, 100 mm e 150 mm. Com relação à altura do corpo-de-prova e a forma de medição das deformações, os ensaios foram efetuados de três maneiras distintas:

- (1) - deformações medidas na altura total do corpo-de-prova, nominalmente igual a 100 mm (figura 3.4)
- (2) - deformações medidas na altura total do corpo-de-prova, nominalmente igual a 50 mm (figura 3.4)
- (3) - deformações medidas na parte central do corpo-de-prova, em uma extensão igual a 50 mm na direção da altura, nominalmente igual a 100 mm (figura 3.5)



Sem Escala (mm)

FIGURA 3.4 - Deformações medidas na altura total do corpo-de-prova

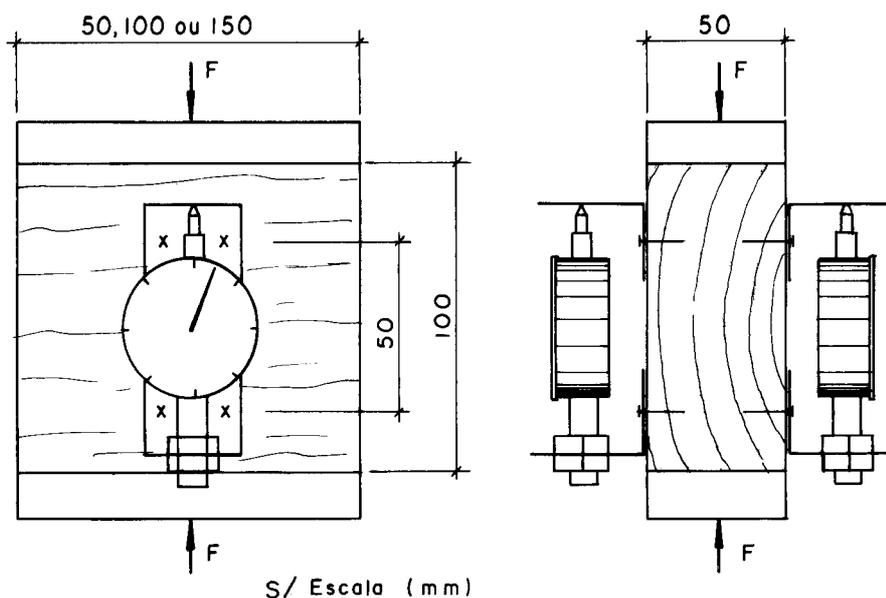


FIGURA 3.5 - Deformações medidas na parte central do corpo-de-prova

Os ensaios foram realizados em máquina universal de ensaios com capacidade de 250 kN, marca Amsler, sendo mantida velocidade constante de aplicação de carga, e as deformações foram medidas por intermédio de dois relógios comparadores com precisão de centésimo de milímetro. Os incrementos de carga em cada ensaio foram efetuados de forma que todos os ensaios tivessem a mesma velocidade de aplicação de tensão (4 MPa por minuto).

O parâmetro utilizado para comparação dos resultados foi a tensão que provoca deformação específica igual a 1%, $\sigma_{1\%}$, já definida anteriormente, no item 3.1.1.

3.2.2 Ensaio iniciais

Nestes ensaios iniciais, para cada uma das três

alturas/forma de medição dos corpos-de-prova, os comprimentos dos mesmos variaram nos três níveis citados, constituindo um planejamento estatístico fatorial 3 x 3, replicado três vezes, num total de vinte e sete corpos-de-prova. Foram feitos dois grupos semelhantes de corpos-de-prova, um para a espécie Peroba Rosa (*Aspidosperma polyneuron*) e outro para a espécie Maçaranduba (*Manilkara spp*), totalizando cinquenta e quatro ensaios. Cada grupo de corpos-de-prova foi retirado da mesma peça de madeira, sendo aleatorizada a ordem de retirada dos mesmos. Os corpos-de-prova apresentaram os seguintes valores médios para o teor de umidade e o peso específico (para U=12%).

- Peroba Rosa: U=13,1%; $\rho_{12} = 8,0 \text{ kN/m}^3$
- Maçaranduba: U=13,5%; $\rho_{12} = 10,6 \text{ kN/m}^3$

As tabelas 3.3 e 3.4 apresentam os resultados obtidos para as espécies Peroba Rosa e Maçaranduba, respectivamente:

TABELA 3.3 - Valores de $\sigma_{1\%}$ (MPa) - Peroba Rosa

Alturas e formas de medição	comprimentos (mm)		
	50	100	150
(1)	10,01	8,95	9,34
	9,15	8,70	8,31
	10,53	9,47	8,89
(2)	7,88	8,23	7,25
	8,90	7,15	6,67
	8,27	6,73	5,88
(3)	12,53	11,22	10,00
	11,13	11,16	10,99
	11,51	10,90	10,27

TABELA 3.4 - Valores de $\sigma_{1\%}$ (MPa) - Maçaranduba

Alturas e formas de medição	comprimentos (mm)		
	50	100	150
(1)	18,95	16,95	15,36
	17,31	16,68	14,55
	18,17	18,23	15,22
(2)	16,45	14,15	10,76
	15,73	14,84	9,41
	15,23	14,00	12,07
(3)	23,67	21,33	20,06
	21,06	19,80	16,66
	21,53	20,40	18,59

Podem ser observadas tendência de diminuição dos valores de $\sigma_{1\%}$ à medida que o comprimento do corpo-de-prova aumenta, e ocorrência de valores de $\sigma_{1\%}$ muito inferiores para os corpos-de-prova com altura igual a 50 mm (altura/forma de medição 2).

A análise dos resultados é feita considerando o modelo estatístico aditivo para os dois fatores analisados (altura/forma de medição e comprimento). Com este modelo, obtêm-se os resíduos (diferença entre os valores observados e os estimados) mostrados nos gráficos resíduos x valores estimados, nas figuras 3.6 e 3.7, obtidos para as duas espécies. Nas figuras de resíduos, os eixos apresentam escalas diferentes.

A partir das figuras 3.6 e 3.7, verifica-se que o modelo aditivo é apropriado para análise dos dados, observando-se os resíduos distribuídos aleatoriamente em torno de zero. Também foi feito o teste de normalidade na distribuição dos resíduos, com o comando "nscore" do programa MINITAB. Pode-se então efetuar a análise de variância, por intermédio das tabelas 3.5 e 3.6.

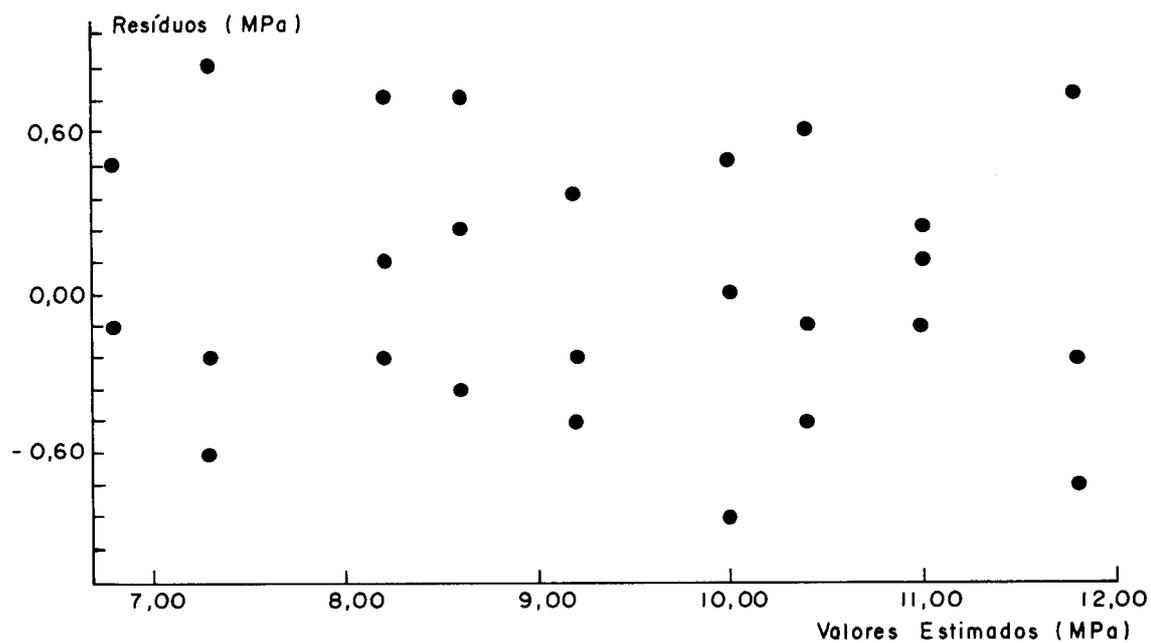


FIGURA 3.6 - Análise de resíduos - Peroba Rosa

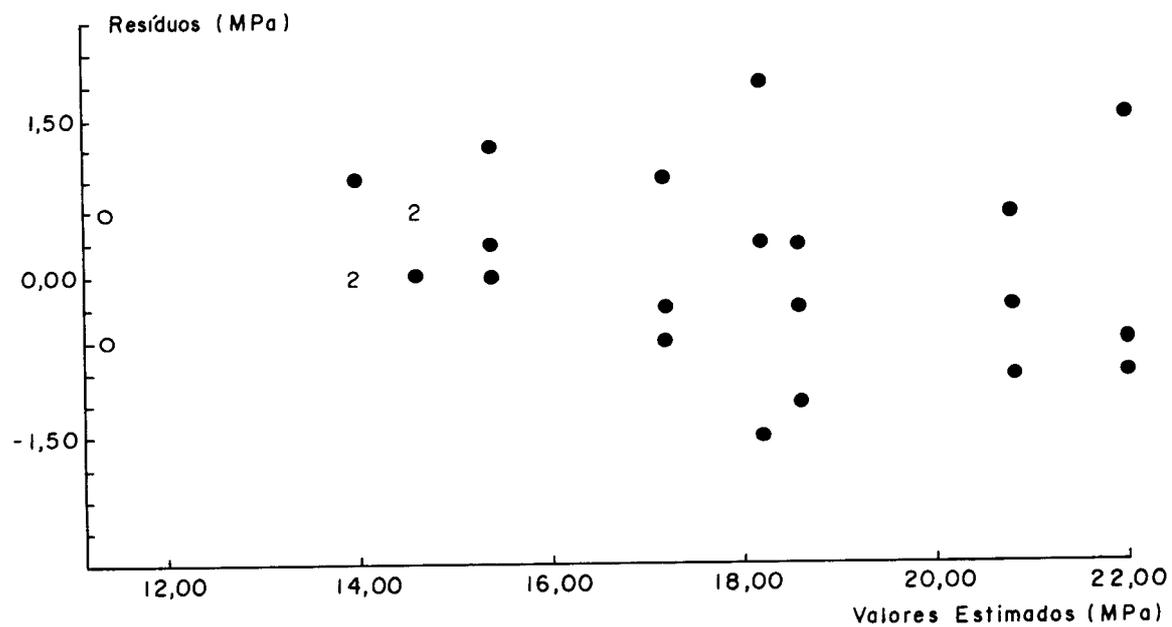


FIGURA 3.7 - Análise de resíduos - Maçaranduba

TABELA 3.5 - Análise de variância - Peroba Rosa

fonte de variação	graus de liberdade	soma de quadrados	quadrados médios
altura/medição	2	59,30	$s_1^2 = 29,65$
comprimento	2	8,58	$s_2^2 = 4,29$
resíduos	22	6,57	$s_r^2 = 0,30$

O teste da hipótese de não haver diferença entre as três alturas/formas de medição utilizadas é feita analisando a relação entre s_1^2 e s_r^2 :

$$\frac{s_1^2}{s_r^2} = 98,83$$

O teste $F_{2,22}$ indica que a hipótese adotada pode ser rejeitada, num nível de significância superior a 99,5%.

De forma análoga, também se rejeita a hipótese de não haver diferença entre os três comprimentos utilizados.

TABELA 3.6 - Análise de variância - Maçaranduba

fonte de variação	graus de liberdade	soma de quadrados	quadrados médios
altura/medição	2	203,23	$s_1^2 = 101,62$
comprimento	2	72,35	$s_2^2 = 36,18$
resíduos	22	22,37	$s_r^2 = 1,02$

Da mesma forma foi feita análise para a espécie Maçaranduba. Obtiveram-se as rejeições das hipóteses de não haver diferenças entre as três alturas/formas de medição e os três comprimentos utilizados.

Os resultados obtidos podem ter sido afetados pelo acabamento da superfície de aplicação de carga do corpo-de-prova. Isto teria mais influência no caso de corpos-de-prova com maior comprimento. No caso das alturas/formas de medição, a (3) não é afetada por este motivo, visto que as deformações são medidas na parte central do corpo-de-prova. Das outras duas formas, que medem as deformações na altura total do corpo-de-prova, a mais influenciada é a (2) por apresentar menor altura do corpo-de-prova.

3.2.3 Ensaio complementares

Tendo em vista os resultados obtidos nos ensaios anteriores, decidiu-se fazer uma série complementar de ensaios, eliminando-se os corpos-de-prova com 150 mm de comprimento nominal, e altura nominal igual a 50 mm, constituindo um planejamento fatorial 2×2 , novamente com três réplicas, num total de 12 corpos-de-prova em cada um dos três grupos. Além das espécies utilizadas anteriormente, Peroba Rosa e Maçaranduba, foi incluída uma outra, Cambará (*Erismia uncinatum*), possuindo menor peso específico. Observa-se que, apesar de mantidas duas espécies dos ensaios iniciais, os corpos-de-prova desta nova série foram obtidas de peças distintas das anteriores. Os valores médios de umidade e peso específico (para $U=12\%$) dos corpos-de-prova foram:

- Cambará: $U= 12,2\%$; $\rho_{12} = 5,4 \text{ kN/m}^3$
- Peroba Rosa: $U= 12,8\%$; $\rho_{12} = 7,9 \text{ kN/m}^3$
- Maçaranduba: $U= 13,0\%$; $\rho_{12} = 10,1 \text{ kN/m}^3$

Os corpos-de-prova tiverem um acabamento esmerado nas superfícies de aplicação das cargas, procurando-se evitar interferências advindas da rugosidade e não paralelismo entre estas faces.

As tabelas numeradas de 3.7 a 3.9 apresentam os resultados obtidos para as espécies Cambará, Peroba Rosa e Maçaranduba, respectivamente.

TABELA 3.7 - Valores de $\sigma_{1\%}$ (MPa) - Cambará

alturas e formas de medição	comprimentos (mm)	
	50	100
(1)	4,24	4,02
	4,15	4,18
	4,46	4,31
(3)	4,79	4,24
	4,20	4,50
	4,67	4,55

TABELA 3.8 - Valores de $\sigma_{1\%}$ (MPa) - Peroba Rosa

alturas e formas de medição	comprimentos (mm)	
	50	100
(1)	13,31	12,32
	11,71	11,14
	12,89	11,36
(3)	14,40	13,35
	13,98	13,49
	13,87	13,71

TABELA 3.9 - Valores de $\sigma_{1\%}$ (MPa) - Maçaranduba

alturas e formas de medição	comprimentos (mm)	
	50	100
(1)	11,80	10,45
	10,90	10,39
	12,12	10,72
(3)	13,15	12,20
	12,60	12,44
	12,89	13,06

Os resultados foram analisados de maneira semelhante aos ensaios do item anterior. As figuras 3.8 a 3.10 mostram os gráficos de resíduos x valores estimados para os corpos-de-prova das espécies Cambará, Peroba Rosa e Maçaranduba, verificando-se a adequabilidade do modelo estatístico.

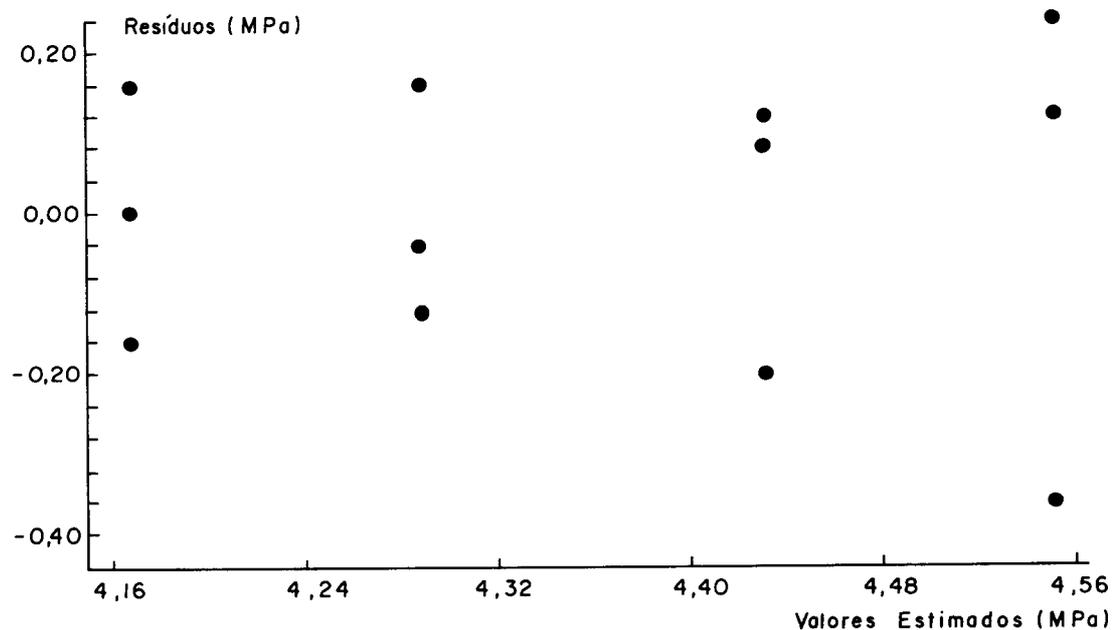


FIGURA 3.8 - Análise de resíduos - Cambará

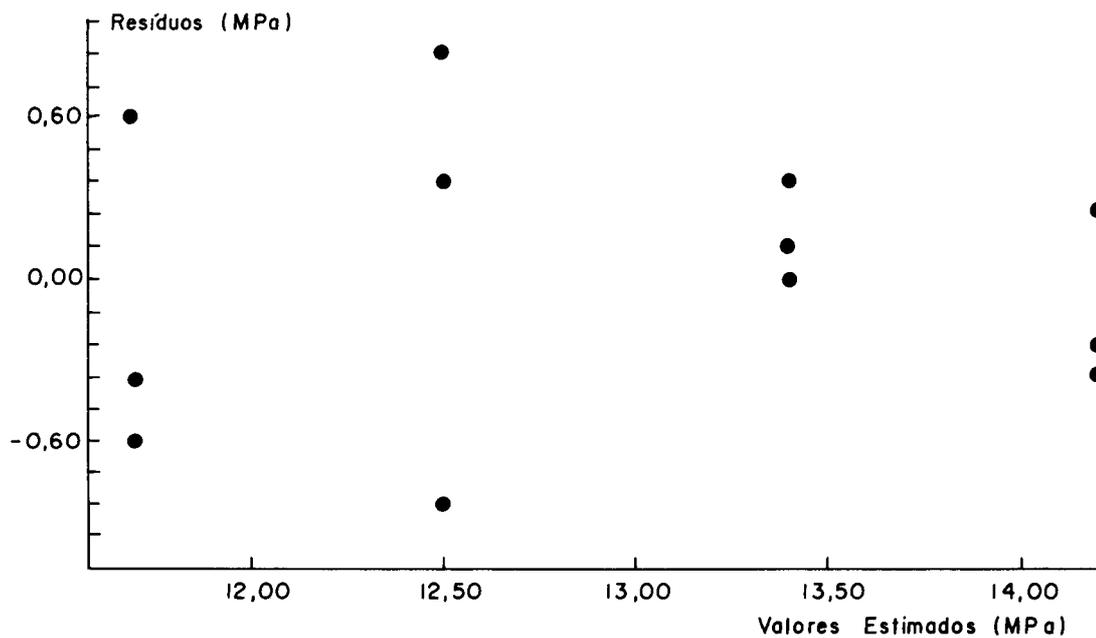


FIGURA 3.9 - Análise de resíduos - Peroba Rosa

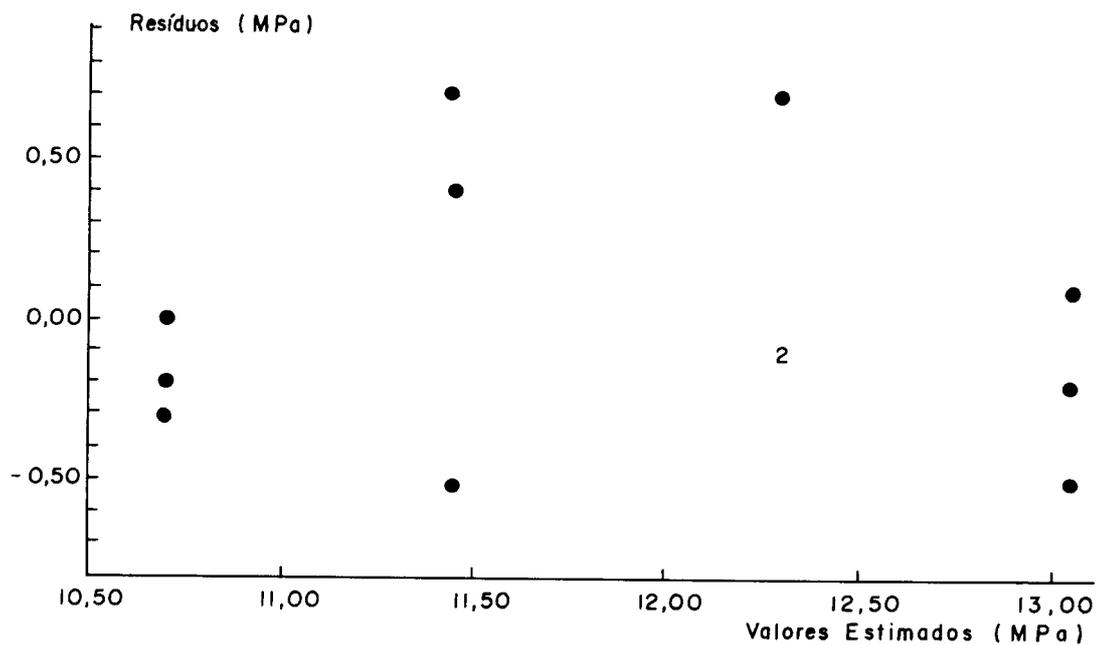


FIGURA 3.10 - Análise de resíduos - Maçaranduba

TABELA 3.10 - Análise de variância - Cambará

fonte de variação	graus de liberdade	soma de quadrados	quadrados médios
altura/medição	1	0,211	$s_1^2 = 0,211$
comprimento	1	0,042	$s_2^2 = 0,042$
resíduos	9	0,343	$s_r^2 = 0,038$

TABELA 3.11 - Análise de variância - Peroba Rosa

fonte de variação	graus de liberdade	soma de quadrados	quadrados médios
altura/medição	1	8,45	$s_1^2 = 8,45$
comprimento	1	1,91	$s_2^2 = 1,91$
resíduos	9	2,55	$s_r^2 = 0,28$

TABELA 3.12 - Análise de variância - Maçaranduba

fonte de variação	graus de liberdade	soma de quadrados	quadrados médios
altura/medição	1	7,87	$s_1^2 = 7,87$
comprimento	1	1,64	$s_2^2 = 1,64$
resíduos	9	1,86	$s_r^2 = 0,21$

A hipótese de não haver diferenças entre as duas alturas/formas de medição pode ser rejeitada em um nível de significância superior a 95%, para a espécie Cambará, e em nível superior a 99,5% para as outras.

A hipótese de não haver diferenças entre os dois comprimentos utilizados foi rejeitada em um nível de significância superior a 95%, para as espécies Peroba Rosa e Maçaranduba. Para a espécie Cambará, esta hipótese não seria rejeitada a um nível de significância superior a 75%. Observando os dados das tabelas 3.6 a 3.9, nota-se uma tendência de diminuição da tensão que provoca deformação específica igual a 1% quando se aumenta o comprimento dos corpos-de-prova de 50 mm para 100 mm. Tendência contrária é observada quando se passa da forma de medição (1) para a forma (3).

3.2.4 Comentários e conclusões

Os resultados obtidos e as análises efetuadas permitem concluir que o fator altura do corpo-de-prova e forma de medição das deformações tem maior influência do que o comprimento do corpo-de-prova, embora este fator também altere, de forma significativa, os valores de $\sigma_{1\%}$.

A medida de deformações em toda a extensão dos corpos-de-prova provoca maiores distorções nos resultados em função de eventuais irregularidades na superfície de aplicação das cargas dos mesmos, em relação à leitura de deformações em uma parte central apenas. A figura 3.11 apresenta os diagramas tensão x deformação obtidos em três réplicas de corpos-de-prova, da espécie Maçaranduba, ilustrando esta interferência, que ocorre, principalmente, na fase inicial de carregamento. Estes corpos-de-prova pertencem à série de ensaios

complementares, tendo as deformações medidas em toda a sua altura de 100 mm, e comprimento igual a 50 mm.

Com relação ao comprimento do corpo-de-prova, concluiu-se que deve ser adotado igual à largura, de modo a diminuir a interferência deste fator nos ensaios.

Após este estudo, foi definido que o corpo-de-prova, a ser utilizado no prosseguimento deste trabalho, deve ter face de aplicação de carga com seção quadrada, com dimensões menores do que a altura. Com relação à forma de medir as deformações, se obtem maior precisão se é efetuada em trecho central do corpo-de-prova, evitando-se interferências devidas às irregularidades da superfície de carregamento e ao atrito das chapas de aço utilizadas para aplicar as cargas. Pode-se, entretanto, diminuir estas interferências proporcionando um bom acabamento às superfícies de aplicação de cargas.

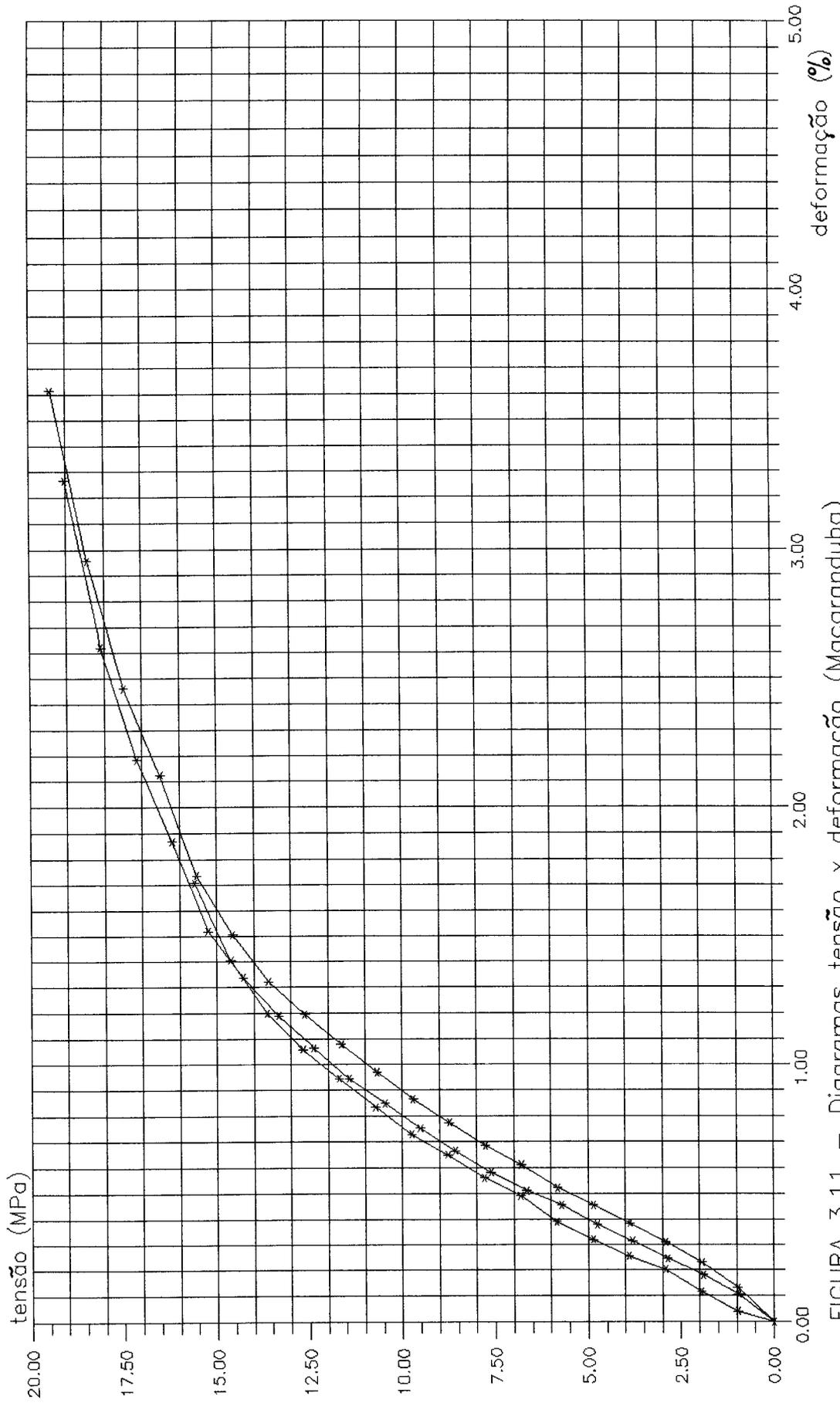


FIGURA 3.11 – Diagramas tensão x deformação (Maçaranduba)

4 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DA MADEIRA NA SOLICITAÇÃO DE COMPRESSÃO NORMAL ÀS FIBRAS

Diversos níveis distintos de tensão caracterizados por determinados fenômenos de comportamento têm sido utilizados e propostos com a finalidade de caracterizar a resistência da madeira na solicitação de compressão normal às fibras.

De acordo com a norma da ABNT, de 1984, "NBR-8681 - Ações e segurança nas estruturas", a resistência é determinada pela máxima tensão que pode ser aplicada a corpos-de-prova do material, até o aparecimento de fenômenos de comportamento, de modo geral os de ruptura ou de deformação excessiva, além dos quais há restrições de emprego deste material em elementos estruturais.

Com o objetivo de definir esta resistência da madeira, foram efetuados ensaios para seis espécies, definidas em função de se obter uma ampla variação no peso específico do material utilizado nos mesmos. Os ensaios foram feitos com corpos-de-prova em duas condições de umidade: madeira seca ao ar (teor de umidade em torno de 12%), e madeira com teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras. Pode ser observado, desta maneira, se existe influência qualitativa destes fatores (umidade e peso específico) no comportamento da madeira solicitada por compressão normal às fibras.

4.1 Procedimentos adotados

A tabela 4.1 apresenta a lista das espécies utilizadas, com os respectivos valores médios dos pesos

específicos aparentes, para um teor de umidade igual a 12%.

Os ensaios foram efetuados em corpos-de-prova possuindo face de aplicação da carga com seção quadrada, tendo a aresta dimensão nominal de 50 mm. A altura do corpo-de-prova, dimensão na direção de aplicação da carga, variou entre 100 mm a 120 mm para espécies diferentes, em função da dimensão da peça de madeira de onde foram obtidos os corpos-de-prova. Cada grupo de corpos-de-prova de determinada espécie foi obtido de uma mesma peça, apresentando a condição de umidade seca ao ar, apresentada na tabela 4.1. Foi aleatória a escolha dos corpos-de-prova a serem ensaiados nesta condição ou com umidade acima do ponto de saturação das fibras. Após a aleatorização, os corpos-de-prova a serem ensaiados com umidade acima do ponto de saturação das fibras foram mantidos submersos até atingirem a condição desejada de umidade.

TABELA 4.1 - Espécies, umidades e pesos específicos

Espécie	U(%)	ρ_{12} (kN/m ³)
Peroba Rosa (<i>Aspidosperma polyneuron</i>)	13,9	7,0
Goiabão (<i>Planchonella pachycarpa</i>)	12,0	9,1
Maçaranduba (<i>Manilkara spp</i>)	13,7	9,9
Guapuruvu (<i>Schizolobium paraibum</i>)	13,0	4,7
Ipê (<i>Tabebuia spp</i>)	13,4	9,3
Peroba do Norte (<i>Goupia glabra</i>)	11,6	8,4

Os ensaios foram realizados em máquina universal de ensaios, marca Amsler, com capacidade de 250 kN, e as deformações foram medidas no trecho central do corpo-de-prova, em uma extensão de 50 mm em relação à sua altura, por intermédio de dois relógios comparadores com precisão de centésimo de milímetro, conforme apresentado

na figura 4.1. Os ensaios de corpos-de-prova pertencentes a uma determinada espécie de madeira foram feitos com a mesma velocidade constante de aplicação de carga, e mesma direção desta em relação aos anéis de crescimento. A orientação dos anéis de crescimento, nos corpos-de-prova de cada espécie, está mostrada na figura 4.2.

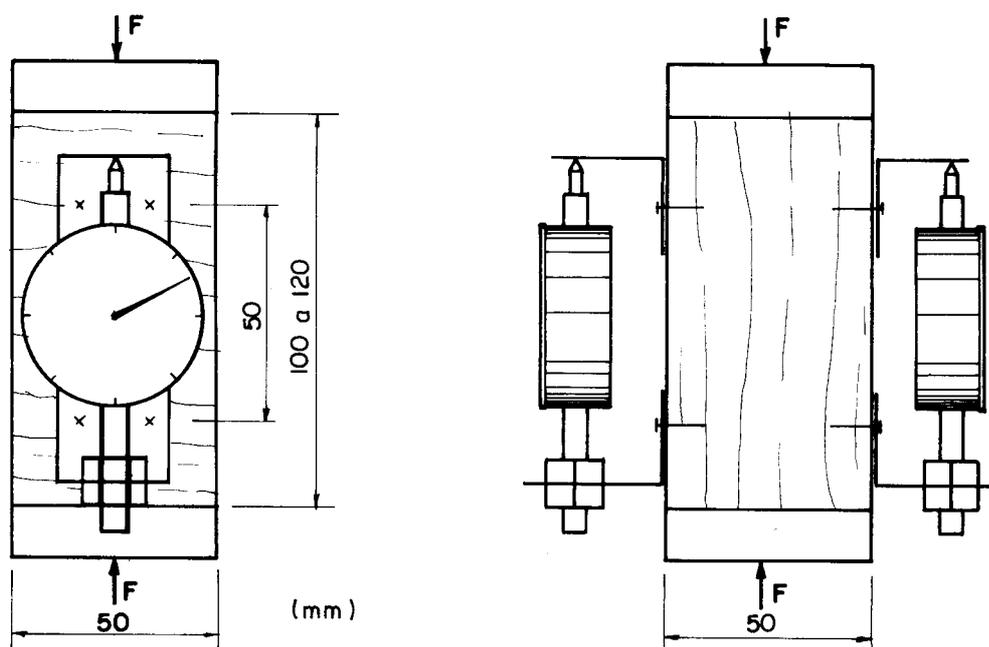


FIGURA 4.1 - Esquema do ensaio

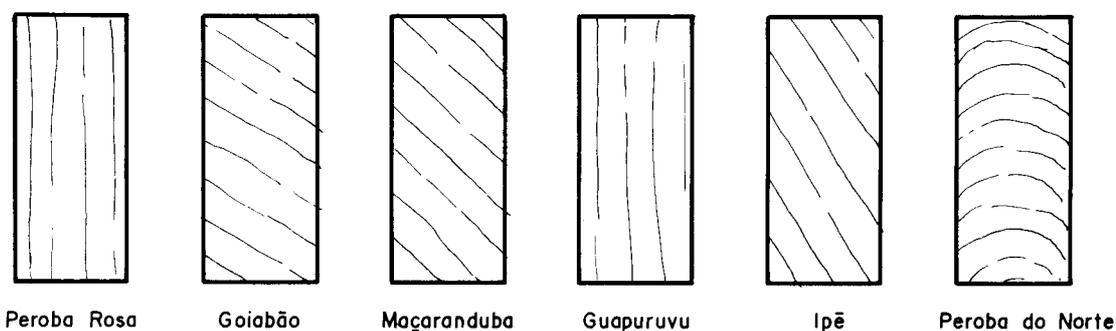


FIGURA 4.2 - Orientação dos anéis de crescimento

Foram realizados seis ensaios por espécie, sendo três réplicas para cada uma das condições de umidade analisada. Para cada ensaio, a partir da média das

deformações medidas na extensão de 50 mm pelos relógios comparadores a cada nível de carga, foi obtido o diagrama tensão x deformação específica. Estes diagramas não apresentam a parte final do ensaios, onde ocorreu a ruptura do corpo-de-prova, entendida aqui como a desagregação do material. Isto não foi possível, devido ao método empregado para a medição das deformações: a partir de um certo nível de carga, a taxa de crescimento das deformações para incrementos constantes de carga aumenta demasiadamente, podendo, em alguns casos, ocorrer ruptura frágil do corpo-de-prova a qualquer instante, causando danos irreparáveis aos relógios comparadores. Então, estes são retirados a partir de certos níveis de deformações que garantam, além da obtenção do intervalo desejado para o diagrama, a integridade dos relógios comparadores.

Com base neste diagrama são obtidos, para cada corpo-de-prova, os seguintes valores:

- tensão para deformação específica igual a 1% ($\sigma_{1\%}$).
- tensão para deformação específica residual igual a 0,2% ($\sigma_{r,0.2\%}$).
- deformação específica para tensão igual a $\sigma_{r,0.2\%}$.
- tensão para deformação específica residual igual a 1% ($\sigma_{r,1\%}$).
- deformação específica para tensão igual a $\sigma_{r,1\%}$.
- módulo de elasticidade (E), definido pelo coeficiente angular do trecho reto do diagrama.

Observa-se que, ao se denominarem as tensões referentes às deformações residuais, está sendo considerado que existe coincidência entre os limites de elasticidade e de proporcionalidade do material.

A seguir, estão apresentados os procedimentos adotados na obtenção do diagrama para a primeira réplica da espécie Peroba Rosa, ensaiada na condição de umidade seca ao ar, como exemplificação.

Este corpo-de-prova possui seção transversal com dimensões iguais a 50,61 mm e 50,53 mm, e altura igual a

106,51 mm. As leituras de deformações foram feitas a cada incremento de 2500 N na carga. A Tabela 4.2 apresenta as leituras e a suas médias, para os diversos incrementos de carga. Os valores de tensão (σ) são obtidos dividindo-se a carga aplicada pela área da seção transversal do corpo-de-prova (2557 mm^2). A deformação específica (ϵ), dada em porcentagem, é obtida dividindo-se a média da leitura das deformações, em centésimo de milímetro, por 50 mm, extensão do trecho no qual foram obtidas.

TABELA 4.2 - Ensaio da réplica 1 - Peroba Rosa

Carga (N)	deformações (mm/100)		σ (MPa)	ϵ (%)
	leituras	média		
0	0	0	0,0	0,00
2500	5	6	5,5	0,11
5000	11	10	10,5	0,21
7500	16	15	15,5	0,31
10000	22	18	20,0	0,40
12500	28	23	25,5	0,51
15000	34	27	30,5	0,61
17500	39	32	35,5	0,71
20000	46	37	41,5	0,83
22500	51	43	47,0	0,94
25000	59	50	54,5	1,09
27500	67	58	62,5	1,25
30000	77	69	73,0	1,46
32500	87	82	84,5	1,69
35000	103	103	103,0	2,06
37500	124	141	132,5	2,65
40000	155	187	171,0	3,42

A figura 4.3 apresenta o diagrama $\sigma \times \epsilon$ para este corpo-de-prova. Os valores de tensões, das deformações e do módulo de elasticidade, definidos anteriormente, são obtidos a partir deste diagrama, graficamente.

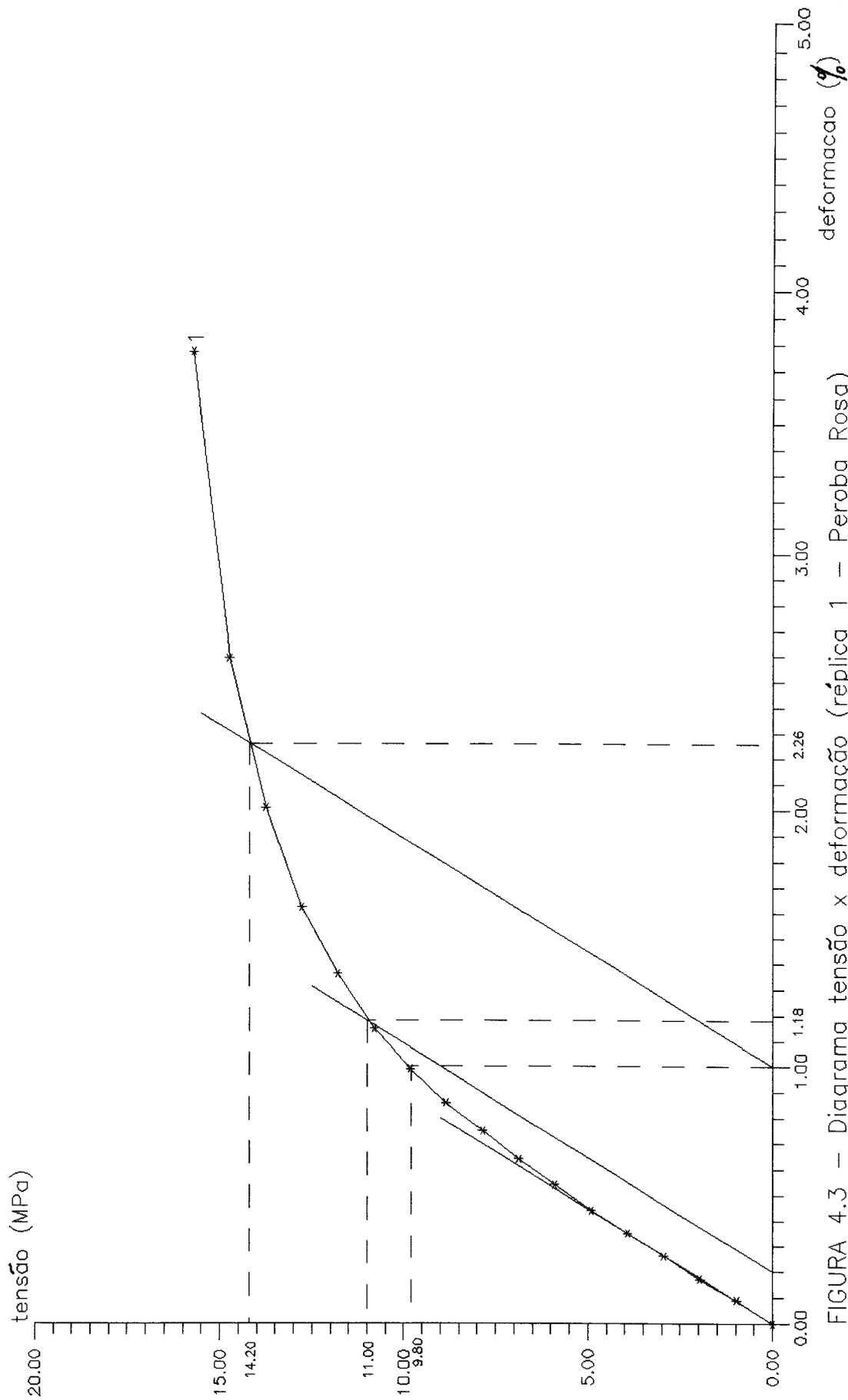


FIGURA 4.3 – Diagrama tensão x deformação (réplica 1 – Peroba Rosa)

4.2 Resultados obtidos

As tabelas 4.3 e 4.4 apresentam os resultados obtidos para os seis corpos-de-prova da espécie Peroba Rosa, e também os valores médios das réplicas com os respectivos coeficientes de variação (CV). Os diagramas σ x ϵ obtidos nos seis ensaios estão na figura 4.4.

TABELA 4.3 - Valores obtidos - Peroba Rosa (seca ao ar)

CP	$\sigma_{1\%}$	$\sigma_{r, 0.2\%}$		$\sigma_{r, 1\%}$		E (MPa)
	σ (MPa)	σ (MPa)	ϵ (%)	σ (MPa)	ϵ (%)	
1	9,80	11,00	1,18	14,20	2,26	1124
2	9,20	11,20	1,35	14,30	2,47	971
3	10,30	11,10	1,13	14,30	2,20	1205
média	9,77	11,10	1,22	14,27	2,31	1100
CV(%)	5,6	0,9	9,5	0,4	6,1	10,8

TABELA 4.4 - Valores obtidos - Peroba Rosa (saturada)

CP	$\sigma_{1\%}$	$\sigma_{r, 0.2\%}$		$\sigma_{r, 1\%}$		E (MPa)
	σ (MPa)	σ (MPa)	ϵ (%)	σ (MPa)	ϵ (%)	
4	6,40	6,75	1,10	8,70	2,16	762
5	5,80	6,30	1,11	8,20	2,17	696
6	5,80	6,20	1,12	8,10	2,18	681
média	6,00	6,42	1,11	8,33	2,17	713
CV(%)	5,8	4,6	0,9	3,9	0,5	6,0

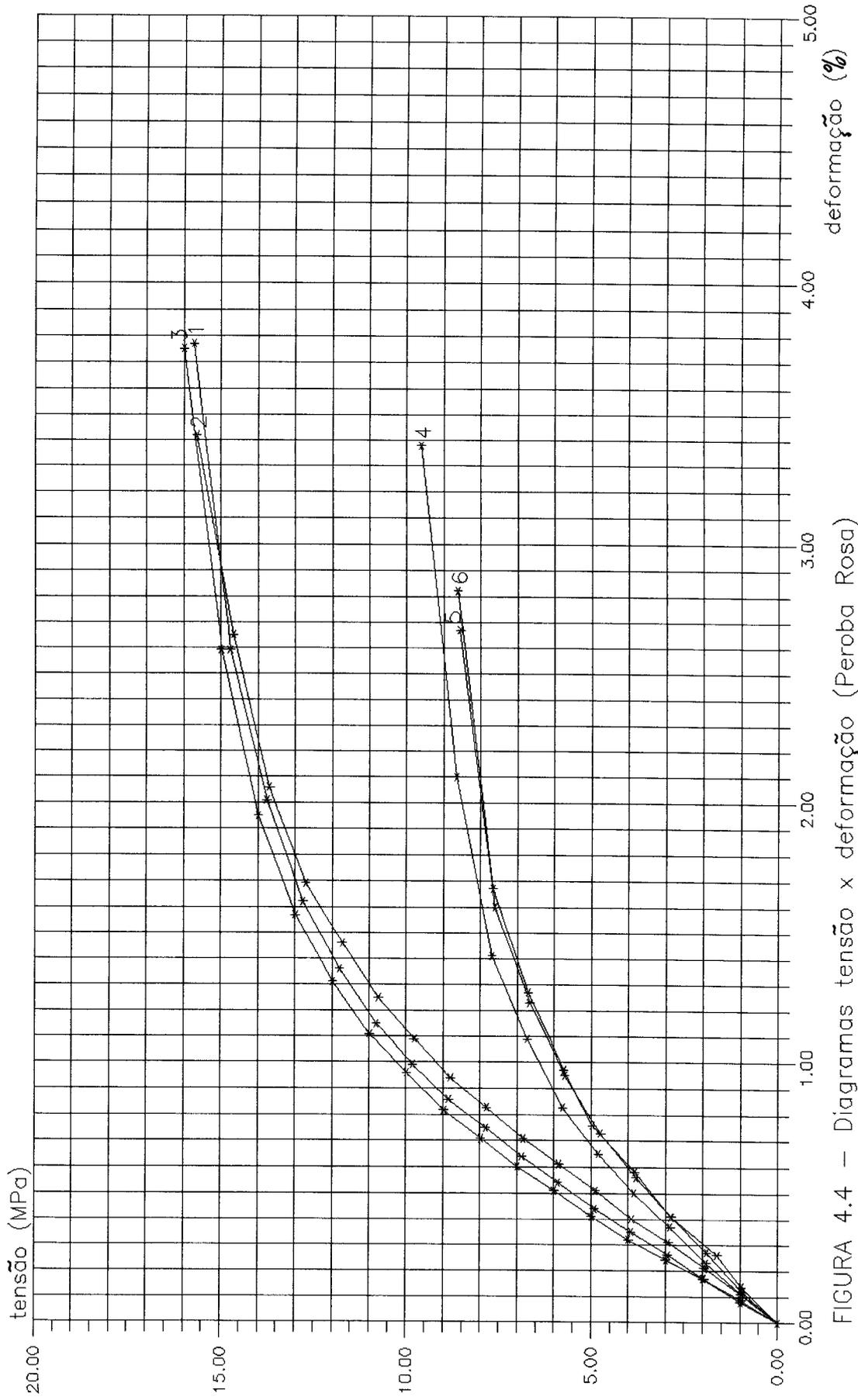


FIGURA 4.4 – Diagramas tensão x deformação (Peroba Rosa)

As tabelas 4.5 e 4.6 apresentam os resultados obtidos para os corpos-de-prova da espécie Goiabão. A figura 4.5 mostra os diagramas σ x ϵ para os seis corpos-de-prova.

TABELA 4.5 - Valores obtidos - Goiabão (seca ao ar)

CP	$\sigma_{1\%}$	$\sigma_{r, 0.2\%}$		$\sigma_{r, 1\%}$		E (MPa)
	σ (MPa)	σ (MPa)	ϵ (%)	σ (MPa)	ϵ (%)	
1	9,65	9,20	0,85	11,65	1,85	1429
2	8,90	8,75	0,98	11,13	2,00	1159
3	8,60	7,60	0,80	11,00	1,85	1311
média	9,05	8,52	0,88	11,26	1,90	1300
CV(%)	6,0	9,7	10,6	3,1	4,6	10,4

TABELA 4.6 - Valores obtidos - Goiabão (saturada)

CP	$\sigma_{1\%}$	$\sigma_{r, 0.2\%}$		$\sigma_{r, 1\%}$		E (MPa)
	σ (MPa)	σ (MPa)	ϵ (%)	σ (MPa)	ϵ (%)	
4	6,20	6,00	0,95	8,00	2,00	802
5	6,70	6,00	0,83	8,30	1,88	949
6	6,20	5,90	0,95	8,10	2,01	798
média	6,37	5,97	0,91	8,13	1,96	850
CV(%)	4,5	1,0	7,6	1,9	3,7	10,1

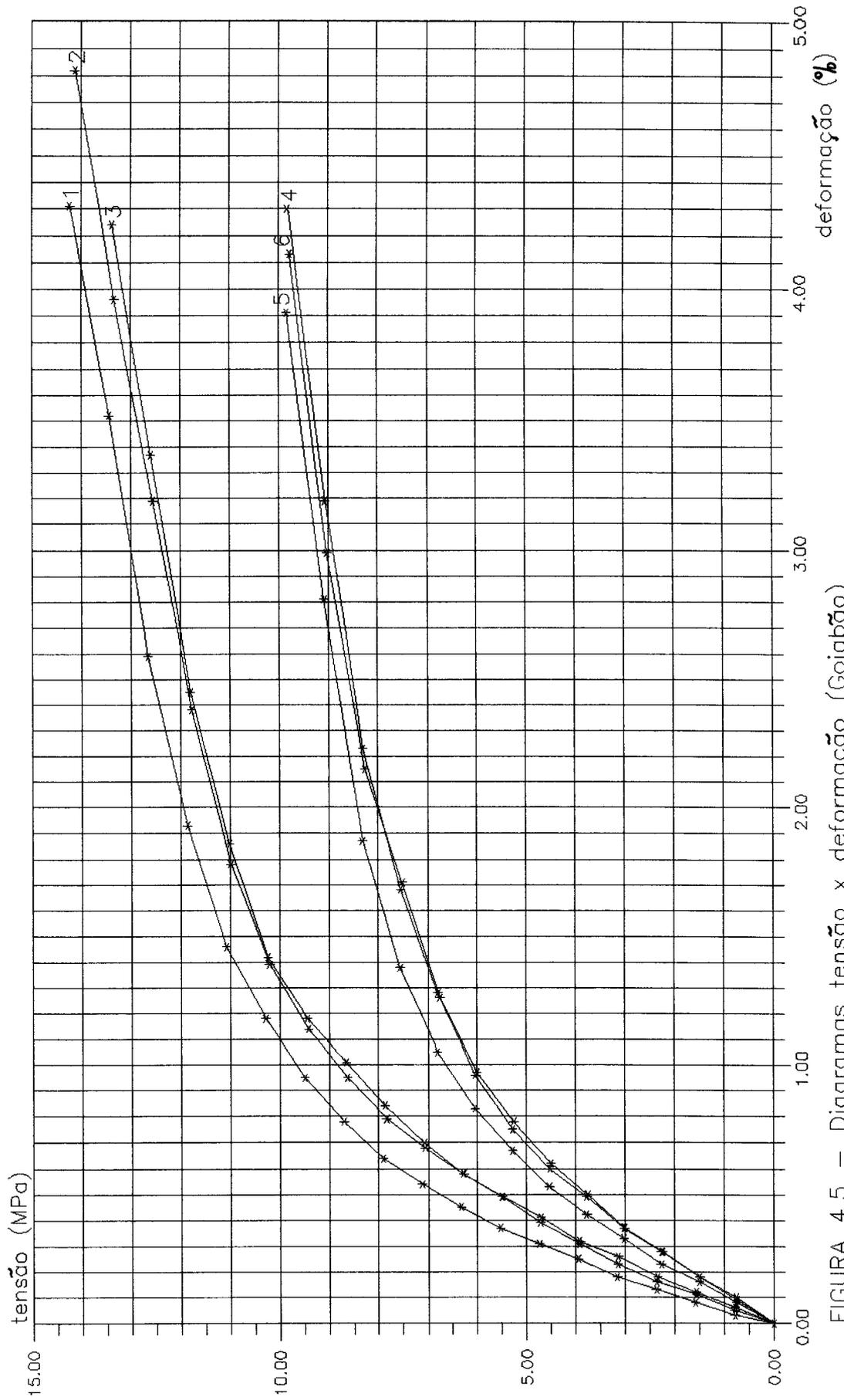


FIGURA 4.5 - Diagramas tensão x deformação (Goiabão)

As tabelas 4.7 e 4.8 apresentam os valores obtidos para os corpos-de-prova da espécie Maçaranduba. Os diagramas σ x ϵ são mostrados na figura 4.6.

TABELA 4.7 - Valores obtidos - Maçaranduba (seca ao ar)

CP	$\sigma_{1\%}$	$\sigma_{r, 0.2\%}$		$\sigma_{r, 1\%}$		E (MPa)
	σ (MPa)	σ (MPa)	ϵ (%)	σ (MPa)	ϵ (%)	
1	16,20	15,70	0,93	20,20	1,93	2150
2	15,70	15,30	0,95	19,50	1,95	2054
3	15,30	15,80	1,04	19,80	2,05	1870
média	15,73	15,60	0,97	19,83	1,98	2025
CV(%)	2,9	1,70	6,0	1,80	3,3	7,0

TABELA 4.8 - Valores obtidos - Maçaranduba (saturada)

CP	$\sigma_{1\%}$	$\sigma_{r, 0.2\%}$		$\sigma_{r, 1\%}$		E (MPa)
	σ (MPa)	σ (MPa)	ϵ (%)	σ (MPa)	ϵ (%)	
4	11,15	10,20	0,85	14,00	1,89	1575
5	10,70	9,80	0,87	13,80	1,94	1484
6	11,20	10,00	0,80	14,15	1,84	1679
média	11,02	10,00	0,84	13,98	1,89	1579
CV(%)	2,5	2,0	4,3	1,3	2,6	6,2

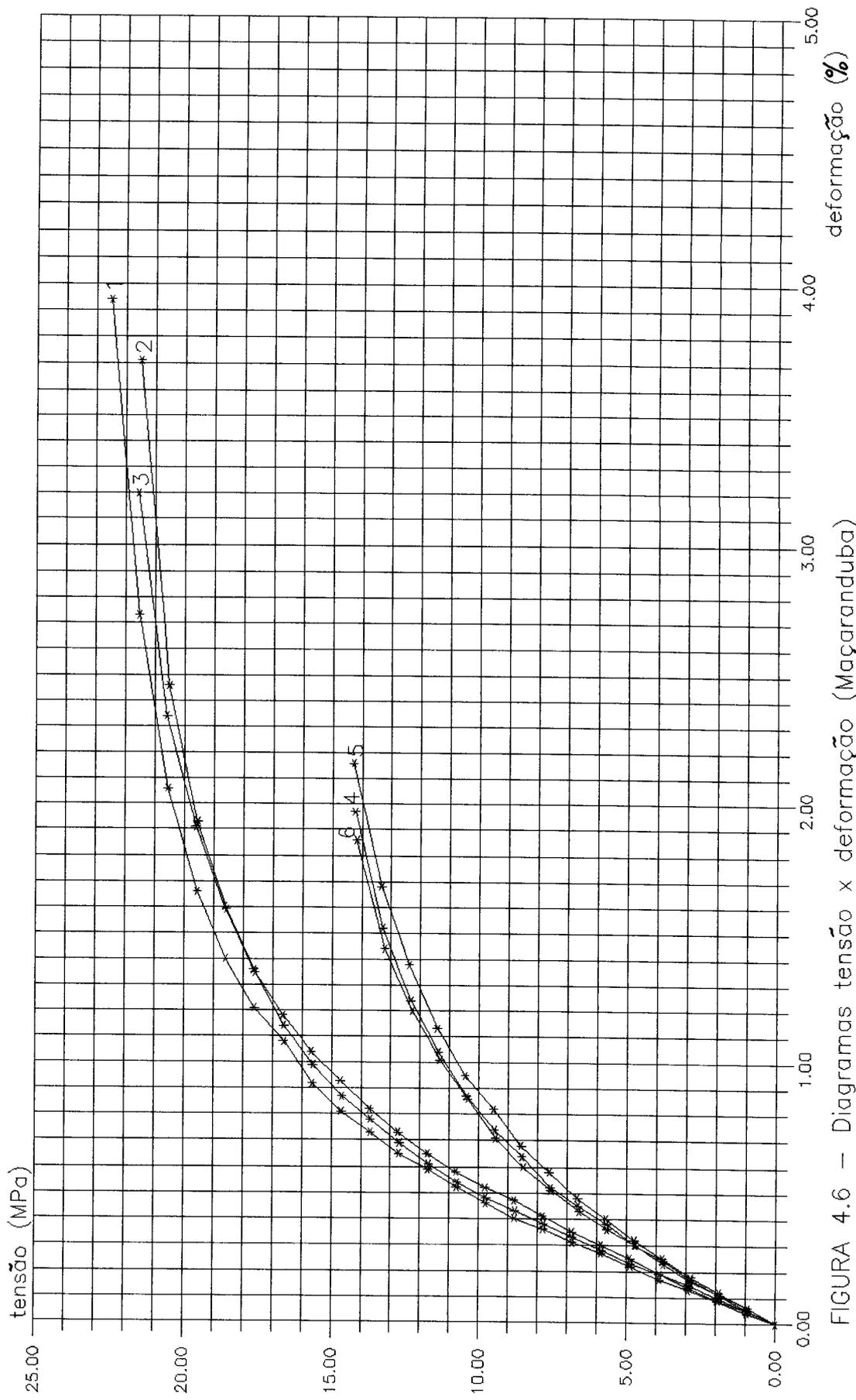


FIGURA 4.6 – Diagramas tensão x deformação (Maçaranduba)

Os resultados obtidos para os corpos-de-prova da espécie Guapuruvu são apresentados nas tabelas 4.9 e 4.10, e os diagramas σ x ϵ na figura 4.7.

TABELA 4.9 - Valores obtidos - Guapuruvu (seca ao ar)

CP	$\sigma_{1\%}$	$\sigma_{r, 0.2\%}$		$\sigma_{r, 1\%}$		E (MPa)
	σ (MPa)	σ (MPa)	ϵ (%)	σ (MPa)	ϵ (%)	
1	4,00	4,50	1,20	6,00	2,30	457
2	4,10	4,50	1,18	6,30	2,35	471
3	3,90	4,70	1,32	6,20	2,57	426
média	4,00	4,57	1,23	6,17	2,41	451
CV(%)	2,5	2,5	6,1	2,5	6,0	5,1

TABELA 4.10 - Valores obtidos - Guapuruvu (saturada)

CP	$\sigma_{1\%}$	$\sigma_{r, 0.2\%}$		$\sigma_{r, 1\%}$		E (MPa)
	σ (MPa)	σ (MPa)	ϵ (%)	σ (MPa)	ϵ (%)	
4	3,00	2,75	0,90	4,35	2,05	405
5	2,75	2,55	0,88	3,90	2,05	374
6	2,60	2,50	0,95	3,65	2,07	337
média	2,78	2,60	0,91	3,97	2,06	372
CV(%)	7,3	5,1	4,0	8,9	0,6	9,2

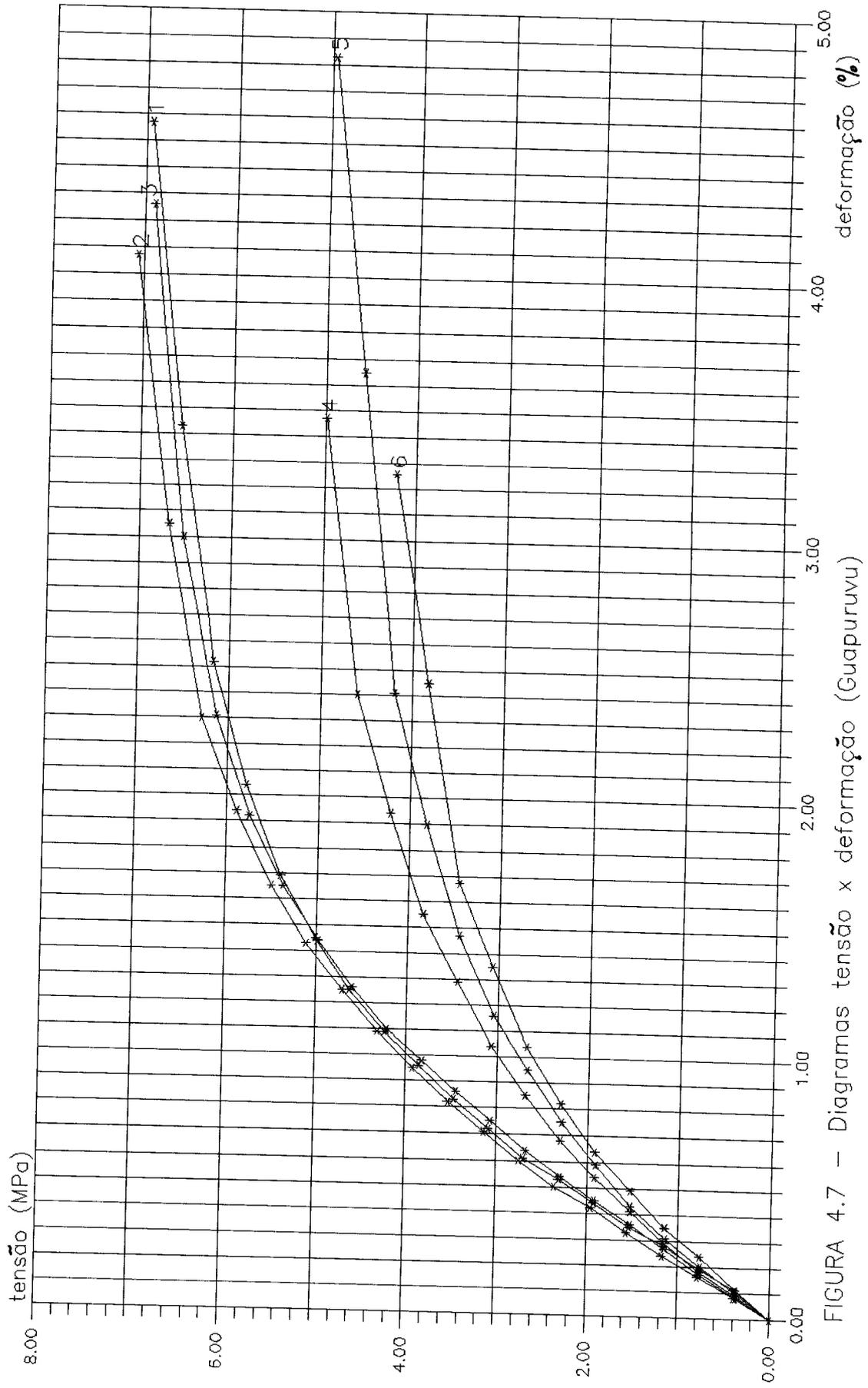


FIGURA 4.7 - Diagramas tensão x deformação (Guapuruvu)

Os resultados obtidos para os corpos-de-prova da espécie Ipê estão nas tabelas 4.11 e 4.12, e os diagramas $\sigma \times \varepsilon$ na figura 4.8.

TABELA 4.11 - Valores obtidos - Ipê (seca ao ar)

CP	$\sigma_{1\%}$	$\sigma_{r, 0.2\%}$		$\sigma_{r, 1\%}$		E (MPa)
	σ (MPa)	σ (MPa)	ε (%)	σ (MPa)	ε (%)	
1	14,80	14,30	0,93	17,80	1,92	1961
2	13,50	13,80	1,03	17,40	2,05	1667
3	14,50	13,80	0,90	17,50	1,90	1942
média	14,27	13,97	0,95	17,57	1,96	1857
CV(%)	4,8	2,1	7,1	1,2	4,2	8,9

TABELA 4.12 - Valores obtidos - Ipê (saturada)

CP	$\sigma_{1\%}$	$\sigma_{r, 0.2\%}$		$\sigma_{r, 1\%}$		E (MPa)
	σ (MPa)	σ (MPa)	ε (%)	σ (MPa)	ε (%)	
4	10,30	9,75	0,90	12,85	1,93	1389
5	10,50	10,40	0,98	13,20	2,00	1333
6	10,70	10,60	0,97	13,90	1,94	1379
média	10,50	10,25	0,95	13,32	1,96	1367
CV(%)	1,9	4,3	4,6	4,0	1,9	2,2

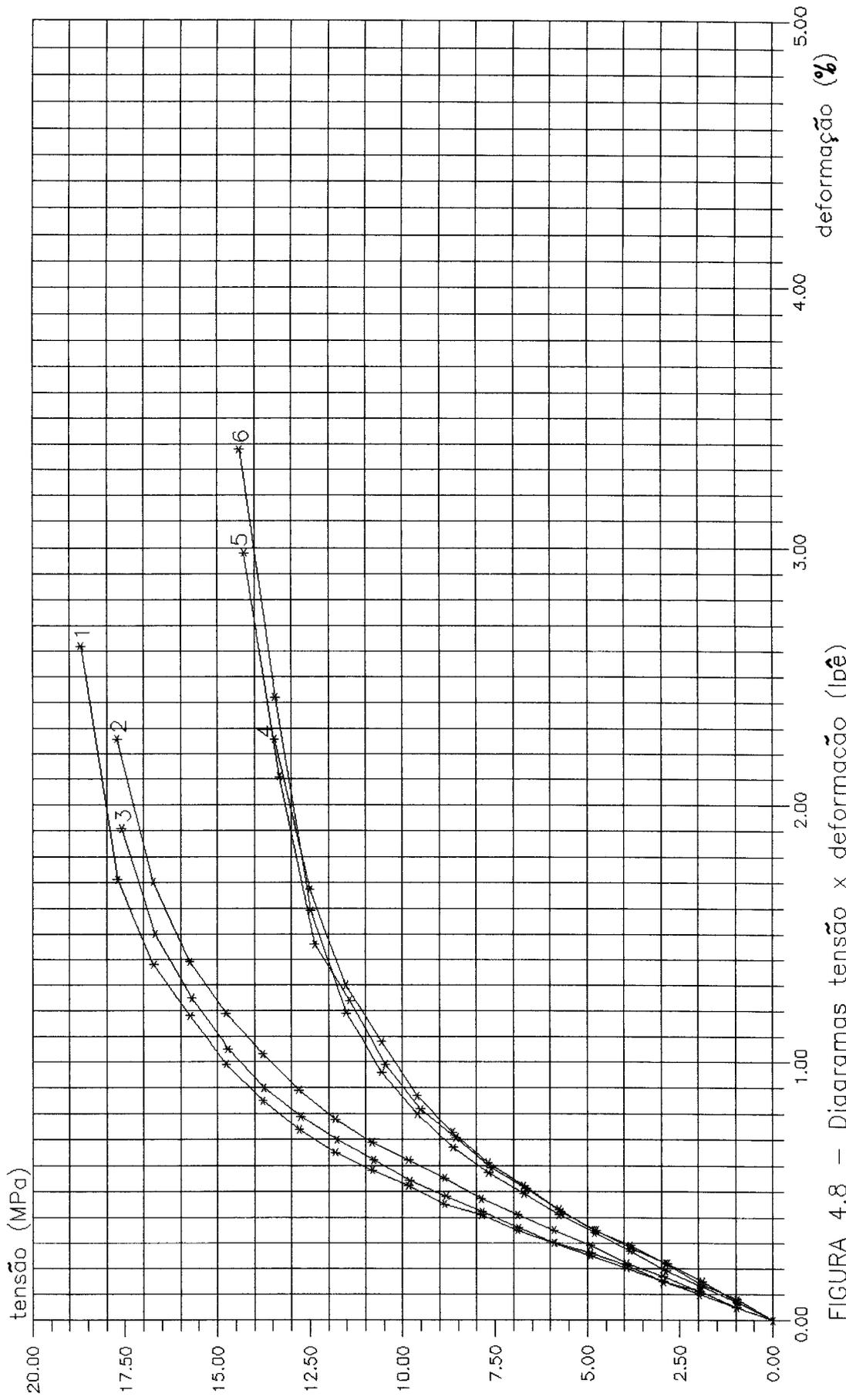


FIGURA 4.8 — Diagramas tensão x deformação (Ipê)

As tabelas 4.13 e 4.14 apresentam os valores obtidos para os corpos-de-prova da espécie Peroba do Norte. Os diagramas $\sigma \times \epsilon$ são mostrados na figura 4.9.

TABELA 4.13 - Valores obtidos - Peroba do Norte
(seca ao ar)

CP	$\sigma_{1\%}$	$\sigma_{r, 0.2\%}$		$\sigma_{r, 1\%}$		E (MPa)
	σ (MPa)	σ (MPa)	ϵ (%)	σ (MPa)	ϵ (%)	
1	10,40	9,20	0,77	12,70	1,81	1579
2	10,75	9,30	0,73	12,85	1,73	1744
3	10,60	9,70	0,84	13,20	1,87	1546
média	10,5	9,40	0,78	12,92	1,80	1623
CV(%)	1,7	2,8	7,1	2,0	3,9	6,5

TABELA 4.14 - Valores obtidos- Peroba do Norte (saturada)

CP	$\sigma_{1\%}$	$\sigma_{r, 0.2\%}$		$\sigma_{r, 1\%}$		E (MPa)
	σ (MPa)	σ (MPa)	ϵ (%)	σ (MPa)	ϵ (%)	
4	8,20	7,80	0,83	9,30	1,75	1250
5	8,20	7,80	0,85	9,20	1,76	1200
6	8,30	7,80	0,84	9,50	1,77	1224
média	8,23	7,80	0,84	9,33	1,76	1225
CV(%)	0,7	0,0	1,2	1,6	0,6	2,0

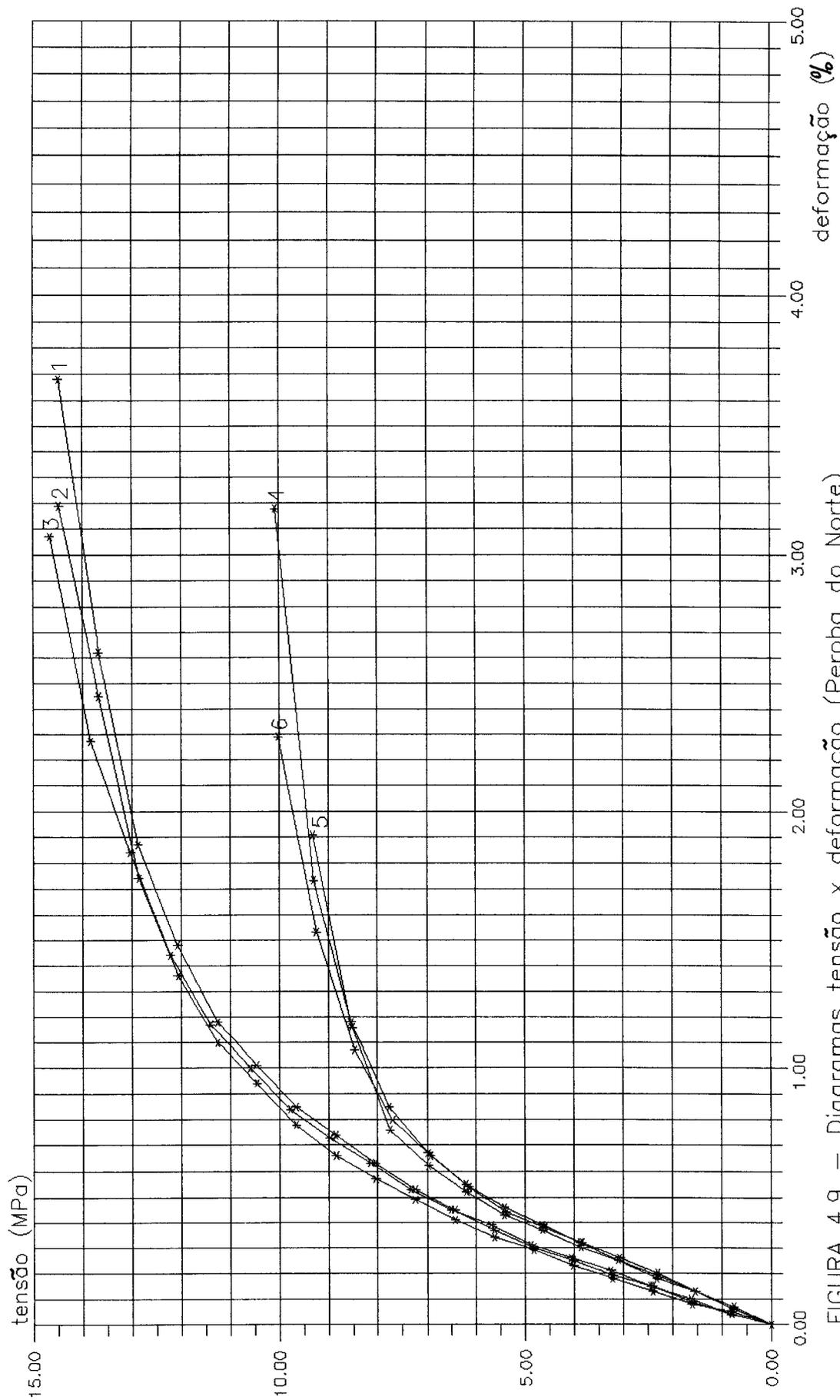


FIGURA 4.9 – Diagramas tensão x deformação (Peroba do Norte)

4.3 Ensaaios Complementares

O método empregado para medir as deformações, utilizando relógios comparadores, não permitiu a elaboração do diagrama tensão x deformação na parte final do ensaio, onde ocorre a desagregação do material. A utilização de máquina universal de ensaios, marca Dartec, com capacidade de 100 kN, possuindo sistema de controle digital para aplicação de forças e aquisição de deslocamentos, possibilitou a elaboração de diagramas até a fase da ruptura do corpo-de-prova.

Desta forma, foi possível analisar o comportamento do material na fase de desagregação, sendo avaliado se a tensão que a provoca, isto é, a tensão máxima que o material suporta, pode representar de modo conveniente a resistência da madeira na solicitação de compressão normal às fibras. De certa forma, isto seria interessante, pelo fato de ser um resultado obtido de forma rápida e direta.

Foram ensaiados corpos-de-provas das espécies Eucalipto Citriodora (*Eucalyptus citriodora*), Castanheira (*Bertholletia excelsa*) e Maçaranduba (*Manilkara spp*), todos na condição de umidade seca ao ar. Os corpos-de-prova apresentam face de aplicação de carga com seção quadrada de aresta com dimensão nominal igual a 50 mm, e altura nominal igual a 100 mm. A figura 4.10 mostra a orientação dos anéis de crescimento nos corpos-de-prova.

Os ensaios foram efetuados com velocidade constante de aplicação de carga. Corpos de prova da mesma espécie foram ensaiados com igual velocidade de carregamento e mesma direção deste em relação aos anéis de crescimento. A figura 4.11 apresenta um ensaio deste tipo sendo realizado.

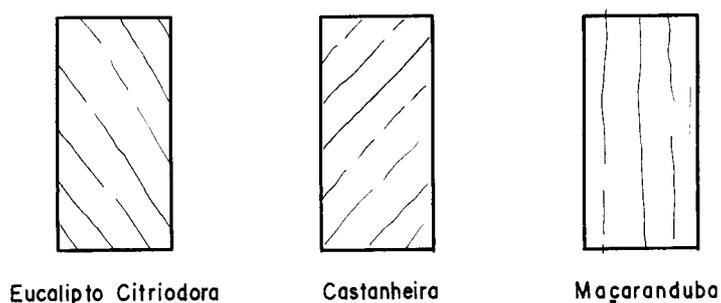


FIGURA 4.10 - Orientação dos anéis de crescimento

FIGURA 4.11 - Ensaio realizado no equipamento DARTEC

As figuras 4.12, 4.13 e 4.14 apresentam os diagramas carga x deformação obtidos nos ensaios dos corpos-de-prova das espécies Eucalipto Citriodora, Castanheira e Maçaranduba, respectivamente. Admitiu-se que a deformação do corpo-de-prova seja igual ao deslocamento do atuador servo hidráulico (stroke) da máquina de ensaio.

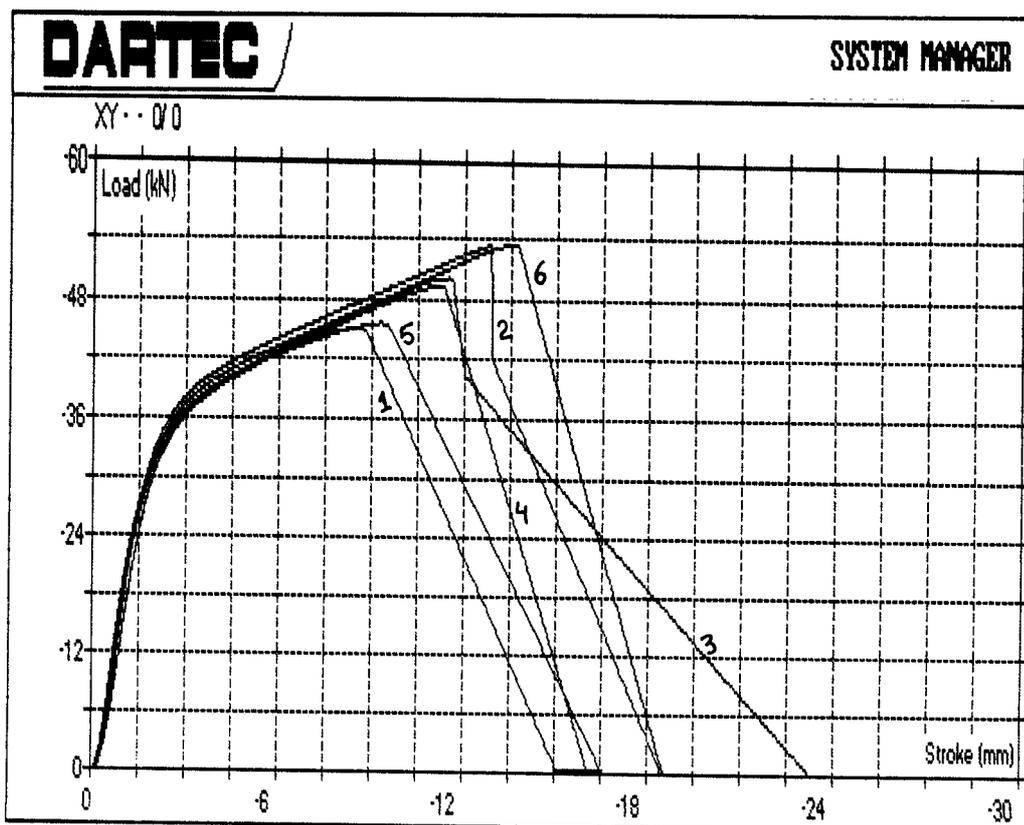


FIGURA 4.12 - Diagramas carga x deformação
Eucalypto Citriodora

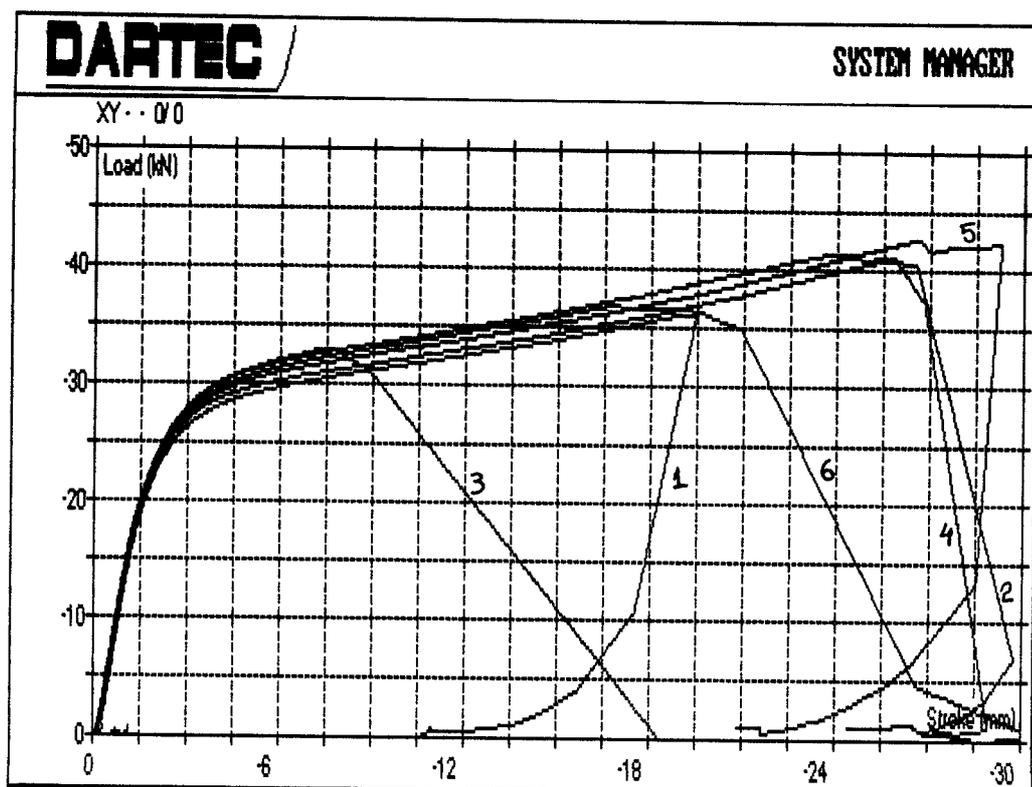


FIGURA 4.13 - Diagramas carga x deformação - Castanheira

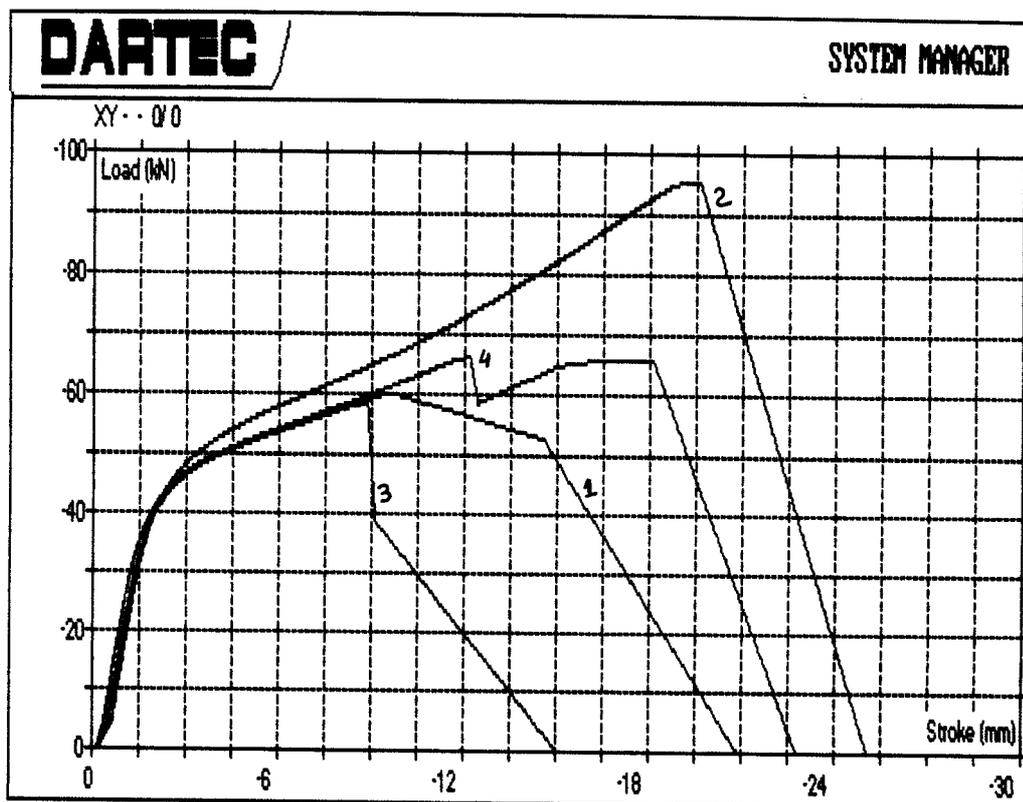


FIGURA 4.14 - Diagramas carga x deformação - Maçaranduba

Com a finalidade de comparação dos resultados, são obtidas destes ensaios os seguintes valores:

- tensão para deformação específica residual igual a 0,2% ($\sigma_{r,0.2\%}$).
- deformação específica para tensão igual a $\sigma_{r,0.2\%}$.
- tensão que provoca ruptura ($\sigma_{ruptura}$).
- deformação específica na ruptura
- módulo de elasticidade (E)

Os resultados são obtidos por intermédio de funções do Software DARTEC, que permitem, após a realização do ensaio, acompanhar ponto a ponto o diagrama obtido e determinar a equação da reta definida por dois pontos quaisquer.

Assim, foi obtida a equação da reta carga x deformação no trecho reto do diagrama para cada ensaio, não considerando a parte inicial do mesmo, por causa de interferências. O coeficiente angular desta reta dividido pela área da face de aplicação de carga e multiplicado pela altura do corpo-de-prova fornece o valor do módulo de elasticidade. A equação da reta permite obter o valor da deformação para carga igual a zero; a origem do eixo das deformações é deslocada para este ponto. Translando a reta, na direção horizontal, um valor correspondente à deformação específica igual a 0,2% obtem-se, no cruzamento desta reta com o diagrama tensão x deformação, o ponto que indica o valor da força que provoca deformação residual igual a 0,2%. O valor da deformação para este nível de tensão é obtido descontando-se as interferências iniciais ocorridas nos ensaios, utilizando-se a nova origem para o eixo das deformações.

TABELA 4.15 - Valores obtidos - Eucalipto Citriodora

CP	$\sigma_{r, 0.2\%}$		$\sigma_{ruptura}$		E (MPa)
	σ (MPa)	ϵ (%)	σ (MPa)	ϵ (%)	
1	11,16	1,36	17,81	8,45	965
2	11,70	1,33	21,24	12,54	1041
3	11,74	1,52	20,30	10,30	891
4	11,23	1,49	19,35	11,09	873
5	10,93	1,33	18,15	9,31	970
6	11,45	1,40	21,26	13,43	952
média	11,37	1,41	19,69	10,85	949
CV(%)	2,8	5,8	7,6	17,5	6,4

TABELA 4.16 -Valores obtidos - Castanheira

CP	$\sigma_{r,0.2\%}$		$\sigma_{ruptura}$		E (MPa)
	σ (MPa)	ϵ (%)	σ (MPa)	ϵ (%)	
1	7,93	1,46	14,17	19,36	638
2	7,64	1,37	16,03	24,06	653
3	8,00	1,44	12,77	7,62	644
4	7,62	1,40	15,79	25,76	637
5	7,93	1,43	16,89	26,26	645
6	7,69	1,41	14,28	17,04	636
média	7,80	1,42	15,00	20,02	642
CV(%)	2,2	2,2	10,1	35,4	1,0

TABELA 4.17 - Valores obtidos - Maçaranduba

CP	$\sigma_{r,0.2\%}$		$\sigma_{ruptura}$		E (MPa)
	σ (MPa)	ϵ (%)	σ (MPa)	ϵ (%)	
1	14,96	1,36	24,54	9,36	1285
2	15,82	1,41	38,98	19,25	1310
3	15,07	1,37	23,89	8,50	1287
4	14,40	1,32	26,48	12,04	1278
média	15,06	1,41	28,47	15,06	1290
CV(%)	3,9	2,7	24,9	3,9	1,1

4.4 Comentários e conclusões

Observando as figuras 4.4 a 4.9, referentes aos ensaios iniciais deste capítulo, nota-se uma manutenção na forma dos diagramas tensão x deformação, independentemente da espécie e do teor de umidade. Quando ocorreram as rupturas dos corpos-de-prova, cujos diagramas estão mostrados nestas figuras, eles já sofreram deformações excessivas, não se verificando mais o paralelismo entre as faces de aplicação de carga. Nota-se o aparecimento de certos mecanismos para absorver a força aplicada, não se aplicando mais a hipótese de distribuição uniforme de tensões. Isto indica que o ensaio, na maioria das situações, não fornece resultados confiáveis nas imediações da ruptura.

Isto também pode ser observado nos resultados obtidos nos ensaios complementares. Os valores de tensões e deformações na ruptura apresentam uma variabilidade muito maior do que os valores de tensões e deformações observados para uma deformação específica residual igual a 0,2%. Outro aspecto a salientar é a forma de ruptura, dependendo da orientação do carregamento em relação aos anéis de crescimento. Em corpos-de-prova ensaiados com a direção do carregamento oblíqua em relação aos anéis de crescimento, observa-se uma ruptura frágil, às vezes para valores de deformações não tão elevados.

Desta forma é evidenciado que a resistência da madeira na solicitação de compressão normal às fibras deve ser estabelecida em função do comportamento do material quanto às deformações, abandonando-se prontamente a idéia da ruptura do corpo-de-prova.

Com relação ao estabelecimento desta resistência convencional, parece mais lógica a adoção de um valor obtido por intermédio das deformações residuais, ao invés de valor obtido em função de um certo nível de deformação, pois não acarreta tratamento desigual entre

madeiras com módulos de elasticidade diferentes, isto é, permite que madeira mais deformável que outra, mas que apresentem limite de proporcionalidade semelhante, tenha maior deformação específica ao se atingir a resistência convencional.

Quanto à deformação específica residual a ser adotada para a obtenção da tensão que representará a resistência convencional da madeira na solicitação de compressão normal às fibras, recomenda-se o valor utilizado para materiais dúcteis sem patamar de escoamento definido, 0,2%. Observa-se, a partir do nível de tensão que provoca deformação específica residual igual a 0,2%, aumento exagerado nas deformações para incrementos constantes de tensão.

5 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE E DIREÇÃO DO CARREGAMENTO

Com o objetivo de obter subsídios para a elaboração do método de ensaio para caracterização da madeira na sollicitação de compressão normal às fibras, foram efetuadas séries de ensaios para observar o comportamento da madeira com a variação dos parâmetros velocidade e direção de aplicação de carga em relação aos anéis de crescimento. Foram efetuados ensaios utilizando a espécie Garapa (*Apuleia leiocarpa*), para duas condições de umidade: umidade acima do ponto de saturação das fibras e umidade em torno da observada para madeira seca ao ar. Os 54 corpos-de-prova ensaiados apresentaram valor médio para o peso específico igual a $8,2 \text{ kN/m}^3$, para teor de umidade igual a 12%.

5.1 Procedimentos adotados

Os ensaios foram realizados em corpos-de-prova apresentando face de aplicação de carga com seção quadrada, com dimensão nominal igual a 40 mm, e altura nominal na direção de aplicação da carga igual a 120 mm. As deformações foram obtidas em uma extensão de 40 mm centrada em relação à altura do corpo-de-prova, e medidas por intermédio de dois relógios comparadores com precisão de centésimo de milímetro posicionados em faces opostas do corpo-de-prova, conforme mostrado na figura 5.1.

Os ensaios foram realizados em máquina universal de

ensaios, marca Amsler, com capacidade de 250 kN, com velocidade constante de aplicação de carga.

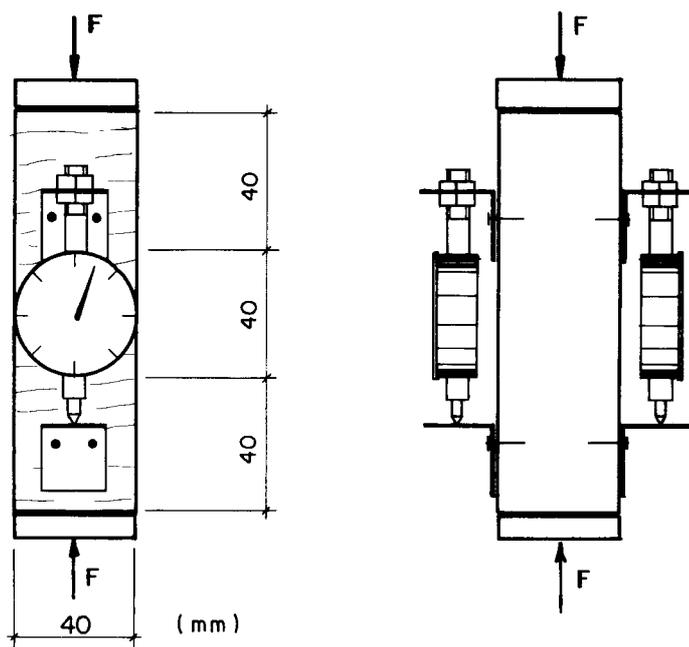


FIGURA 5.1 - Esquema dos ensaios

Foram realizadas duas séries de ensaios utilizando a espécie Garapa. Inicialmente, foram ensaiados corpos-de-prova com teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras e, posteriormente, corpos-de-prova com umidade em torno da observada para madeira seca ao ar.

Os corpos-de-prova com teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras foram ensaiados para quatro velocidades constantes de aplicação de carga: 1,0 MPa/minuto, 2,5 MPa/minuto, 5,0 Mpa/minuto e 10 Mpa/minuto. Para cada uma destas velocidades foram feitos ensaios para três direções de aplicação da carga em relação aos anéis de crescimento: direção radial, direção tangencial e a direção que forma um ângulo igual a 45° com as duas anteriores.

Os corpos-de-prova com teor de umidade em torno da observada para madeira seca ao ar foram ensaiados para duas velocidades constantes de aplicação de carga: 2,5

MPa/minuto e 5,0 MPa/minuto. Para cada velocidade, foram efetuados ensaios para as três direções de aplicação de carga definidas no parágrafo anterior.

Todos os corpos-de-prova foram obtidos de uma mesma peça de madeira, com seção transversal tendo dimensões iguais a 170 x 170 mm e comprimento de 3,5 m, com elevado teor de umidade. Necessitou-se de uma seção transversal relativamente avantajada, para possibilitar a retirada dos corpos-de-prova que seriam ensaiados para três direções de aplicação de carga. A peça de madeira foi serrada em fatias apresentando espessura pouco superior a 40 mm, cada uma delas possibilitando a confecção de dois corpos-de-prova, conforme figura 5.2. A destinação de cada fatia para determinada direção de carregamento ou teor de umidade foi feita de maneira aleatória. Obtidos os corpos-de-prova, sua destinação para ensaios com determinada velocidade também foi aleatorizada.

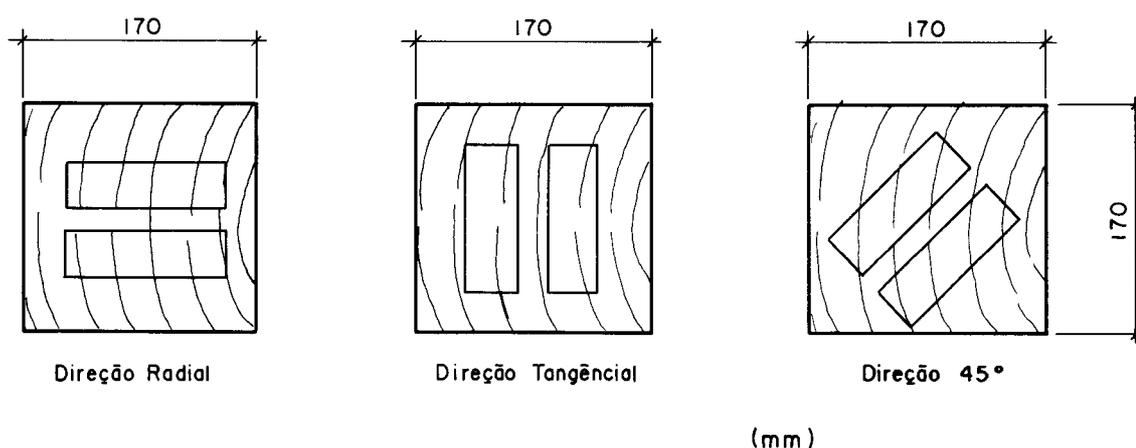


FIGURA 5.2 - Obtenção dos corpos-de-prova

A série de ensaios com madeira apresentando umidade acima do ponto de saturação foi efetuada logo após a confecção dos corpos-de-prova. Os corpos-de-prova desta série apresentaram o valor médio de seus teores de umidade igual a 60%. Para os ensaios efetuados com teor de umidade em torno da observada para madeira seca ao ar,

as fatias foram colocadas em climatizadora, ficando sob a ação de ventilação, possibilitando secagem. Estes corpos-de-prova apresentaram o valor médio de seus teores de umidade igual a 17%. Devido a problemas ocorridos durante a secagem, ocasionando a perda de algumas fatias de madeira, optou-se por descartar as velocidades máxima e mínima utilizadas para o caso anterior. A escolha dos dois níveis intermediários de velocidade de carregamento, foi devida à observação, nos ensaios feitos para madeira com alto teor de umidade, de uma melhor adequação destas velocidades em relação às velocidades máxima e mínima.

Todos os ensaios efetuados foram replicados três vezes. Para cada corpo-de-prova foi obtido o diagrama tensão x deformação, de maneira análoga ao apresentado no item 4.1. Os valores utilizados para comparação de resultados foram a tensão que provoca deformação específica residual igual a 0,2%, a deformação específica para este nível de tensão e o módulo de elasticidade. Estes parâmetros foram obtidos de maneira análoga ao descrito no item 4.1.

5.2 Resultados obtidos

As tabelas 5.1 e 5.2 apresentam os resultados obtidos nos ensaios, para teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras e em torno do observado para madeira seca ao ar, respectivamente.

TABELA 5.1 - Valores obtidos - saturada

CP	Velocidade (Mpa/min)	Direção	$\sigma_{r,0.2}$ (Mpa)	ϵ (%)	E (MPa)
01	1,0	radial	8,60	0,84	1384
02			8,50	0,82	1396
03			9,10	0,87	1366

TABELA 5.1 - Valores obtidos - saturada (continuação)

CP	Velocidade (Mpa/min)	Direção	$\sigma_{r,0.2}$ (Mpa)	ϵ (%)	E (MPa)
04	1,0	tangencial	6,50	1,26	607
05			6,15	1,22	601
06			6,50	1,11	723
07		45°	6,80	0,98	881
08			6,50	0,79	943
09			6,40	1,00	799
10	2,5	radial	9,00	0,83	1401
11			8,60	0,78	1473
12			8,80	0,78	1467
13		tangencial	6,40	1,33	563
14			6,80	1,11	744
15			6,30	1,17	657
16		45°	7,00	0,94	942
17			6,80	1,01	823
18			6,50	0,93	887
19	5,0	radial	9,10	0,73	1708
20			9,60	0,87	1430
21			9,00	0,90	1273
22		tangencial	7,40	1,20	741
23			6,40	1,17	656
24			6,60	1,10	746
25		45°	7,20	0,96	947
26			7,10	0,97	914
27			6,40	0,87	931
28	10,0	radial	9,00	0,88	1313
29			9,80	0,89	1424
30			9,30	0,88	1399
31		tangencial	6,80	1,09	762
32			7,00	1,16	733
33			7,30	1,17	752
34		45°	7,25	0,95	959
35			7,40	0,84	1167
36			7,50	0,84	1184

TABELA 5.2 - Valores obtidos - seca ao ar

CP	Velocidade (Mpa/min)	Direção	$\sigma_{r,0.2}$ (Mpa)	ϵ (%)	E (MPa)
37	2,5	radial	10,10	0,97	1323
38			10,75	0,88	1555
39			10,35	0,85	1598
40		tangencial	7,30	1,05	842
41			6,85	0,96	898
42			7,20	0,95	947
43		45°	7,45	0,98	945
44			7,60	0,92	1052
45			7,70	1,04	940
46	5,0	radial	10,90	0,75	1987
47			10,30	0,76	1845
48			10,40	0,92	1441
49		tangencial	7,35	0,98	946
50			7,65	1,01	947
51			7,50	0,93	1028
52		45°	7,55	0,88	1098
53			7,50	0,88	1092
54			7,55	0,90	1080

As figuras 5.3 a 5.6 apresentam os diagramas tensão x deformação obtidos nos ensaios efetuados para madeira saturada e as figuras 5.7 e 5.8 apresentam os diagramas tensão x deformação para madeira com teor de umidade em torno da observada para madeira seca ao ar. Os diagramas estão agrupados em termos da velocidade comum de aplicação de carga.

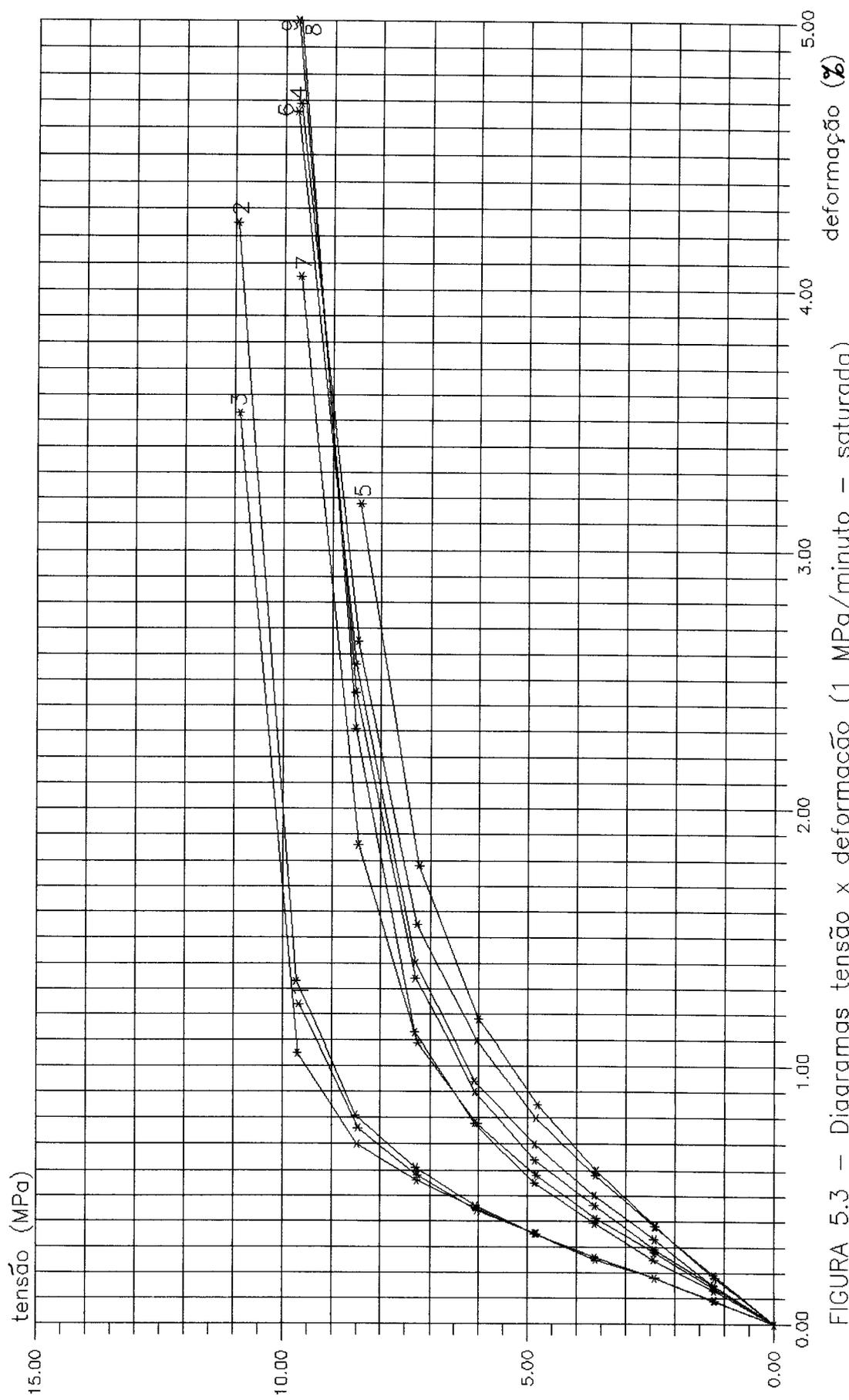


FIGURA 5.3 – Diagramas tensão x deformação (1 MPa/minuto – saturada)

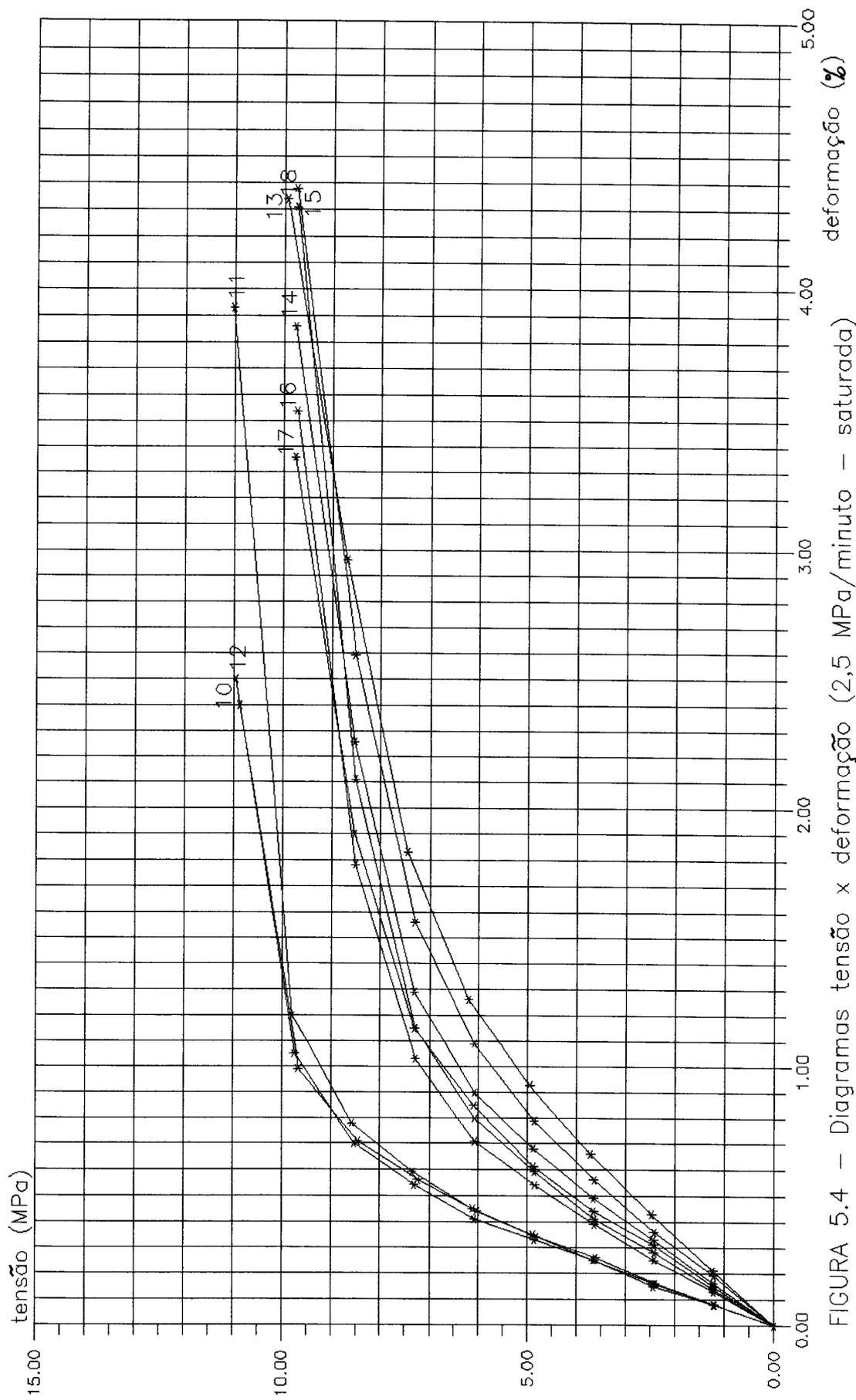


FIGURA 5.4 – Diagramas tensão x deformação (2,5 MPa/minuto – saturada)

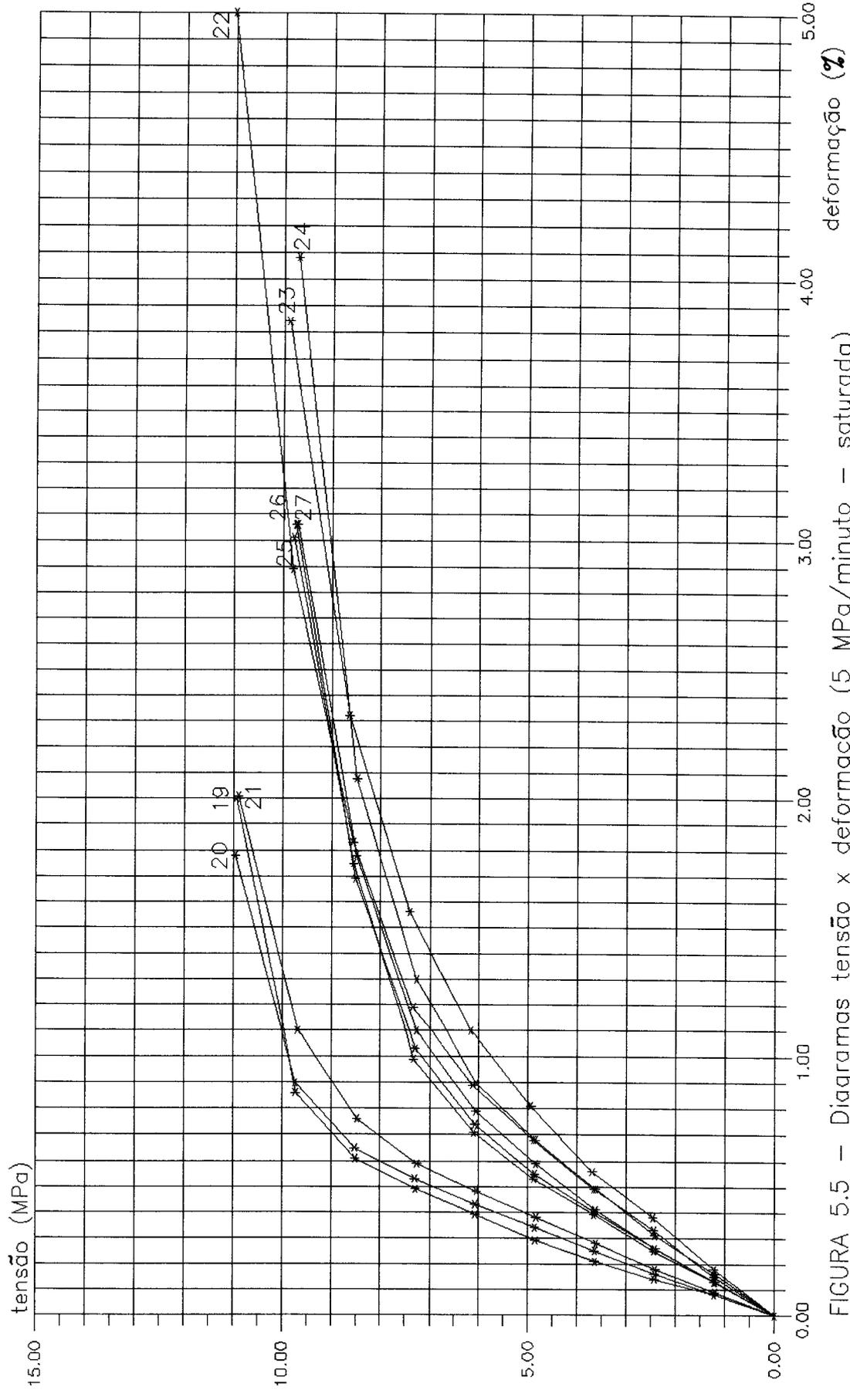


FIGURA 5.5 – Diagramas tensão x deformação (5 MPa/minuto – saturada)

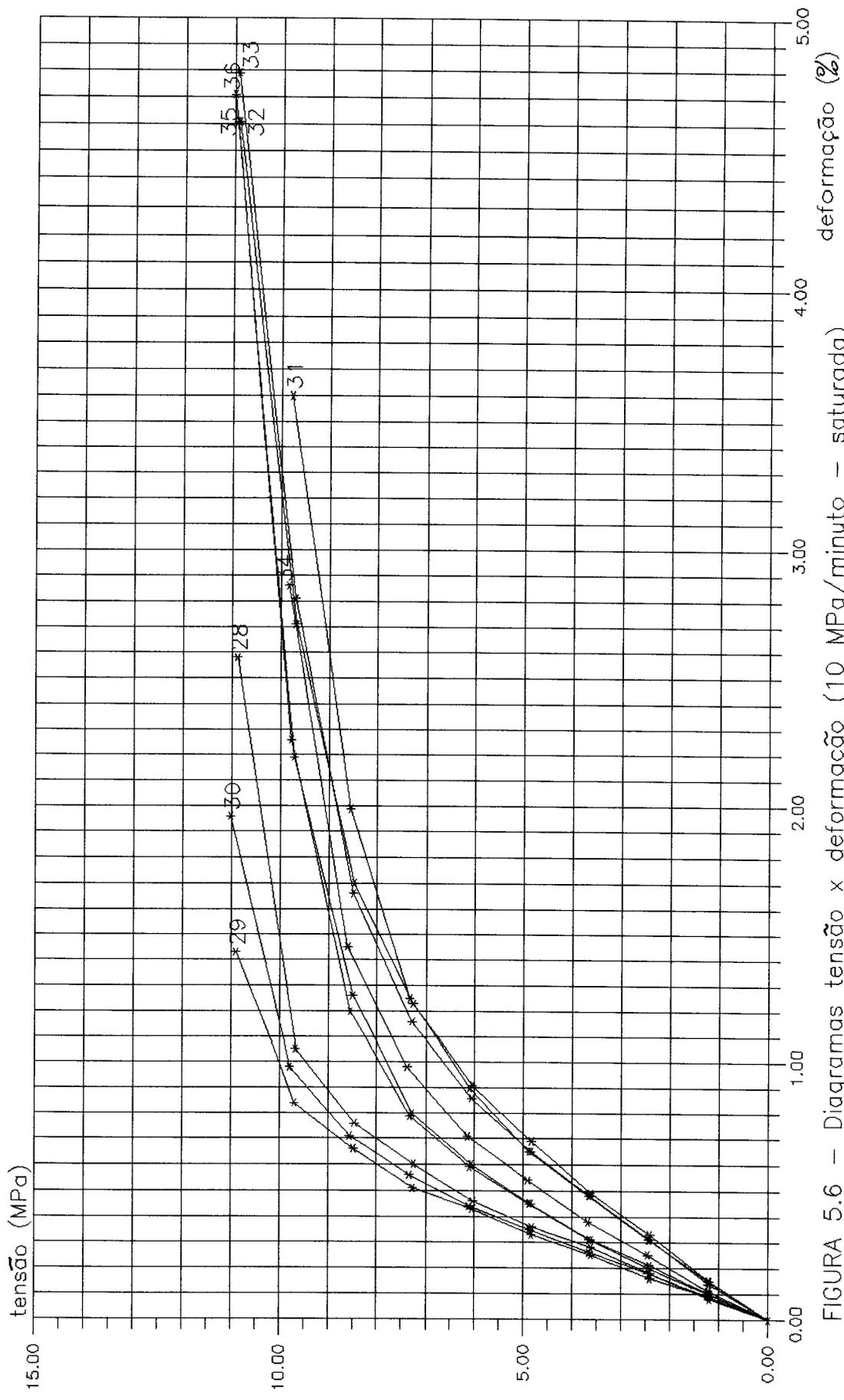


FIGURA 5.6 – Diagramas tensão x deformação (10 MPa/minuto – saturada)

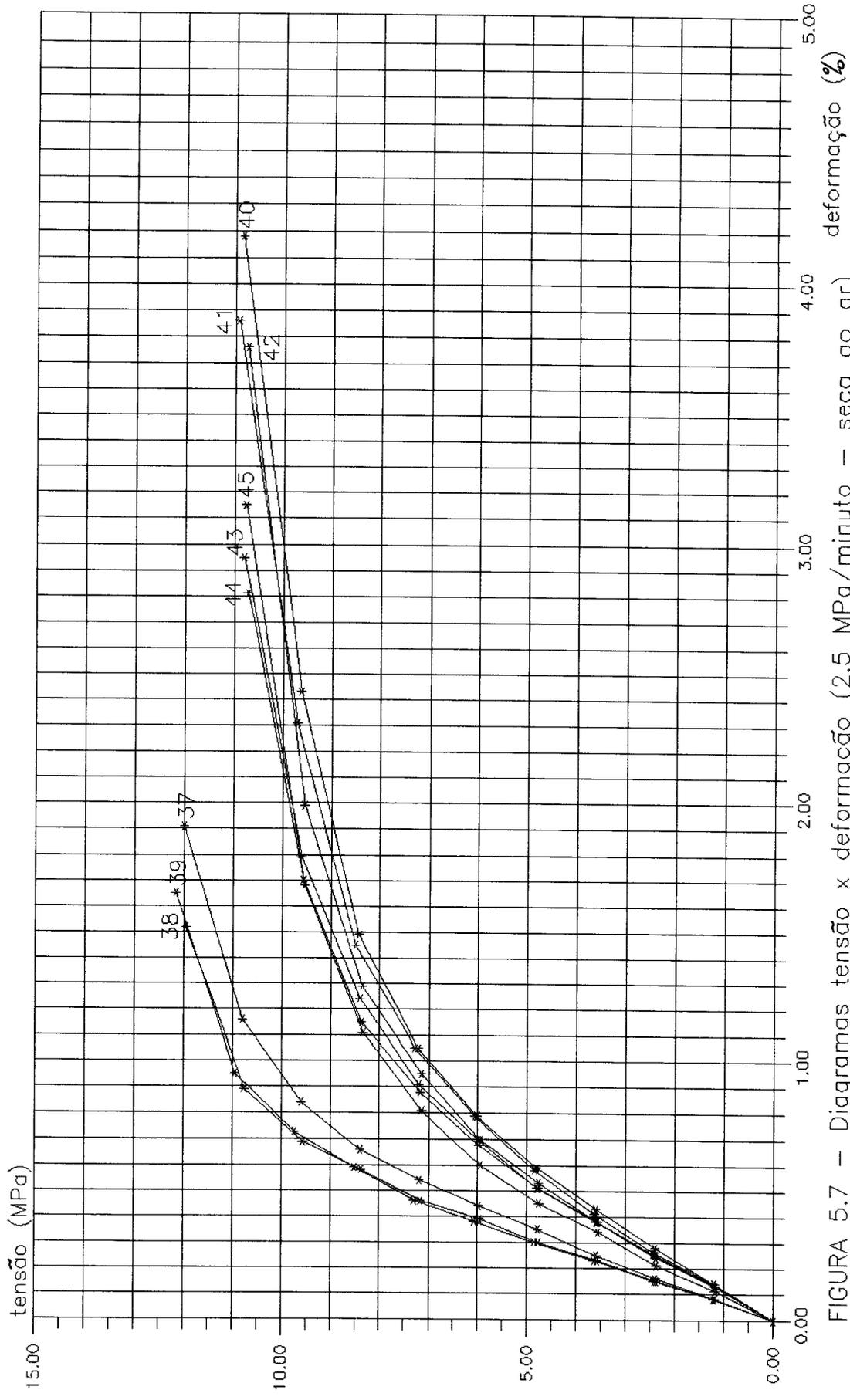


FIGURA 5.7 - Diagramas tensão x deformação (2,5 MPa/minuto - seca ao ar)

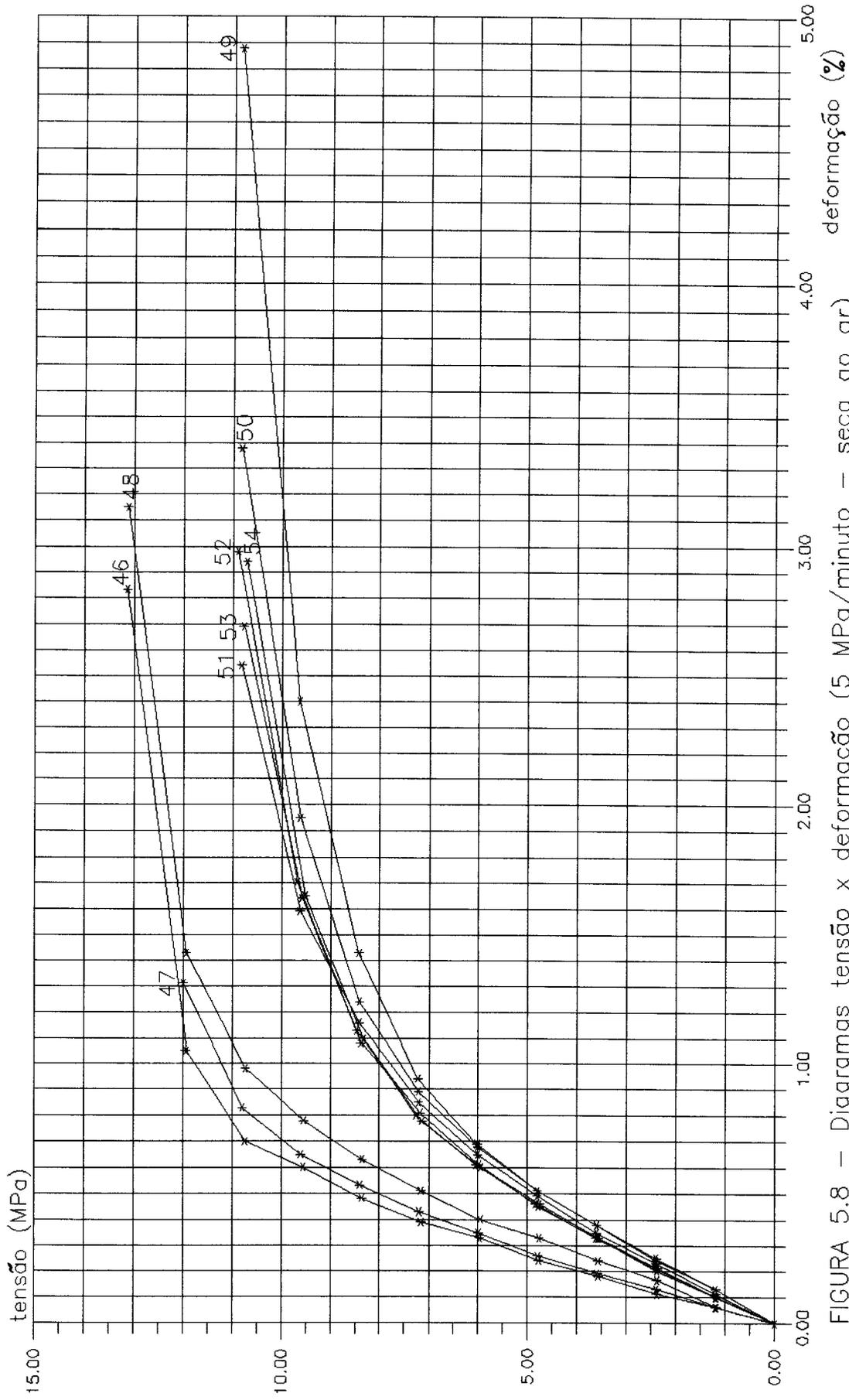


FIGURA 5.8 – Diagramas tensão x deformação (5 MPa/minuto – seca ao ar)

5.3 Análise dos resultados

As tabelas 5.3 e 5.4 apresentam os valores médios dos resultados obtidos nas três réplicas efetuadas para cada forma de ensaio, com os respectivos coeficientes de variação, para as duas condições de umidade, respectivamente.

TABELA 5.3 - Médias e coeficientes de variação - saturada

Velocidade (Mpa/min)	Direção	$\sigma_{r,0.2}$		ϵ		E	
		média (Mpa)	CV (%)	média (%)	CV (%)	média (MPa)	CV (%)
1,0	radial	8,73	3,7	0,84	3,0	1382	1,1
	tangencial	6,38	3,2	1,20	6,5	644	10,7
	45°	6,57	3,2	0,92	12,6	874	8,3
2,5	radial	8,80	2,3	0,80	3,6	1447	2,8
	tangencial	6,50	4,1	1,20	9,5	655	13,8
	45°	6,78	3,7	0,96	4,5	884	6,7
5,0	radial	9,23	3,5	0,83	10,9	1470	15,0
	tangencial	6,80	7,8	1,16	4,4	714	7,1
	45°	6,90	6,3	0,93	5,9	931	1,8
10,0	radial	9,37	4,3	0,88	0,7	1379	4,2
	tangencial	7,03	3,6	1,14	3,8	749	2,0
	45°	7,38	1,7	0,88	7,2	1103	11,4

TABELA 5.4 - Médias e coeficientes de variação-seca ao ar

Velocidade (Mpa/min)	Direção	$\sigma_{r,0.2}$		ϵ		E	
		média (Mpa)	CV (%)	média (%)	CV (%)	média (MPa)	CV (%)
2,5	radial	10,40	3,2	0,90	6,9	1492	9,9
	tangencial	7,12	3,3	0,99	5,6	896	5,9
	45°	7,59	1,6	0,98	0,0	979	6,5
5,0	radial	10,50	3,3	0,81	11,8	1758	16,1
	tangencial	7,50	2,0	0,97	4,2	974	4,8
	45°	7,53	0,4	0,89	1,3	1090	0,8

Para melhor visualização, as médias dos valores obtidos são apresentadas na forma de gráficos de barras, na figura 5.9. Nestes gráficos, as hachuras horizontais representam valores referentes aos ensaios com carga aplicada na direção radial, as hachuras verticais aos ensaios com carga aplicada na direção tangencial, e as hachuras inclinadas aos ensaios com carga aplicada na direção oblíqua (45°) em relação aos anéis de crescimento. As regiões pontilhadas se referem aos resultados obtidos para o teor de umidade em torno da observada para madeira seca ao ar.

Foi feita análise estatística considerando duas classificações (velocidade e direção do carregamento), utilizando-se o modelo aditivo, separadamente para as duas condições de umidade. Com este modelo, obtêm-se os gráficos resíduos x valores estimados, apresentando nas figuras 5.10 a 5.15, verificando-se a adequabilidade deste modelo. Salienta-se que, nos gráficos de resíduos, os eixos possuem escala diferenciada, para permitir melhor visualização da distribuição de resíduos.

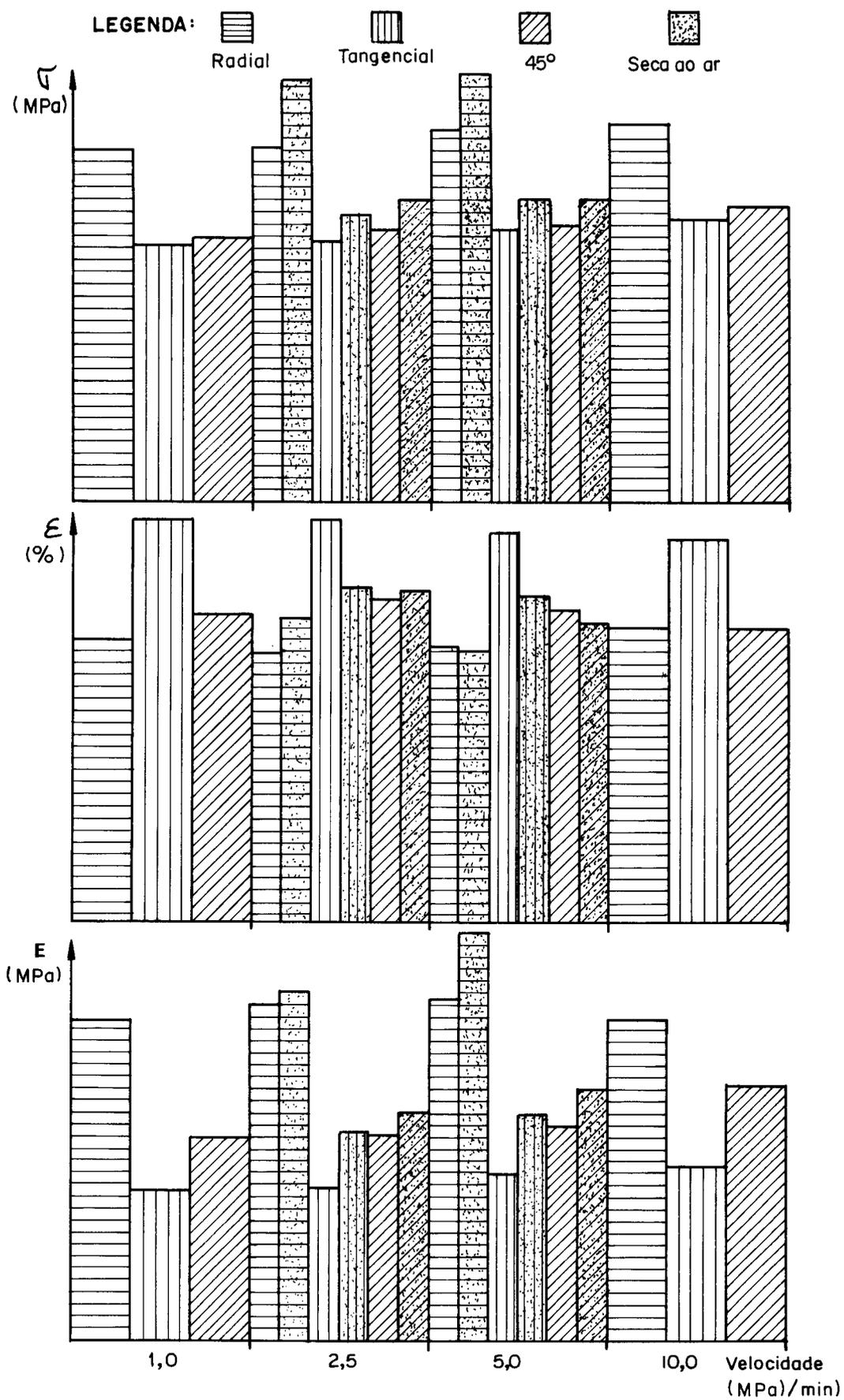


FIGURA 5.9 - Valores médios obtidos

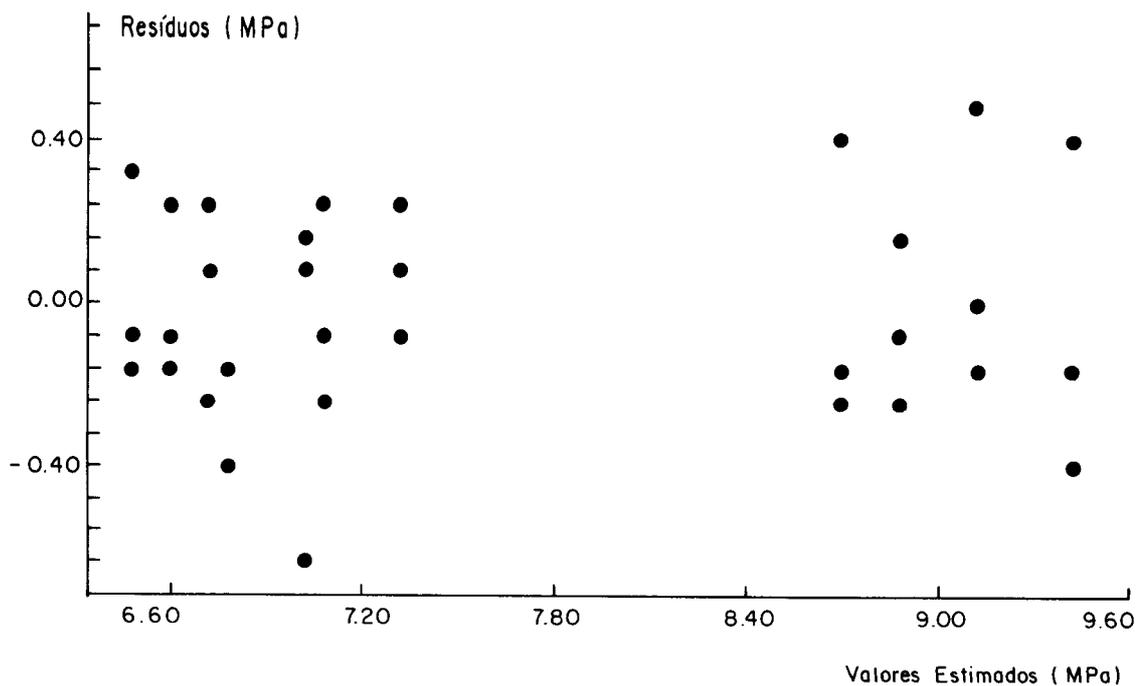


FIGURA 5.10 - Análise de resíduos - Tensões (saturada)

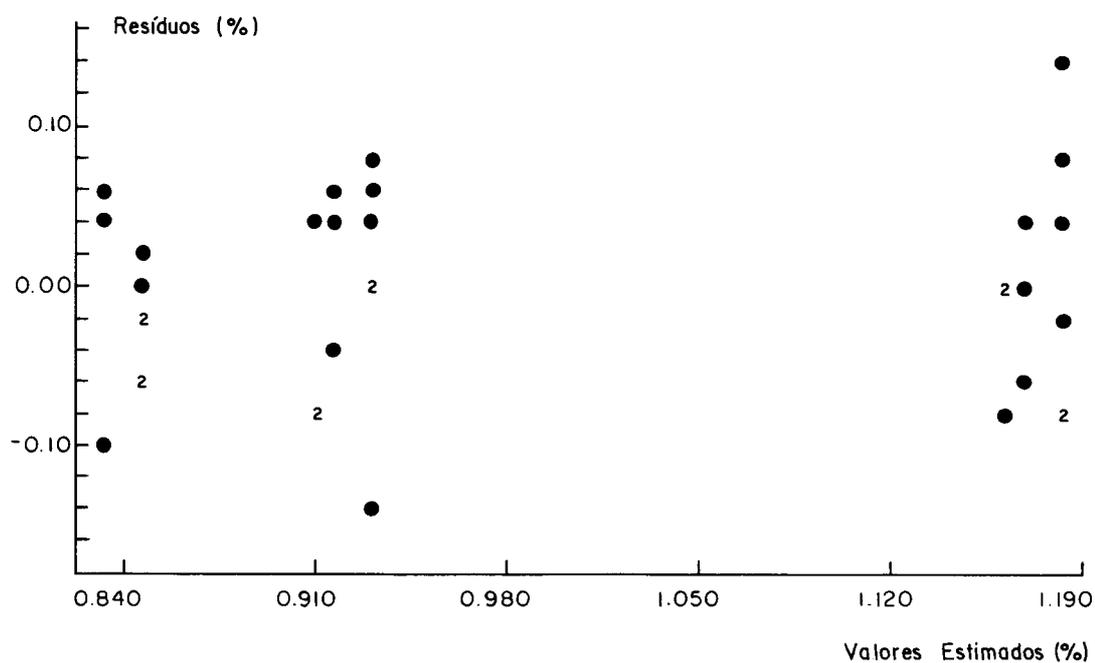


FIGURA 5.11 - Análise de resíduos - deformações (saturada)

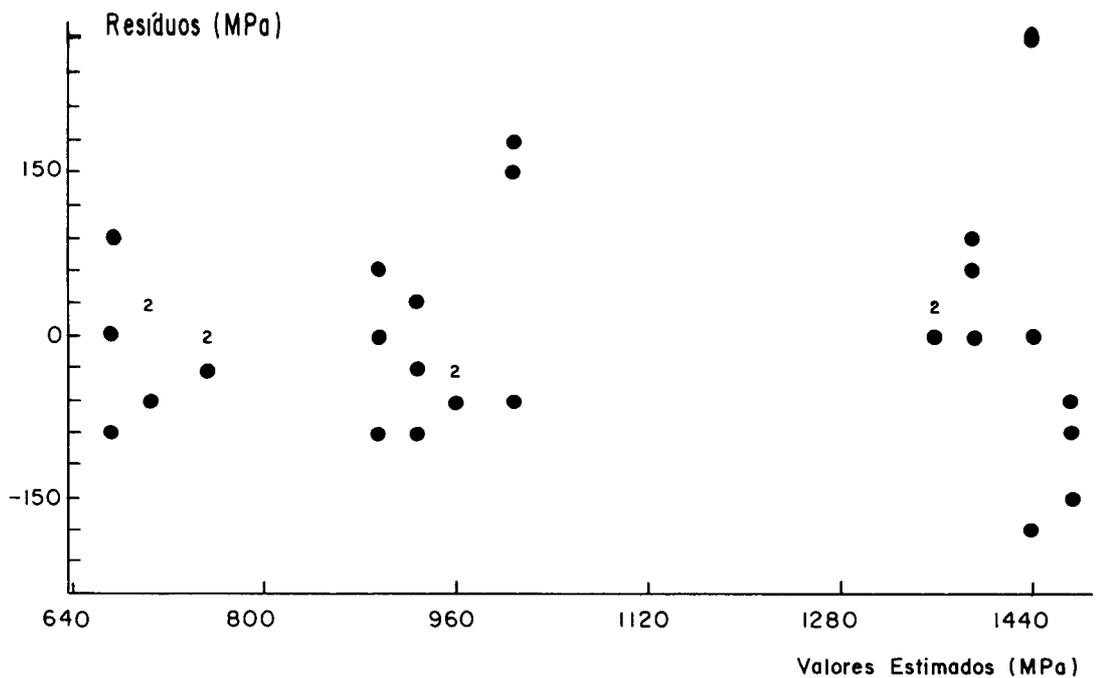


FIGURA 5.12 - Análise de resíduos - módulo de elasticidade (saturada)

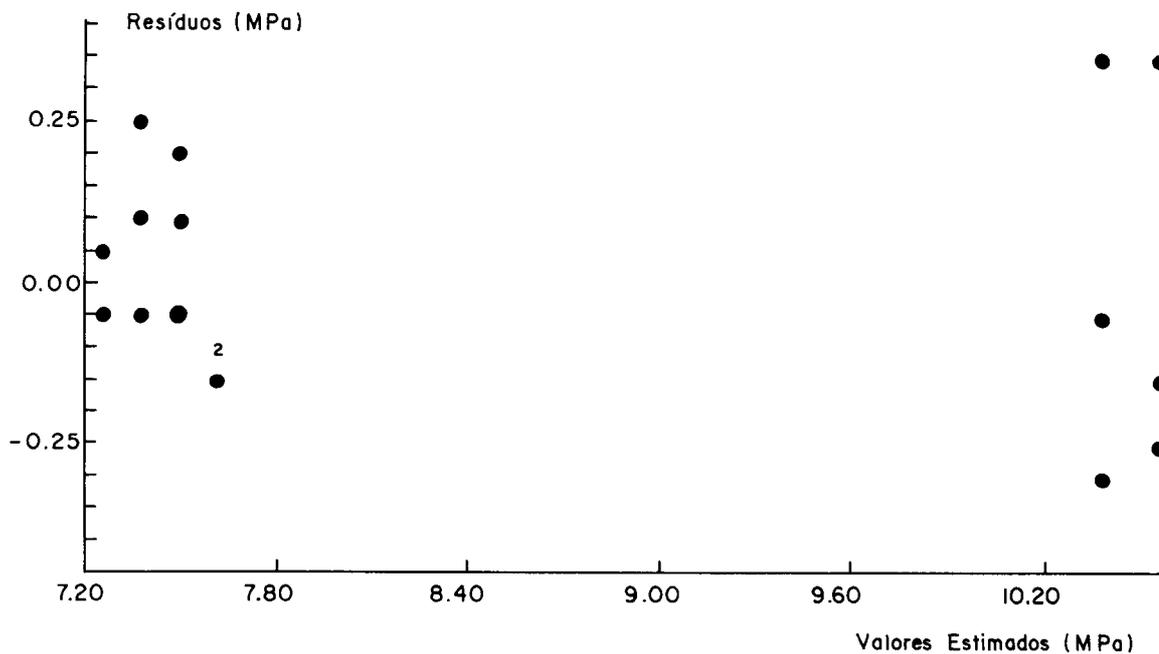


FIGURA 5.13 - Análise de resíduos - tensões (seca ao ar)

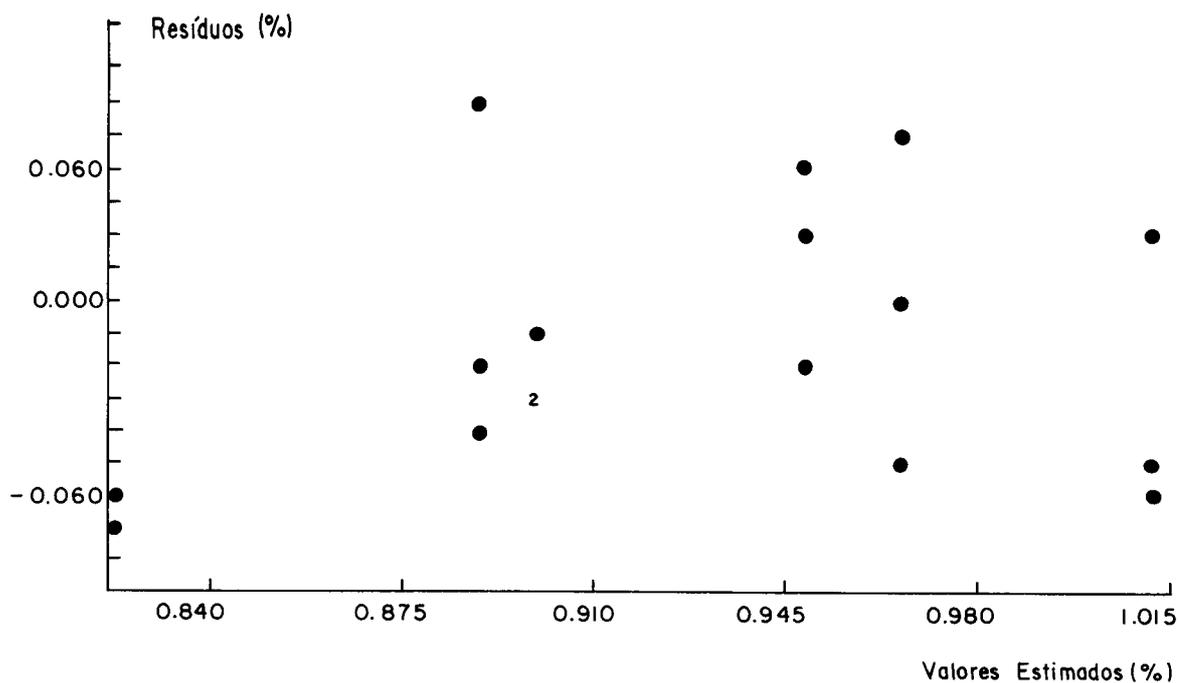


FIGURA 5.14 - Análise de resíduos - deformações
(seca ao ar)

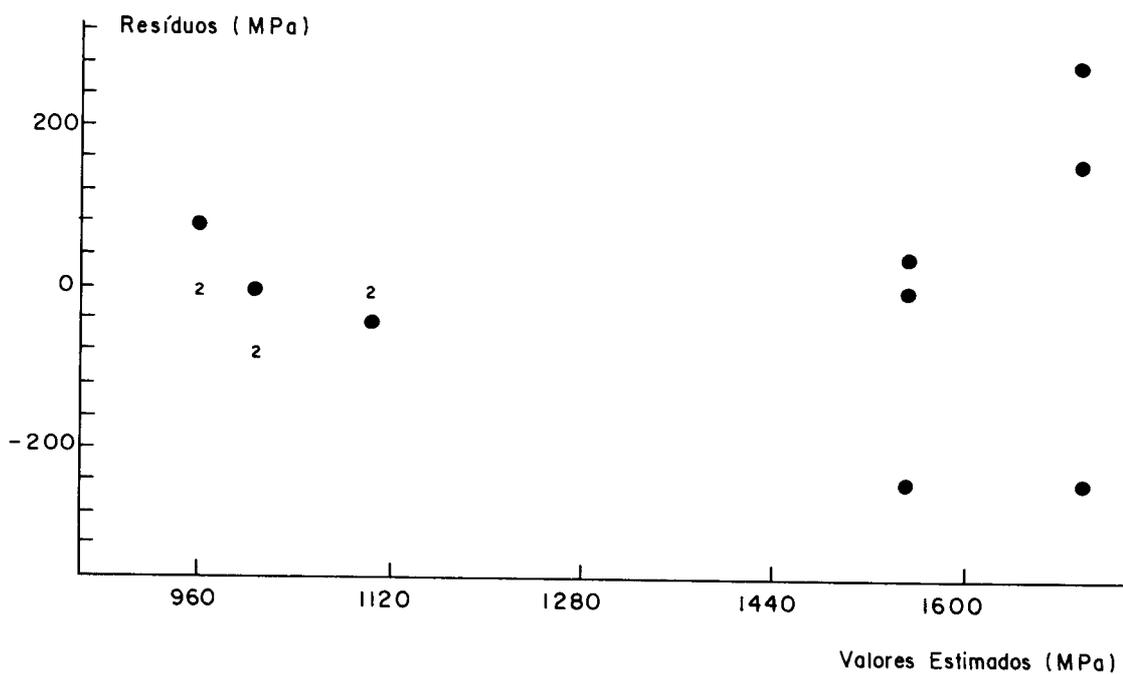


FIGURA 5.15 - Análise de resíduos - módulo de elasticidade
(seca ao ar)

A análise de variância para os resultados obtidos estão apresentadas na tabela 5.5.

TABELA 5.5 - Análise de variância

parâmetro analisado	fonte de variação	graus de liberdade	soma de quadrados	quadrados médios
tensão (saturada)	velocidade	3	2,6351	0,8784
	direção	2	40,5043	20,2522
	resíduos	30	2,4713	0,0824
deformação (saturada)	velocidade	3	0,00278	0,00093
	direção	2	0,72890	0,36445
	resíduos	30	0,13927	0,00464
módulo de elasticidade (saturada)	velocidade	3	63411	21137
	direção	2	3280753	1640377
	resíduos	30	268433	8948
tensão (seca ao ar)	velocidade	1	0,109	0,109
	direção	2	36,991	18,496
	resíduos	14	0,754	0,054
deformação (seca ao ar)	velocidade	1	0,01934	0,01934
	direção	2	0,04788	0,02394
	resíduos	14	0,11616	0,00350
módulo de elasticidade (seca ao ar)	velocidade	1	103361	103361
	direção	2	1669580	834790
	resíduos	14	252503	18036

O teste da hipótese de não haver diferença entre os tratamentos em cada classificação é efetuado analisando a relação entre os quadrados médios da classificação e dos resíduos, aplicando o teste "F" e obtendo-se a probabilidade de ocorrência daquela relação se as médias do tratamento da classificações fossem iguais. Os resultados dos testes são mostrados na tabela 5.6.

TABELA 5.6 - Testes de hipóteses

parâmetro analisado	classificação	relação s_t^2/s_r^2	Teste F	probabilidade
tensão (saturada)	velocidade	10,66	F _{9,90}	p<0,5%
	direção	245,78	F _{2,90}	p<0,5%
deformação (saturada)	velocidade	0,20	F _{9,90}	p>25%
	direção	78,54	F _{2,90}	p<0,5%
mód. elast. (saturada)	velocidade	2,36	F _{9,90}	5%<p<10%
	direção	183,32	F _{2,90}	p<0,5%
tensão (seca ao ar)	velocidade	2,02	F _{1,14}	10%<p<25%
	direção	345,41	F _{2,14}	p<0,5%
deformação (seca ao ar)	velocidade	5,53	F _{1,14}	2,5<p<5%
	direção	6,85	F _{2,14}	1%<p<2,5%
mód. elast. (seca ao ar)	velocidade	5,73	F _{1,14}	2,5<p<5%
	direção	46,45	F _{2,14}	p<0,5%

Foi efetuado também o teste estatístico para análise de variância considerando a interação entre as classificações (velocidade e direção do carregamento), por intermédio do comando Twoway do programa MINITAB. Os testes de hipóteses referentes às classificações conduziram a resultados semelhantes aos apresentados na tabela 5.6. A tabela 5.7 apresenta os resultados dos testes de hipótese referentes às interações entre as classificações velocidade e direção do carregamento.

TABELA 5.7 - Testes de hipóteses para as interações

parâmetro analisado	relação s_i^2/s_r^2	Teste F	probabilidade
tensão (saturada)	0,20	F _{6,24}	p>25%
deformação (saturada)	1,01	F _{6,24}	p>25%
mód. elast. (saturada)	1,73	F _{6,24}	10<p<25%
tensão (seca ao ar)	1,39	F _{1,12}	p>25%
deformação (seca ao ar)	0,86	F _{1,12}	p>25%
mód. elast. (seca ao ar)	0,81	F _{1,12}	p>25%

5.4 Comentários e conclusões

Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que a interação entre as classificações velocidade e direção do carregamento não foi significativa, para as duas condições de umidade analisadas, indicando que planos experimentais envolvendo estes fatores podem ser conduzidos separadamente.

Como já era esperado, a direção do carregamento apresenta uma influência muito grande nos resultados. Os valores dos parâmetros obtidos para a direção intermediária de carregamento (45°), principalmente os referentes às tensões que provocam deformação específica residual igual a 0,2%, não mostraram muita diferença em relação aos valores obtidos para a direção tangencial.

6 DEFINIÇÃO DAS DIMENSÕES DO CORPO-DE-PROVA

As conclusões obtidas no capítulo 3 conduziram a utilização de corpos-de-prova com face de aplicação de carga tendo seção quadrada com aresta menor do que a altura, com o intuito de diminuir interferências advindas da aplicação da carga. A partir desta definição, os ensaios foram realizados para dimensões da aresta iguais a 40 mm e 50 mm, e valores de altura de maneira que as relações altura/aresta dos corpos-de-prova utilizados se situaram entre os valores 2 e 3.

Na revisão da literatura, observa-se que alguns trabalhos concluem que a altura do corpo-de-prova tem influência nos resultados dos ensaios (BODIG (1966), KUNESK (1968), WOLCOTT ET.AL (1989)).

Com o objetivo de obter subsídios para o estabelecimento das dimensões do corpo a ser proposto no novo método de ensaio, foi realizado plano experimental para efetuar comparações entre corpos-de-prova com dimensões diferentes. Foram analisados corpos-de-prova apresentando relações altura/aresta iguais a 2 e 3. Também foram comparados dois métodos para obter as deformações, isto é, por intermédio de relógios comparadores posicionados na metade da altura do corpo-de-prova ou por intermédio do equipamento Dartec, com o intuito de verificar a diferença existente entre eles.

6.1 Procedimentos adotados

Foi realizada experimentação utilizando a espécie Tauari (*Couratari spp*). Os corpos-de-prova foram obtidos de uma mesma peça, apresentando média dos teores de umidade igual a 13,3% e média do peso específico igual a $6,1 \text{ kN/m}^3$, para o teor de umidade igual a 12%.

Foram utilizados três tipos de corpos-de-prova, todos com face de aplicação de carga com seção quadrada, com as seguintes dimensões: 40x40x80 mm, 50x50x100 mm e 40x40x120 mm. Os ensaios foram replicados cinco vezes.

Os ensaios foram efetuados com o equipamento Dartec, com a velocidade constante de aplicação de carga tendo valores convenientes de maneira a se obter velocidade constante de aplicação de tensão em todos os tipos de corpos-de-prova (0,1 kN/s para os corpos-de-prova com aresta igual a 50 mm, e 0,064 kN/s para os corpos-de-prova com aresta igual a 40 mm).

Os parâmetros observados nos ensaios, utilizados na comparação dos resultados, são a tensão que provoca deformação específica residual igual a 0,2% ($\sigma_{r,0.2\%}$), a deformação específica para este nível de tensão (ϵ) e o módulo de elasticidade (E). Nos três tipos de corpos-de-prova, estes parâmetros foram obtidos de maneira análoga ao apresentado anteriormente no item 4.3, com as deformações sendo obtidas em relação à altura total do corpo-de-prova, considerando o encurtamento como sendo igual ao deslocamento do atuador servo hidráulico do equipamento Dartec; este método será denominado D no transcorrer deste capítulo. Para os corpos-de-prova com alturas iguais a 100 mm e 120 mm, os parâmetros também foram determinados, simultaneamente, a partir dos resultados de deformações obtidos por intermédio de dois relógios comparadores situados em faces opostas do corpo-de-prova, em uma extensão igual a 40 mm na parte central da altura do corpo-de-prova (ver figura 5.1), de

maneira semelhante à descrita no item 4.1; este método será denominado R. Nos corpos-de-prova com altura igual a 80 mm não foi possível empregar este método, em virtude desta altura menor dificultar extremamente a colocação dos relógios comparadores.

Para confirmar os resultados obtidos nos ensaios utilizando a espécie Tauari, foi realizada experimentação utilizando a espécie Peroba do Norte (*Gloupia graba*). Em virtude de não se verificarem diferenças significativas entre os resultados obtidos com corpos-de-prova com dimensões iguais a 40x40x80 mm e 50x50x100 mm, nos ensaios anteriores, optou-se por realizar esta série com dois tipos de corpos-de-prova apresentando as seguintes dimensões: 40x40x80 mm e 40x40x120 mm. A razão de manter a mesma seção transversal para os dois tipos de corpos-de-prova foi o de se ter variação apenas em um parâmetro dimensional (altura), podendo a influência deste fator ser melhor quantificada. Os corpos-de-prova apresentaram teor de umidade médio igual a 14,7%. O peso específico médio, para teor de umidade igual a 12%, foi 8,3 kN/m³. Esta experimentação foi conduzida de maneira análoga ao descrito anteriormente. A velocidade de aplicação de carga foi igual a 0,1 kN/s. Os ensaios foram replicados quatro vezes.

A figura 6.1 mostra a orientação dos anéis de crescimento nos corpos-de-prova utilizados.



Tauari



Peroba do Norte

FIGURA 6.1 - Orientação dos anéis de crescimento

6.2 Resultados obtidos

Os resultados obtidos para as espécies Tauari e Peroba do Norte estão apresentados nas tabelas 6.1 e 6.2, respectivamente.

TABELA 6.1 - Resultados obtidos - Tauari

CP	dimensões nominais (mm)	método	$\sigma_{r,0.2}$ (MPa)	ϵ (%)	E (MPa)
01	40x40x80	D	4,22	1,30	382
02			4,20	1,28	386
03			4,31	1,30	391
04			4,25	1,30	387
05			4,65	1,30	426
06	50x50x100	D	4,32	1,35	375
07			4,31	1,27	402
08			4,36	1,27	405
09			4,26	1,25	405
10			4,19	1,24	403
06		R	4,15	1,13	455
07			4,04	1,03	490
08			4,25	1,08	474
09			4,15	1,04	496
10			4,14	1,12	452
11	40x40x120	D	4,11	1,20	409
12			4,04	1,17	414
13			4,03	1,21	399
14			4,09	1,21	404
15			4,37	1,22	428
11		R	3,75	1,01	463
12			3,81	1,01	469
13			3,57	0,99	453
14			3,98	1,20	397
15			4,30	1,12	485

TABELA 6.2 - Resultados obtidos - Peroba do Norte

CP	dimensões nominais (mm)	método	$\sigma_{r,0.2}$ (MPa)	ϵ (%)	E (MPa)
01	40x40x80	D	8,54	1,13	921
02			8,22	1,14	892
03			9,33	1,09	1048
04			8,59	1,10	954
05	40x40x120	D	8,93	1,07	1048
06			8,51	1,07	988
07			8,40	1,05	986
08			8,60	1,06	993
05		R	8,83	0,88	1321
06			8,46	1,02	1031
07			7,45	0,84	1170
08			8,09	0,90	1149

6.3 Análise dos resultados

Os valores médios obtidos para as réplicas dos ensaios com os respectivos coeficientes de variação estão apresentados nas tabelas 6.3 e 6.4.

Os valores médios dos resultados estão apresentados nas figuras 6.2 e 6.3, na forma de diagramas de barras, para melhor visualização.

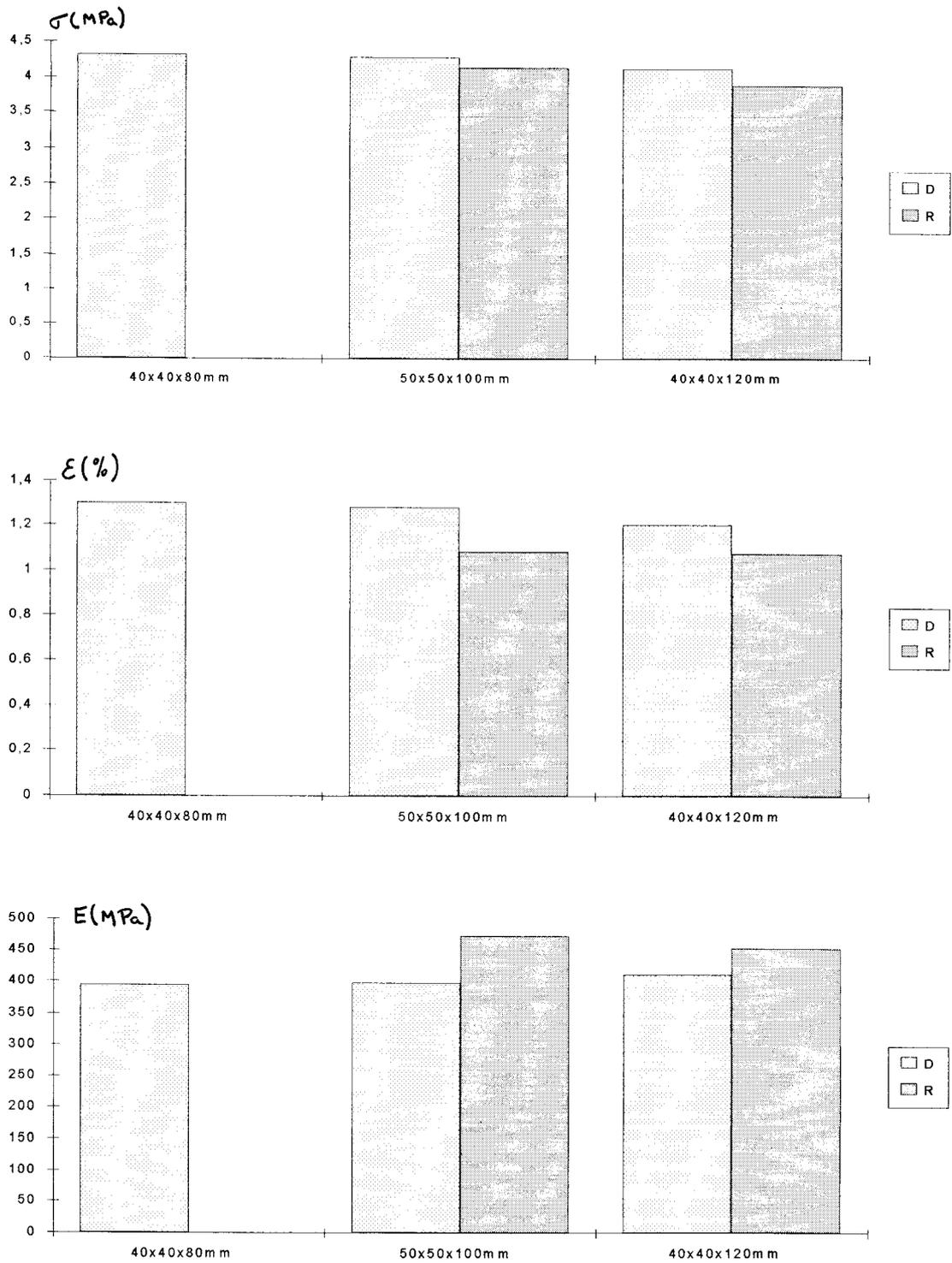


FIGURA 6.2 - Valores médios obtidos - Tauari

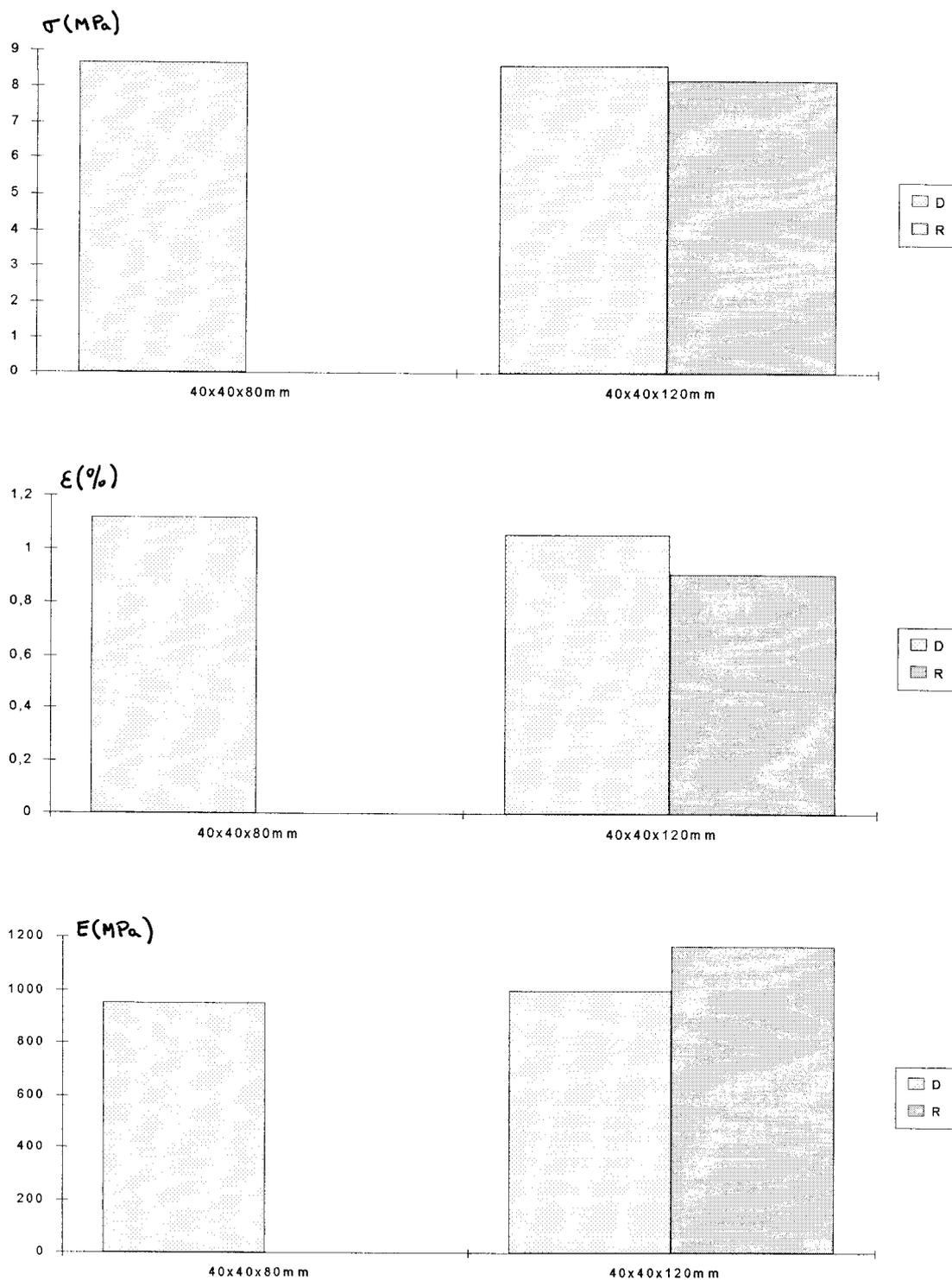


FIGURA 6.3 - Valores médios obtidos - Peroba do Norte

TABELA 6.3 Médias e coeficientes de variação - Tauari

dimensões nominais (mm)	método	$\sigma_{r, 0.2\%}$		ϵ		E	
		média (MPa)	CV (%)	média (%)	CV (%)	média (MPa)	CV (%)
40x40x80	D	4,32	4,3	1,30	0,7	394	4,6
50x50x100	D	4,29	1,5	1,28	3,0	398	3,2
	R	4,15	1,8	1,08	4,2	473	4,2
40x40x120	D	4,13	3,4	1,20	1,6	411	2,7
	D	3,89	7,1	1,07	8,5	453	7,4

TABELA 6.4 - Médias e coeficientes de variação
Peroba do Norte

dimensões nominais (mm)	método	$\sigma_{r, 0.2\%}$		ϵ		E	
		média (MPa)	CV (%)	média (%)	CV (%)	média (MPa)	CV (%)
40x40x80	D	8,67	5,4	1,12	2,1	954	7,1
40x40x120	D	8,61	2,7	1,06	0,9	1004	3,0
	R	8,21	7,2	0,91	8,5	1168	10,2

6.4 Comentários e conclusões

A análise dos resultados referentes às tensões permite concluir:

- não ocorreram diferenças significativas entre os resultados obtidos utilizando o método D em

corpos-de-prova com mesma relação altura/aresta.

- as diferenças observadas entre os resultados obtidos com o método D para corpos-de-prova com dimensões iguais a 40x40x80 mm e 40x40x120 mm, foram maiores no caso da espécie Tauari do que no caso da espécie Peroba do Norte. Isto pode ter ocorrido devido à instabilidade do corpo-de-prova com altura igual a 120 mm, pronunciada na primeira espécie, que possui madeira mais deformável.
- existe uma tendência permanente dos resultados obtidos pelo método R fornecer resultados com valores inferiores. Deve-se observar, inclusive, que os resultados obtidos pelos dois métodos são pareados, isto é, são obtidos, dois a dois, do mesmo corpo-de-prova.

Quanto aos resultados referentes às deformações, pode-se concluir:

- utilizando o método D, nota-se uma pequena tendência de diminuição dos valores obtidos à medida que se aumenta a altura do corpo-de-prova. Isto deve ser provocado por irregularidades da superfície na face de aplicação da carga do corpo-de-prova (não paralelismo entre faces e rugosidade), fator que é mais significativo no caso de menor altura dos corpos-de-prova.
- os valores obtidos utilizando o método R são inferiores aos obtidos pelo método D.

Quanto aos módulos de elasticidade pode-se concluir:

- os resultados obtidos utilizando o método D foram equivalentes para os corpos-de-prova da espécie Tauari, enquanto que os da espécie Peroba do Norte apresentaram diferença.
- os valores obtidos com o método D foram inferiores aos obtidos com o método R.

Observa-se também, de maneira geral, menor variação nos resultados obtidos com o método D.

Com base nos resultados dos ensaios deste capítulo e nas observações efetuadas no transcorrer da experimentação realizada, optou-se por eleger o corpo-de-prova com dimensões iguais a 50x50x100 mm como o mais indicado para o ensaio de caracterização da madeira na solicitação de compressão normal às fibras. Os motivos que induziram esta escolha foram, principalmente, os seguintes:

- o corpo-de-prova com estas dimensões não apresenta problemas de instabilidade verificados em alguns ensaios que utilizaram corpos-de-prova com maior relação altura/aresta.
- apresenta altura conveniente em termos de diminuição de erros de ensaios devidos às irregularidades das superfícies dos corpos-de-prova.
- facilidade de obtenção dos corpos-de-prova de peças com seção comercial a partir de 60x120 mm.
- padronização das dimensões da seção de aplicação das cargas com as dimensões da seção transversal da maioria dos corpos-de-prova a serem empregados na novo método de ensaios para caracterização de madeira, ora em fase final de elaboração.

Com relação à forma de obtenção das deformações, considera-se que a medida dos encurtamentos em trecho central da altura do corpo-de-prova proporciona melhor precisão nos resultados, em relação à medida em toda a altura. Apesar disto, considerando que os erros cometidos podem ser minimizados por um bom acabamento na superfície da face de aplicação da carga, sugere-se a adoção de método que obtenha os encurtamentos ocorridos em toda a altura, pela maior facilidade de execução dos ensaios, principalmente quando se dispõe de sistema de aplicação de carga com mais recursos, como no caso do equipamento utilizado no método D.

7 DEFINIÇÃO DA VELOCIDADE DE CARREGAMENTO

A velocidade de carregamento é um dos parâmetros a ser definido para o ensaio de caracterização da madeira na compressão normal às fibras. É um fator que apresenta influência nos resultados dos ensaios.

Os resultados dos ensaios efetuados no transcórre deste trabalho permitiram concluir que não tem sentido estabelecer uma velocidade constante de aplicação de carga, em virtude da grande variação observada nos valores do módulo de elasticidade para as diversas espécies nacionais de madeira. Uma determinada velocidade de aplicação de carga que se mostra adequada para uma espécie com elevado módulo de elasticidade, certamente será muito elevada para outra espécie que seja muito mais deformável. Desta forma, deve-se efetuar o ensaio com velocidade constante de aplicação da carga, sendo fixado o tempo de duração do ensaio, ou com velocidade constante de deformação.

A experiência adquirida no desenvolvimento dos ensaios deste trabalho permite estabelecer o tempo de duração do ensaio como sendo igual a dois minutos, no caso de velocidade constante de aplicação da carga. Entende-se como duração do ensaio o tempo decorrido do início de aplicação da carga até se atingir a tensão que provoca deformação específica residual igual a 0,2%. Este tempo igual a dois minutos se mostrou adequado em termos de obtenção das leituras de deformações. A tolerância de erro no tempo do ensaio está sendo admitida como sendo igual a trinta segundos.

Um dos objetivos dos ensaios apresentados neste

capítulo é verificar a diferença existente nos ensaios conduzidos com velocidade constante de aplicação da carga, com tempos de duração de ensaio diferentes, mas dentro da tolerância admitida. Outro objetivo é verificar a diferença existente entre os ensaios realizados com velocidade constante de aplicação de carga e velocidade constante de deformação.

7.1 Procedimentos adotados

Foi realizada experimentação com o objetivo de verificar se existe diferença significativa entre os resultados obtidos em ensaios realizados com três diferentes velocidades de aplicação de carga, de tal forma que os tempos de duração dos ensaios fossem iguais a um minuto e meio, dois minutos e dois minutos e meio. Ensaio preliminar feito para cada espécie definiu, com boa aproximação, a velocidade de carga adequada para a realização do ensaio em dois minutos. As outras duas velocidades, inferior e superior, foram definidas com base nos resultados obtidos utilizando a velocidade intermediária.

Também foi realizada experimentação com velocidade constante de deformação de forma que os tempos de duração do ensaios fossem em torno de dois minutos, para comparação com os resultados obtidos em ensaios com velocidade constante de aplicação de carga.

Os ensaios foram realizados com o equipamento Dartec, o que possibilitou um perfeito controle nas velocidades dos ensaios.

As quatro espécies de madeira utilizadas para a confecção dos corpos-de-prova, com os respectivos valores médios para teores de umidades e pesos específicos para umidade igual a 12%, foram:

- Ipê (*Tabebuia spp*): $U=13,0\%$; $\rho_{12} = 8,9 \text{ kN/m}^3$
- Pinus (*Pinus elliottii*): $U=16,3\%$; $\rho_{12} = 4,6 \text{ kN/m}^3$

- Peroba do Norte (*Gloupiia glabra*): $U=16,1\%$; $\rho_{12}=8,6 \text{ kN/m}^3$

- Peroba Rosa (*Aspidosperma polyneuron*): $U=14,4\%$;

$$\rho_{12} = 8,4 \text{ kN/m}^3$$

Os corpos-de-prova referentes a cada espécie foram obtidos de uma mesma peça de madeira. Os ensaios foram replicados quatro vezes. A destinação dos corpos-de-prova para cada tipo de velocidade de ensaio foi aleatória.

Os corpos-de-prova possuem face de aplicação de carga com seção quadrada, tendo a aresta dimensão nominal igual a 50 mm, e altura nominal igual a 100 mm.

A figura 7.1 apresenta a orientação dos anéis de crescimento nos corpos-de-prova de cada espécie utilizada nestes ensaios.

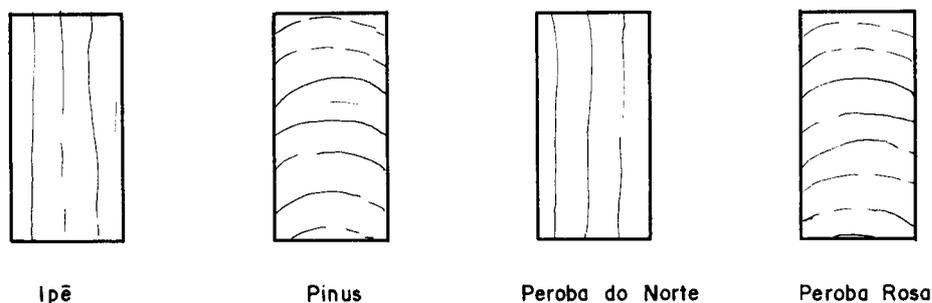


FIGURA 7.1 - Orientação dos anéis de crescimento

Os parâmetros observados nos ensaios, utilizados na comparação dos resultados, são a tensão que provoca deformação específica residual igual a 0,2% ($\sigma_{r,0.2\%}$), a deformação específica para este nível de tensão (ϵ) e o módulo de elasticidade (E). Foram obtidos de maneira análoga ao apresentado anteriormente no item 4.3.

7.2 Resultados obtidos

A tabela 7.1 apresenta os resultados obtidos nos ensaios realizados. Também informa o tempo de duração de cada ensaio realizado.

TABELA 7.1 - Resultados obtidos

Espécie	Velocidade do ensaio	$\sigma_{r,0.2\%}$ (MPa)	ϵ (%)	E (MPa)	tempo (s)
Ipê	240 N/s	12,99	1,27	1208	135
		13,15	1,28	1219	141
		13,60	1,29	1246	141
		13,68	1,30	1241	142
	300 N/s	13,14	1,30	1199	109
		13,60	1,29	1244	113
		13,86	1,30	1261	115
		13,97	1,30	1276	116
	400 N/s	13,41	1,32	1199	84
		13,59	1,29	1248	84
		13,78	1,30	1255	86
		13,80	1,32	1239	86
	0,011 mm/s	13,35	1,29	1224	117
		13,45	1,27	1260	115
		13,22	1,29	1209	117
		13,69	1,27	1275	115
Pinus	48 N/s	2,76	1,24	266	147
		2,70	1,30	245	145
		2,83	1,32	252	151
		2,78	1,33	247	148
	60 N/s	2,76	1,29	254	118
		2,79	1,34	245	119
		2,84	1,29	260	121
		2,81	1,30	257	120
	80 N/s	2,78	1,33	246	89
		2,81	1,32	251	90
		2,78	1,30	253	89
		2,87	1,36	247	92
	0,010 mm/s	2,69	1,30	245	132
		2,73	1,32	248	134
		2,74	1,31	246	133
		2,76	1,29	251	129

TABELA 7.1 - Resultados obtidos (continuação)

Espécie	Velocidade do ensaio	$\sigma_{r, 0.2\%}$ (MPa)	ϵ (%)	E (MPa)	tempo (s)
Peroba do Norte	134 N/s	8,79	1,19	890	165
		7,53	1,24	723	140
		7,72	1,21	771	144
		8,41	1,20	840	157
	170 N/s	7,92	1,17	811	117
		8,17	1,20	813	120
		8,18	1,23	797	121
		7,72	1,26	729	114
	223 N/s	7,53	1,24	719	84
		8,43	1,23	821	95
		7,64	1,22	752	86
		7,79	1,22	763	87
	0,010 mm/s	7,22	1,20	720	120
		8,39	1,17	868	117
		7,34	1,21	730	121
		7,29	1,17	751	117
Peroba Rosa	260 N/s	14,90	1,21	1466	146
		15,40	1,22	1514	151
		15,13	1,21	1491	149
		15,49	1,22	1512	151
	330 N/s	15,30	1,24	1474	118
		15,31	1,22	1499	119
		15,62	1,24	1499	121
		15,73	1,23	1533	122
	440 N/s	15,06	1,22	1474	88
		15,27	1,22	1503	89
		15,86	1,23	1535	92
		15,85	1,25	1516	91
	0,010 mm/s	14,63	1,16	1517	116
		14,29	1,19	1441	119
		14,78	1,20	1513	120
		14,48	1,18	1469	118

7.4 Análise dos resultados

A tabela 7.2 apresenta as médias e os coeficientes de variação das quatro réplicas para cada espécie e velocidade de ensaio.

TABELA 7.2 Médias e coeficientes de variação

Espécie	Velocidade do ensaio	$\sigma_{r, 0.2\%}$		ϵ		E	
		média (MPa)	CV (%)	média (%)	CV (%)	média (MPa)	CV (%)
Ipê	240 N/s	13,36	2,5	1,29	1,0	1229	1,5
	300 N/s	13,64	2,7	1,30	0,4	1245	2,7
	400 N/s	13,65	1,3	1,31	1,1	1235	2,0
	0,011 mm/s	13,43	1,5	1,28	0,9	1242	2,5
Pinus	48 N/s	2,77	1,9	1,30	3,2	253	3,8
	60 N/s	2,80	1,2	1,31	1,8	254	2,6
	80 N/s	2,81	1,5	1,33	1,9	249	1,3
	0,010 mm/s	2,73	1,1	1,31	1,0	248	1,1
Peroba do Norte	134 N/s	8,11	7,3	1,21	1,8	806	9,2
	170 N/s	8,00	2,8	1,22	3,2	788	5,0
	223 N/s	7,85	5,1	1,23	0,8	764	5,6
	0,010 mm/s	7,56	7,3	1,19	1,7	767	8,9
Peroba Rosa	260 N/s	15,23	1,8	1,22	0,5	1496	1,5
	330 N/s	15,49	1,4	1,23	0,8	1501	1,6
	440 N/s	15,51	2,6	1,23	1,1	1507	1,7
	0,010 mm/s	14,55	1,4	1,18	1,4	1485	2,5

A figura 7.2 apresenta os valores médios na forma de diagrama de barras, para melhor visualização. Nesta figura, as velocidade enumeradas de 1 a 3 correspondem às velocidades constantes de aplicação de carga, em ordem crescente, e a velocidade 4 à velocidade constante de deformação.

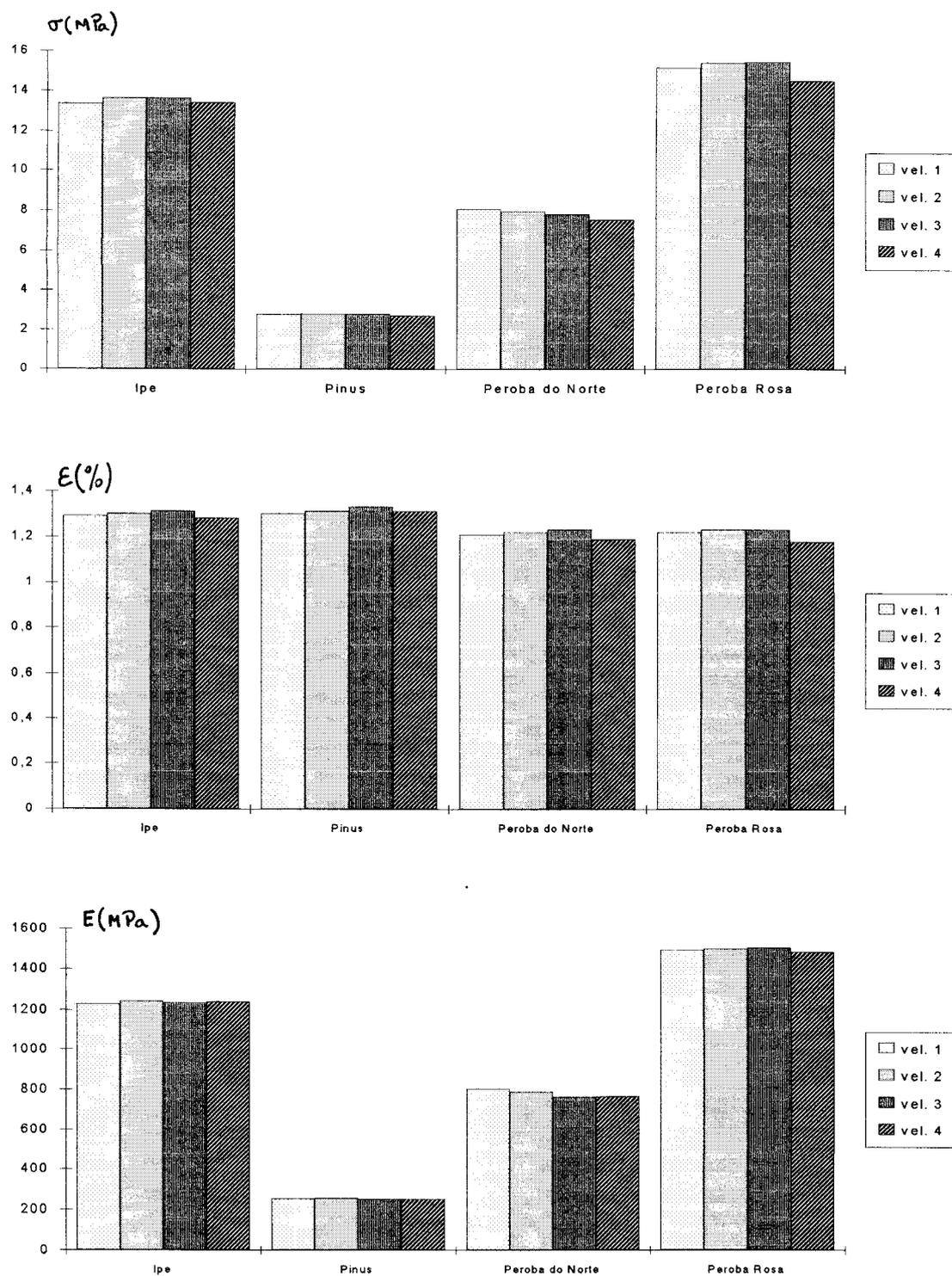


FIGURA 7.2 - Valores médios obtidos

Os resultados obtidos nos ensaios efetuados com velocidade constante de carga foram analisados estatisticamente, para verificar se existe influência significativa do tempo de duração do ensaio, desde que seu valor se encontre dentro da faixa admitida (dois minutos, com uma tolerância de erro no máximo igual a meio minuto).

A análise estatística foi efetuada considerando o experimento com uma classificação (velocidade de carga) apresentando três tratamentos (velocidades para obter tempos de duração iguais a dois minutos e meio, dois minutos e um minuto e meio), e quatro blocos (espécies de madeira), replicado quatro vezes. Considerou-se o modelo aditivo para os efeitos dos tratamentos e blocos, sem interação. As figuras 7.3 a 7.5 apresentam os gráficos de resíduos contra valores estimados, obtidos pelo modelo adotado.

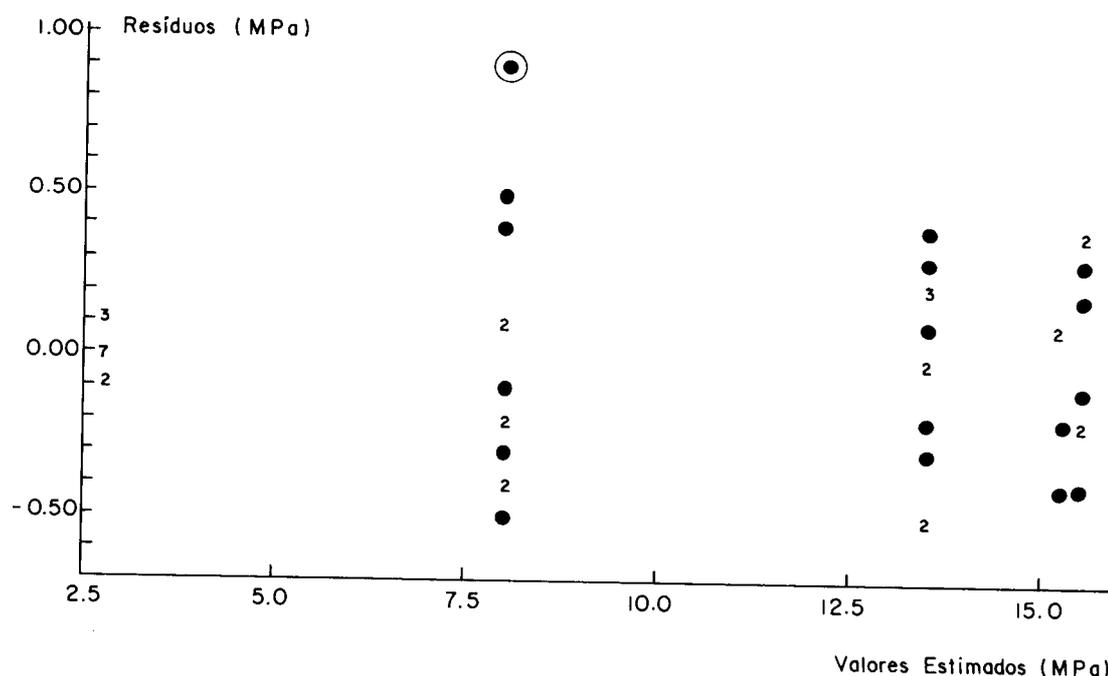


FIGURA 7.3 - Análise de resíduos - tensões

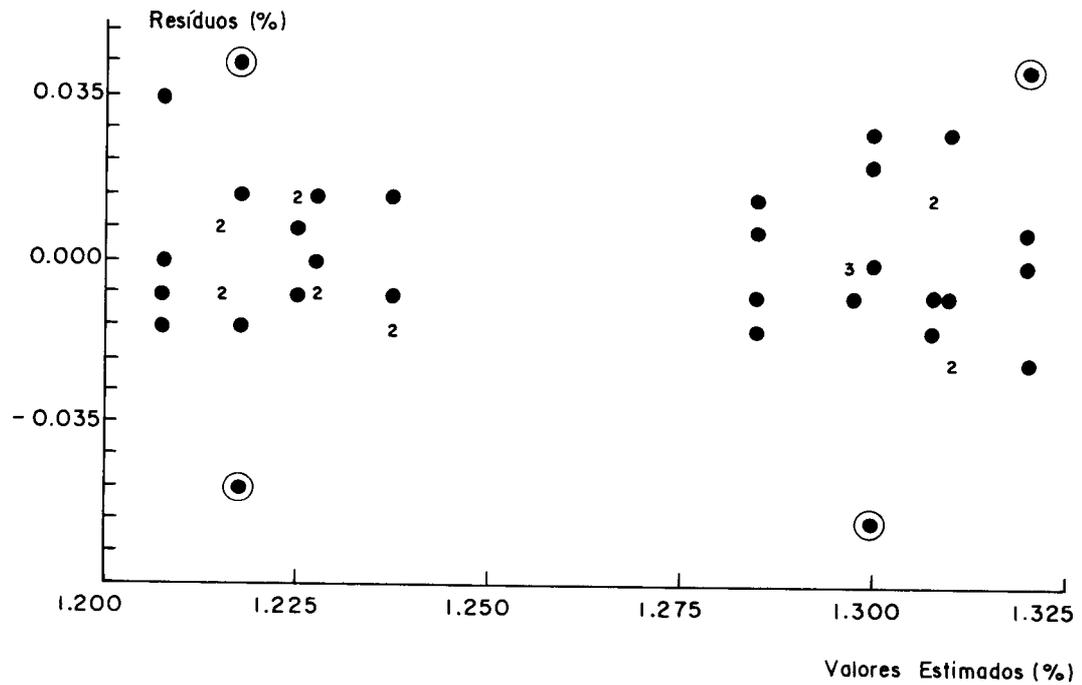


FIGURA 7.4 - Análise de resíduos - deformações

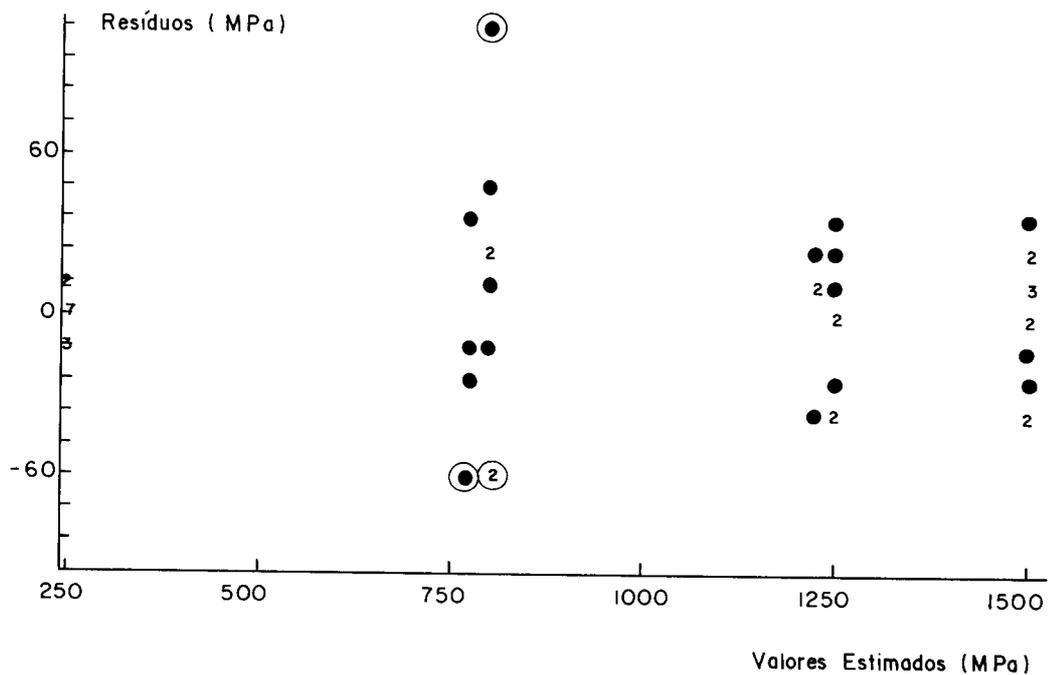


FIGURA 7.5 - Análise de resíduos - módulo de elasticidade

A análise indicou a presença de pontos com altos valores para os resíduos, que estão assinalados nas figuras 7.3 a 7.5. Os testes para verificação da normalidade na distribuição dos resíduos, feito pelo

comando nscore do programa MINITAB, não apresentaram bons resultados. Estes pontos com problemas foram extraídos, para se fazer nova análise com o modelo aditivo. Esta nova análise apresentou os gráficos de resíduos mostrados nas figuras 7.6 a 7.8.

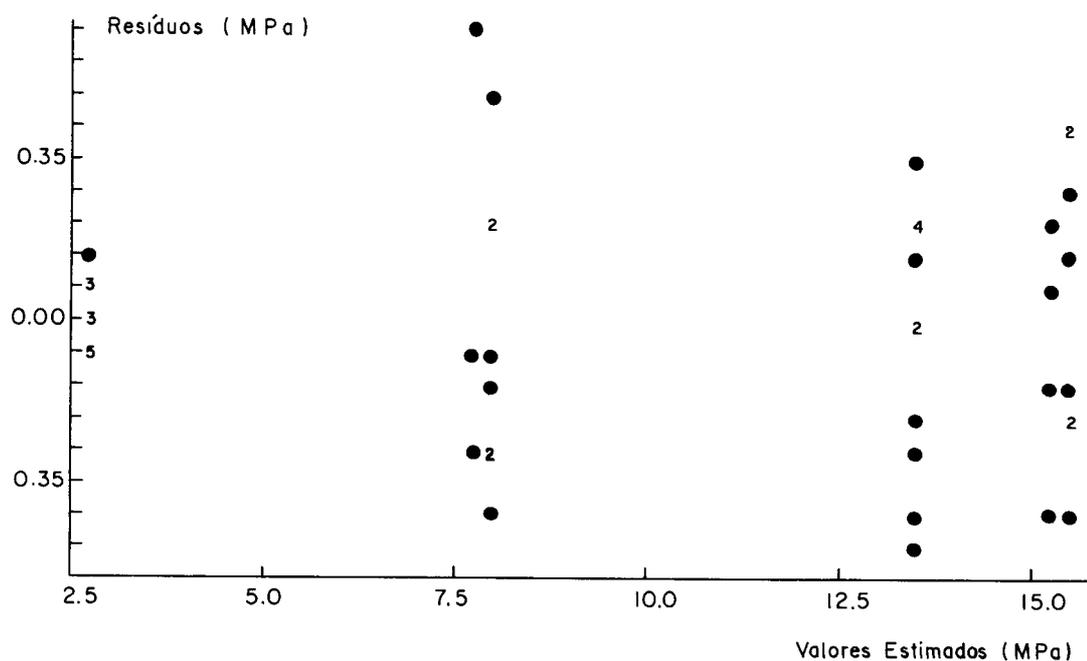


FIGURA 7.6 - Análise de resíduos - tensões

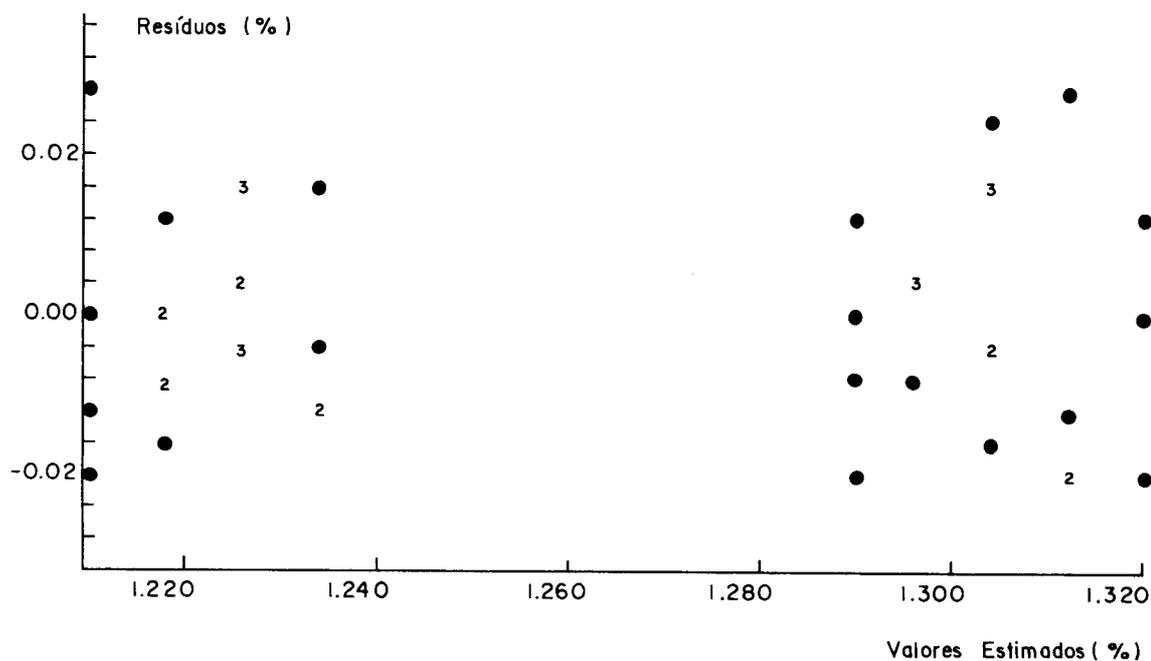


FIGURA 7.7 - Análise de resíduos - deformações

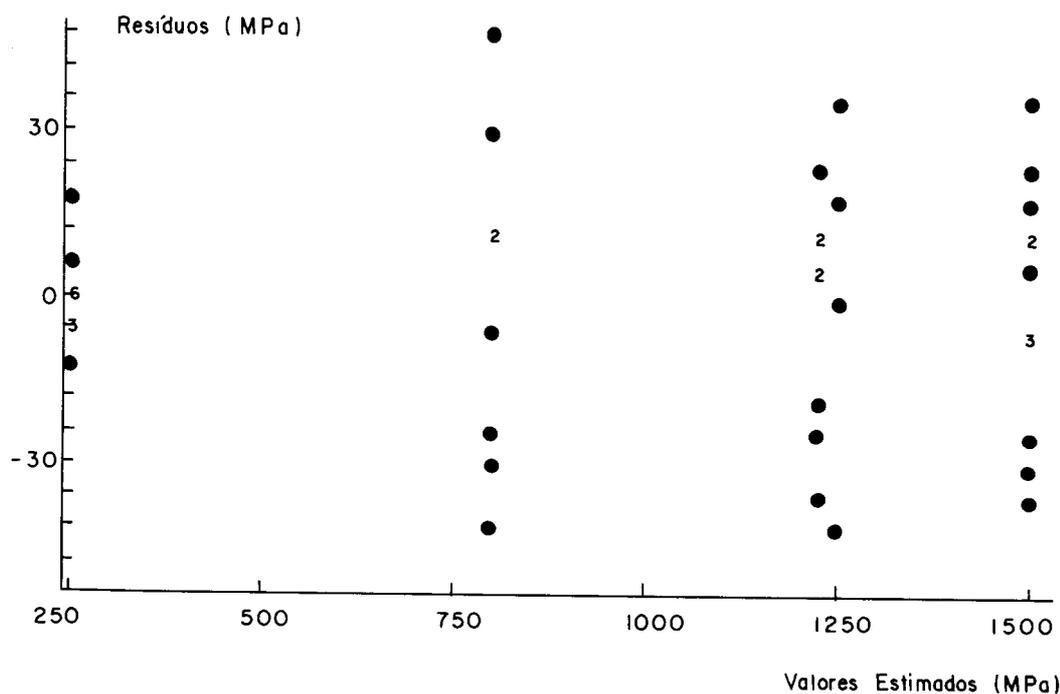


FIGURA 7.8 - Análise de resíduos - módulo de elasticidade

Observa-se uma melhor distribuição dos resíduos com menor amplitude dos seus valores, indicando a validade do modelo aditivo. O teste de normalidade dos resíduos também apresentaram bons resultados.

Desta forma foi efetuada a análise de variância dos resultados obtidos nos ensaios, retirados os pontos citados anteriormente. A tabela 7.3 fornece a análise de variância dos resultados obtidos nos ensaios.

O teste da hipótese de não haver diferença entre as três velocidades de carga utilizadas é efetuado por intermédio da relação entre os quadrados médios referentes às velocidades e aos resíduos, aplicando o teste "F" e obtendo-se a probabilidade de ocorrência daquela relação se as médias obtidas para cada velocidade fossem iguais. Os resultados dos testes são mostrados na tabela 7.4.

TABELA 7.3 - Análise de variância

parâmetro analisado	fonte de variação	graus de liberdade	soma de quadrados	quadrados médios
tensão	velocidade	2	0,02	0,01
	espécie	3	1170,74	390,25
	resíduos	41	2,97	0,07
deformação	velocidade	2	0,002437	0,001219
	espécie	3	0,073617	0,024539
	resíduos	38	0,008063	0,000212
módulo de elasticidade	velocidade	2	1107	554
	espécie	3	10663503	3554501
	resíduos	38	18840	496

TABELA 7.4 - Testes de hipóteses

parâmetro analisado	classificação	relação s_t^2/s_r^2	Teste F	probabilidade
tensão	velocidade	0,14	$F_{2, 41}$	$p > 25\%$
deformação	velocidade	5,75	$F_{2, 38}$	$0,5\% > p > 1\%$
mód. elast.	velocidade	1,12	$F_{2, 38}$	$p > 25\%$

Cumpramos observar que os testes de hipóteses efetuados sem a retirada dos pontos com resíduos elevados conduziram a resultados semelhantes para as probabilidades.

7.4 Comentários e conclusões

A observação dos resultados obtidos nos testes de hipóteses efetuados, mostrados na tabela 7.4, permite concluir que o fator velocidade de carga não teve influência significativa nos valores das tensões e dos módulos de elasticidade, parâmetros que caracterizam o material. Já os valores referentes às deformações foram influenciados pelo fator velocidade de carga a um nível de significância superior a 99%. Este nível de significância ocorreu devido ao fato de os resultados referentes às deformações apresentarem, de maneira geral, pequenas discrepâncias entre as réplicas.

Desta forma, a tolerância de erro admitida como sendo meio minuto no tempo de duração dos ensaios mostra-se conveniente, em termos de não introduzir erros significativos nos valores de resistência e de elasticidade obtidos por este método de ensaio.

A amplitude igual a um minuto no tempo de duração dos ensaios possibilita que os ensaios a serem executados com velocidade constante de aplicação de carga se enquadrem dentro da faixa de tolerância, sem complicações adicionais para o operador, em termos de estipular a velocidade de aplicação de carga. Será necessário, apenas, efetuar um ensaio preliminar para definir esta velocidade.

Observando-se os resultados obtidos para as deformações nota-se que foram os menos influenciados pelo fator espécie de madeira. Isto sugere estudos para confirmar esta tendência que, caso confirmada, possibilitaria uma variação no método do ensaio, tornado-o menos laborioso, a ser utilizado em situações que não exigissem tanta precisão nos resultados. Neste método, a resistência da madeira seria definida em termos de uma certa deformação específica do material.

No caso do ensaio ser efetuado com velocidade de deformação constante, sugere-se o valor igual a 0,01 mm/s para a mesma. Este valor de velocidade de deformação conduz a tempos de duração do ensaio em torno de 2 minutos. É equivalente ao do ensaio da ASTM (0,3 mm/minuto), em termos de velocidade de deformação específica do corpo-de-prova (0,6 %/minuto).

A resistência da madeira obtida em ensaio com velocidade constante de deformação apresenta alguma diferença em relação à obtida em ensaio efetuado com velocidade constante de carga, mesmo que o tempo de duração do ensaio seja o mesmo nos dois casos. Isto ocorre pelo fato da maior discrepância entre as velocidades nos dois casos ocorrer justamente nas imediações do ponto de definição da resistência, existindo tendência do ensaio realizado com velocidade constante de carga conduzir a valor superior para a mesma.

Este fato pode ser observado nos valores das tabelas 7.1 e 7.2 e nos diagramas da figura 7.1. Nota-se pequena discrepância entre os resultados obtidos em ensaios efetuados com velocidade constante de carga e velocidade constante de deformação.

A escolha entre velocidade constante de carga e velocidade constante de deformação, depende da filosofia da nova norma de ensaios para caracterização da madeira, em fase de elaboração. Parece ser mais conveniente a adoção de velocidade constante de deformação, devido ao fato de se poder fixar um certo valor para a mesma, independente da espécie de madeira a ser caracterizada, sendo retirada uma possível fonte de variação nos resultados dos ensaios. Entretanto, em virtude da não disponibilidade em todos os laboratórios do nosso país de equipamentos que possibilitem a realização de ensaios com controle na velocidade de deformação, a possibilidade de realização de ensaios com velocidade constante de aplicação de carga deve ser uma alternativa.

8 PROPOSTA DE MÉTODO PARA O ENSAIO DE COMPRESSÃO NORMAL ÀS FIBRAS DA MADEIRA

A seguir está apresentada a proposta de método para o ensaio de compressão normal às fibras.

8.1 Ensaio de compressão normal às fibras

Este ensaio tem por objetivo determinar a resistência ($f_{c,90}$) e o módulo de elasticidade ($E_{c,90}$) da madeira solicitada por compressão normal às fibras.

8.1.1 Equipamento

Máquina universal de ensaios. Se esta não possuir dispositivo para registro de deslocamentos utilizar dois relógios comparadores para medir deformações. A precisão mínima para medida das deformações é 0,01 mm.

Instrumento para medida das dimensões dos corpos-de-prova com precisão mínima igual a 0,01 mm.

8.1.2 Corpos-de-prova

As dimensões nominais dos corpos-de-prova são 50 mm na direção radial, 50 mm na direção longitudinal e 100 mm na direção tangencial, conforme figura 8.1. As dimensões reais devem ser determinadas quando da realização do ensaio.

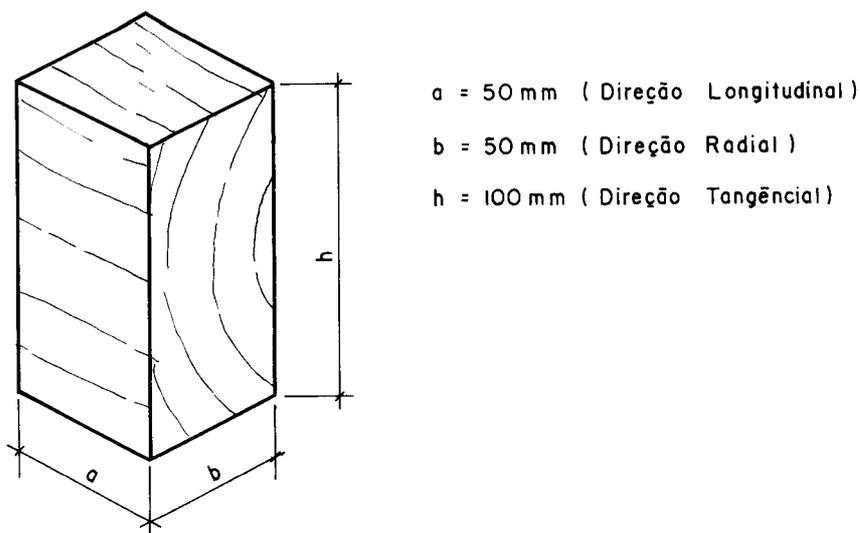


FIGURA 8.1 - Dimensões dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova devem ter a superfície da face de aplicação de carga (seção 50 x 50 mm) com bom acabamento. Após a preparação, os corpos-de-prova devem ser acondicionados de modo a não ocorrer perda de umidade. Sugere-se a realização do ensaio, quando possível, logo após a preparação dos corpos-de-prova.

8.1.3 Determinação da resistência convencional

($f_{c,90}$) e do módulo de elasticidade ($E_{c,90}$)

A resistência convencional e o módulo de elasticidade serão determinados por intermédio de um diagrama carga x deformação.

O módulo de elasticidade é definido no trecho reto do diagrama, através de regressão linear.

A resistência convencional corresponde ao ponto obtido da seguinte maneira: desloca-se o trecho reto do diagrama, paralelamente na direção horizontal, um valor correspondente a 0,2% de deformação do corpo-de-prova; o cruzamento desta reta com o diagrama define o ponto com o valor de carga correspondente à resistência.

8.1.4 Velocidade de ensaio

Os ensaios devem ser realizados, preferencialmente, com velocidade constante de deformação igual a 0,01 mm/s. Como alternativa, os ensaios podem ser realizados com velocidade constante de aplicação de carga. O valor desta velocidade deve ser estipulado de forma que a resistência convencional seja obtida em um tempo de ensaio igual a 2 minutos \pm 0,5 minuto.

8.1.5 Procedimentos do ensaio

Após a preparação dos corpos-de-prova, efetuar a medida de suas dimensões.

A carga será aplicada na direção tangencial aos anéis de crescimento. No caso da máquina universal de ensaios não possuir dispositivo para registro das deformações dos corpos-de-prova, estas serão medidas por intermédio de dois relógios comparadores posicionados conforme mostrado na figura 8.3. A deformação do corpo-de-prova será igual a média das leituras dos dois relógios.

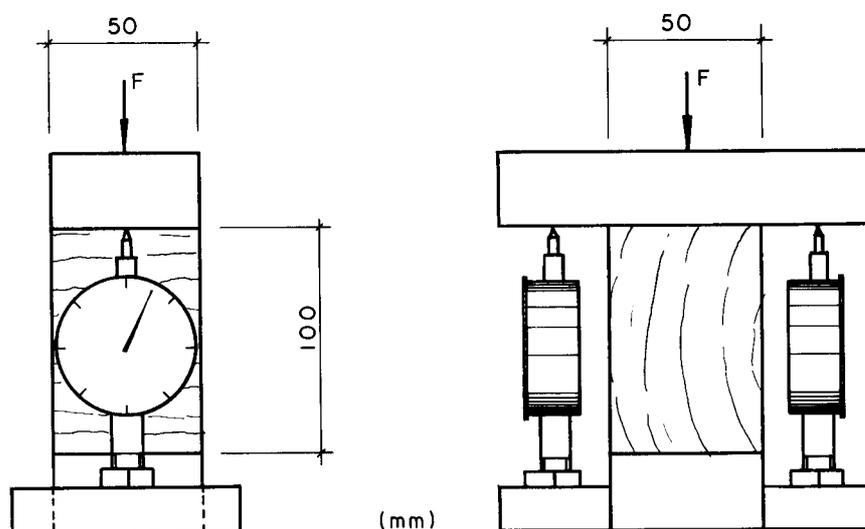


FIGURA 8.2 Ensaio de compressão normal

O ensaio deve ser realizado até um nível de carga que garanta que a resistência convencional da madeira já tenha sido excedida. Este nível pode ser definido quando for observado um apreciável aumento do acréscimo das deformações para incrementos constantes de carga.

No caso de utilização de relógios comparadores, devem ser feitas, pelo menos, medidas de deformações para dez níveis de carga, do início do ensaio até ser atingida a resistência.

Após o término do ensaio, determinar o teor de umidade da madeira.

8.1.6 Resultados do ensaio

Fazer o digrama carga x deformação, a partir dos resultados obtidos no ensaio.

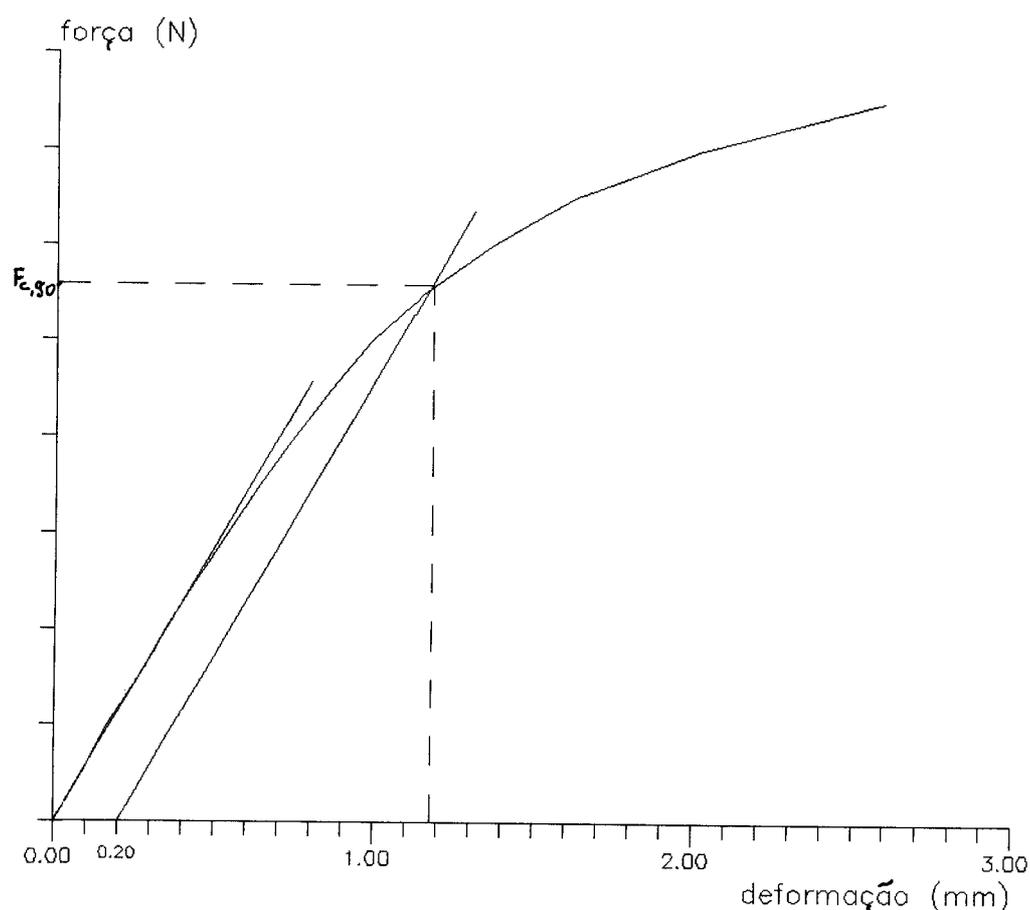


FIGURA 8.3 - Diagrama carga x deformação

Determinar o módulo de elasticidade ($E_{c,90}$), por intermédio do coeficiente angular (c) do trecho reto do diagrama, considerado situado entre os valores de tensões iguais a 0,1 e 0,5 de $f_{c,90}$. Este valor de $f_{c,90}$ deve ser estimado, inicialmente.

$$E_{c,90} \text{ (MPa)} = c \text{ (N/mm)} \frac{h \text{ (mm)}}{a \text{ (mm)} \times b \text{ (mm)}}$$

Determina-se a carga correspondente à resistência convencional da madeira deslocando-se paralelamente na horizontal o trecho reto do diagrama, um valor igual a 0,002 h; o cruzamento desta reta com o diagrama define o valor de carga igual a $F_{c,90}$. A resistência ($f_{c,90}$) será dada por:

$$f_{c,90} \text{ (MPa)} = \frac{F_{c,90} \text{ (N)}}{a \text{ (mm)} \times b \text{ (mm)}}$$

8.3 Comentários

Alguns pontos não foram definidos no método proposto, por se tratarem de aspectos de caráter geral, tais como a(s) condição(ões) de umidade dos corpos-de-prova na realização dos ensaios, o número de corpos-de-prova a serem ensaiados, determinação dos valores característicos.

Entende-se que estes pontos devem ter sua definição dentro do contexto da nova normalização dos ensaios para caracterização da madeira, a ser proposta brevemente.

9 ALGUMAS CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DO CRITÉRIO DE DIMENSIONAMENTO

Este capítulo aborda aspectos referentes à relação entre a resistência à compressão normal e a resistência à compressão paralela às fibras. Também é efetuada comparação entre os coeficientes de majoração da resistência à compressão normal às fibras, constantes em várias normas, que consideram a contribuição das áreas adjacentes à de aplicação da carga. Tem o objetivo de fornecer informações para o estabelecimento do critério de dimensionamento para a solicitação de compressão normal às fibras.

9.1 Relação entre a resistência à compressão paralela e a resistência à compressão normal

Na norma NBR-7190 (1982), a valor da tensão admissível para a solicitação de compressão normal às fibras é obtida em função da resistência da madeira na solicitação de compressão paralela, em virtude de não estar previsto ensaio para caracterização da madeira para o caso de compressão normal às fibras na NBR-6230 (1980).

Inicialmente, enquanto ainda não estiverem disponíveis dados referentes a resistência da madeira face a esta solicitação, em quantidade suficiente para permitir a sua utilização na nova norma, sugere-se a continuidade do procedimento citado no parágrafo

anterior.

Para balizar a determinação da resistência à compressão normal em função da resistência à compressão paralela às fibras, foi efetuada experimentação com o objetivo de obter a relação entre as resistências da madeira para estas solicitações.

9.1.1 Procedimentos adotados

Foram selecionadas quatro espécies de madeira de utilização estrutural, em função da sua disponibilidade. As espécies utilizadas, com os respectivos valores médios para os teores de umidade e pesos específicos para teor de umidade igual a 12%, foram:

- Bacuri (*Platonia insignis*): $U = 14,0\%$; $\rho_{12} = 8,8 \text{ kN/m}^3$
- Ipê (*Tabebuia spp*): $U = 10,6\%$; $\rho_{12} = 10,5 \text{ kN/m}^3$
- Angelim Vermelho (*Dinizia excelsa*): $U = 19,1\%$;
 $\rho_{12} = 9,3 \text{ kN/m}^3$
- Sucupira Vermelha (*Andira parviflora*): $U = 16,2\%$;
 $\rho_{12} = 7,6 \text{ kN/m}^3$

A resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c,0}$) foi determinada segundo método de ensaio da NBR-6230 (1982), utilizando corpos-de-prova com dimensões nominais iguais a 20 x 20 x 30 mm.

A resistência à compressão normal às fibras ($f_{c,90}$) foi determinada de acordo com o método de ensaio proposto no capítulo 8 deste trabalho.

Os corpos-de-prova para os ensaios de compressão paralela e normal às fibras, em cada espécie, foram obtidos da mesma peça de madeira. Os ensaios foram replicados quatro vezes.

9.1.2 Resultados obtidos

A tabela 9.1 apresenta os resultados obtidos nos ensaios.

TABELA 9.1 - Valores obtidos nos ensaios

Espécie	$f_{c,0}$ (MPa)	$f_{c,90}$ (MPa)
Bacuri	58,48	14,32
	60,70	14,19
	52,17	14,73
	61,43	14,36
Ipê	90,18	15,95
	95,81	16,56
	91,16	16,08
	93,28	16,59
Angelim Vermelho	63,48	7,62
	59,28	7,49
	58,21	7,64
	59,81	7,51
Sucupira Vermelha	50,93	7,68
	49,07	7,73
	50,71	7,68
	48,12	7,36

9.1.3 Análise dos resultados

A tabela 9.2 apresenta a média dos valores de $(f_{c,o})$ e $(f_{c,po})$ obtidos para cada espécie e a relação entre estes valores médios.

TABELA 9.2 - Valores médios e relação entre eles

Espécie	$f_{c,o,m}$ (Mpa) (I)	$f_{c,po,m}$ (MPa) (II)	(II)/(I)
Bacuri	58,20	14,40	0,25
Ipe	92,61	16,30	0,18
Angelim V.	60,20	7,57	0,13
Sucupira V.	49,71	7,61	0,15

9.2 Coeficiente de majoração

A resistência da madeira na solicitação de compressão normal às fibras, determinada em ensaios de compressão pura, isto é, utilizando corpos-de-prova com a seção transversal totalmente carregada, deve ser majorada em várias situações de dimensionamento, considerando-se a distribuição lateral da carga aplicada. Quase sempre, os casos práticos de dimensionamento envolvendo esta forma de solicitação não apresentam uma superfície de carregamento que ocupe a totalidade da peça de madeira, existindo contribuição das áreas adjacentes à de carregamento.

Assim, ao se dimensionarem peças de madeira submetidas à compressão normal às fibras, deve ser considerada esta contribuição, por intermédio de coeficiente de majoração da resistência da madeira.

Todas as normas consultadas, conforme apresentado no capítulo 2 deste trabalho, apresentam procedimento semelhante para este caso de dimensionamento. De maneira geral, permitem a majoração da resistência quando atendido os requisitos básicos da carga aplicada se estender em uma distância inferior a 150 mm, medida na direção das fibras, e da mesma se posicionar a uma distância mínima da extremidade da peça. Algumas normas também especificam o requisito da distância mínima entre o carregamento e outro, porventura existente.

Com o intuito de comparar os coeficientes de majoração da resistência, obtidos nas normas consultadas, analisou-se a situação de carregamento apresentada na figura 9.1.

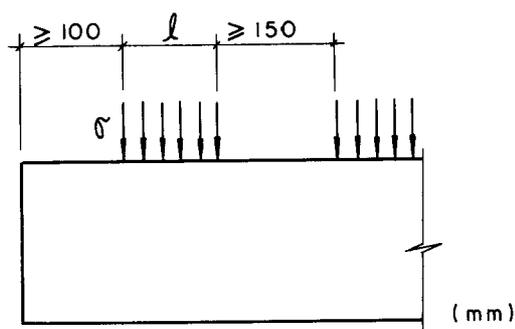


FIGURA 9.1 - Situação de carregamento para comparar os coeficientes de majoração

Este carregamento foi disposto, em relação às distâncias à extremidade da peça e a outro carregamento, de forma a se obter coeficientes de majoração máximos em todas as normas.

A figura 9.2 apresenta as curvas que relacionam os coeficientes de majoração com a extensão de aplicação da carga. As normas referidas nesta figura são:

- A - NBR-7190
- B - EUROCODE n^o 5
- C - BS-5268
- D - NDS e CSA-086
- E - Norma Australiana
- F - DIN-1052

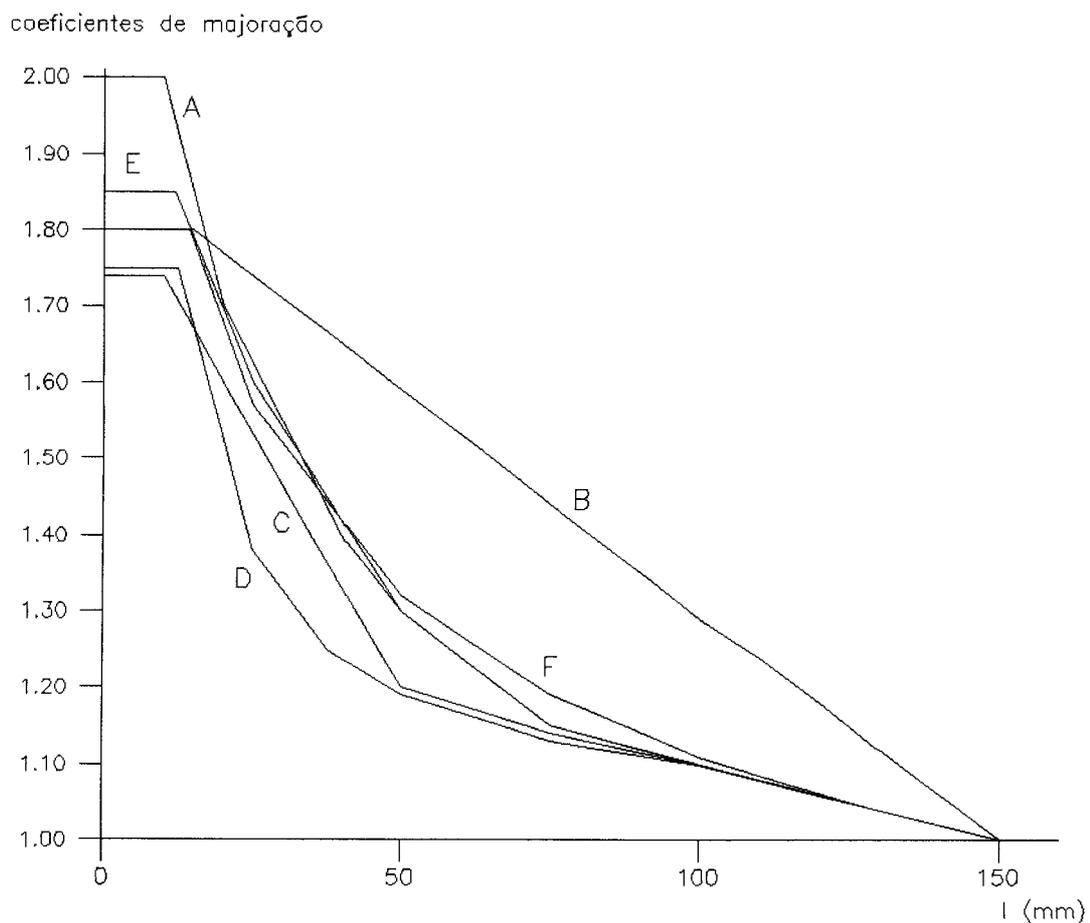


FIGURA 9.2 - Coeficientes de majoração da resistência em função da extensão de aplicação de carga

9.3 Comentários e sugestões

Observando-se os valores das relações entre as resistências à compressão normal e à compressão paralela às fibras obtidos para as quatro espécies ensaiadas, apresentados na tabela 9.2, nota-se uma grande variação entre os mesmos. Evidencia-se, mais uma vez, a necessidade de se ter maior quantidade de resultados de resistência à compressão normal no novo método de ensaio, para que se possa alcançar conclusões a este respeito. Sugere-se, também, avaliar se o peso específico da espécie de madeira seria um estimador mais conveniente para a resistência da madeira na solicitação de compressão normal às fibras.

Quanto ao coeficiente de majoração a ser empregado, sugere-se a adoção de critério semelhante ao do EUROCODE nº 5 (1991). Esta sugestão é baseada no fato deste critério possibilitar um melhor aproveitamento do material, fornecendo, de maneira geral, valores superiores para os coeficientes de majoração.

10 CONCLUSÃO

As diversas conclusões deste trabalho foram apresentadas no transcorrer de cada capítulo. A seguir são apresentadas as conclusões principais, que proporcionaram a elaboração da proposta de método do ensaio de compressão normal às fibras da madeira:

- os valores de tensões obtidos na ruptura do corpo-de-prova não fornecem resultados confiáveis para determinar a resistência da madeira a esta solicitação.
- a resistência da madeira, obtida no ensaio de compressão normal às fibras, deve ser convencionada como a tensão que provoca deformação específica residual igual a 0,2%.
- os corpos-de-prova empregados nos ensaios devem ter dimensões nominais iguais a 50 x 50 x 100 mm, nas direções longitudinal, radial e tangencial, respectivamente.
- o carregamento deve ser aplicado na direção tangencial aos anéis de crescimento da madeira.
- os ensaios devem ser conduzidos, preferencialmente, com velocidade constante de deformação igual a 0,01 mm/s; como alternativa, os ensaios podem ser realizados com velocidade constante de aplicação de carga, estipulada de

forma que a resistência convencional da madeira seja obtida em um tempo de ensaio igual a 2 minutos, sendo admitida tolerância de 0,5 minuto.

Além das conclusões que permitiram a elaboração da proposta de metodologia de ensaio, podem ser salientadas as seguintes:

- os ensaios realizados com a espécie Garapa, cujos resultados são apresentados no capítulo 5, indicam que a interação entre os fatores velocidade e direção de carregamento não apresenta influência significativa nos parâmetros analisados.

- para a mencionada espécie, os valores obtidos para as tensões que provocam deformação específica residual igual a 0,2%, para cargas aplicadas nas direção tangencial e oblíqua (45°) aos anéis de crescimento, não apresentaram grande diferença.

- os valores das relações entre as resistências à compressão normal e à compressão paralela às fibras, obtidas para as quatro espécies de madeira analisadas no capítulo 9, apresentaram grande variação.

11 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, P.A.O. (1990). *Estruturas de grande porte de madeira composta*. São Paulo. 280p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (1993). *Annual book of ASTM standard*. Philadelphia, ASTM. vol. 4.09: Wood.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1940). *Ensaio físicos e mecânicos de madeiras - MB - 26*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1951). *Cálculo e execução de estruturas de madeira - NB-11*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1980). *Ensaio físicos e mecânicos de madeiras - NBR-6230*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1982). *Cálculo e execução de estruturas de madeira - NBR-7190*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). *Ações e segurança nas estruturas - NBR-8681*. Rio de Janeiro.

- BENDTSEN, B.A.; GALLIGAN, W.L. (1979a) *Mean and tolerance limit stresses and stress modeling for compression perpendicular to grain in Hardwood and Softwood*. Washington, USDA Forest Service. 14p. (Forest Products Laboratory research paper, 337)
- BENDTSEN, B.A.; GALLIGAN, W.L. (1979b). Modeling the stress-compression relationship of Wood in compression perpendicular to grain. *Forest Products Journal*, v.29, n.2, p.42-48.
- BENDTSEN, B.A.; HASKELL, J.H.; GALLIGAN, W.L. (1978). Characterizing the stress-compression relationship of wood in compression perpendicular to grain. *Wood Science*, v.10, n.3.
- BODIG, J. (1965a). The effect of anatomy on the initial stress-strain relationship. *Forest Products Journal*, v.15, n.5, p.199-201.
- BODIG, J. (1965b). Effect of growth characteristics on the mechanical properties of Douglas-Fir in radial compression. *Holzforschung*, v.19, n.3, p.83-88.
- BODIG, J. (1966). Stress-strain relationship for wood in transverse compression. *Journal of Materials*, v.1, n.3, p.645-666.
- BODIG, J. (1969). Improved load-carrying capacity of wood in transverse compression. *Forest Products Journal*, v.19, n.12, p.39-44.
- BODIG, G.J.; JAYNE, B.A. (1982). *Mechanics of wood and wood composites*. New York, Van Nostrand Reinhold.
- BOLZA, E.; KLOOT, N.H. (1963) *The mechanical properties of 174 australian timbers*. Melbourne, CSIRO. 112p. (Division of Forest Products technological paper, 25)

- BORTOLETTO Jr., G. (1993). *Indicações para a utilização da madeira de seis espécies e variedades de pinus aplicada na construção civil*. São Carlos. 119p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- BOX, G.E.P.; HUNTER, W.G.; HUNTER, J.S. (1978). *Statistics for experimenters*. New York, John Wiley & Sons.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION (1991). *Structural use of timber - BS-5268*. London, BSI. part 2, Code of practice for permissible stress design, materials and workmanship.
- BROTERO, F.A. (1939). *Métodos de ensaios adotados no IPT para o Estudo das madeiras nacionais*. São Paulo, IPT. (Boletim n^o 24 do Instituto de Pesquisas Tecnológicas)
- CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION (1989). *Engineering design in wood (Limit States Design) - CSA-086*. Toronto, CSA.
- COMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES (1991). *Design of Timber Structures - Eurocode n^o5 (draft)*. London. part 1, General rules and rules for buildings.
- COMISSION PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS (1972). *Maderas Método de determinação de la compression perpendicular al grano*. Buenos Aires, COPANT.
- DEUTSCHE INSTITUT FÜR NORMUNG (1988). *Holzbauwerke - DIN-1052*. Berlin, DIN. teil 1, Berechnung und ausführung.
- FELDBORG, T. (1991). *Determination of some mechanical properties of timber in Structural Sizes*. In: INTERNATIONAL TIMBER ENGINEERING CONFERENCE, LONDON, 2-5 setembro, 1991. Anais... London, v.2, p.2189-2199.

- FERGUS, D.A.; SENFT, J.F.; SUDDARTH, S.K. (1981).
Recommended bearing stresses for design in light-frame construction. *Forest Products Journal*, v.31, n.4, p.50-57.
- FOREST PRODUCTS LABORATORY (1987). *Wood Handbook: Wood as an engineering material*. Agriculture Handbook 72. Washington, D.C., U.S. Department of Agriculture.
- FUSCO, P.B. (1993). Uma proposta de normalização das resistências da madeira estrutural. In: ENCONTRO REGIONAL EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 1., São Paulo, 4-5 novembro, 1993. Anais... São Paulo, EPUSP-IBRAMEM, p.213-233.
- FUSCO, P.B.; ALMEIDA, P.A.O. (1989). Fundamentos para o estabelecimento de um método de ensaio de compressão normal das madeiras. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 3., São Carlos, 26-28 julho, 1989. Anais... São Carlos, LaMEM-EESC-USP, v.4, p.19-26.
- GIORDANO, G. (1951). *Il legno e le sue caratteristiche*. Milano, Ulrico Hoepli.
- HELLMEISTER, J.C. (1973). *Sobre a determinação das características físicas da madeira*. São Carlos. 161p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- HELLMEISTER, J.C. (1983). Madeiras e suas características. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 1., São Carlos, 20-22 julho, 1983. Anais... São Carlos, SET-LaMEM-EESC-USP. v.1, p.1-37.

- HELLMEISTER, J.C. (1986). Metodologia do ensaio de peças de madeira à compressão normal às fibras. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2., São Carlos, 23-25 julho, 1986. *Anais...* São Carlos, SET-LaMEM-EESC-USP, v.2, p.75-90.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (1975). *ISO-3132 - Wood - Testing in compression perpendicular to grain*. Switzerland, ISO.
- JOHNSON, J.W. (1983). Compression perpendicular to grain in dry Douglas-Fir and Hem-Fir. *Forest Products Journal*, v.33, n.3, p.55-63.
- KARLSEN, G.G. (1967). *Wooden structures*. Moscou, Mir.
- KENNEDY, R.W. (1968). Wood in transverse compression. *Forest Products Journal*, v.18, n.3, p.36-40.
- KOLLMANN, F.; CÔTÊ Jr, W.A. (1968). *Principles of wood sciences and technology*. Berlim, Springer-Verlag.
- KUNESH, R.H. (1968). Strength and elastic properties of wood in transverse compression. *Forest Products Journal*, v.18, n.1, p.65-72.
- LAHR, F.A.R. (1990). *Considerações a respeito da variabilidade de propriedades de resistência e de elasticidade da madeira*. São Carlos. 161p. Tese (Livre Docência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- LABORATÓRIO DE MADEIRAS E DE ESTRUTURAS DE MADEIRA (1987). *Madeira - Determinação de suas características*. São Carlos, LaMEM.

- MADSEN, B. (1989). Proposal for including an updated design method for bearing stress in CIB W18 - Structural Timber Design. INTERNATIONAL COUNCIL FOR BUILDING RESEARCH STUDIES AND DOCUMENTATION. East Berlin. 4p. (Working Commission W18 - Timber Structures)
- MADSEN, B.; HOOLEY, R.F.; HALL, C.P. (1982). A design method for bearing stresses in Wood. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v.9, n.2, p.338-349.
- MASCIA, N.T. (1991). *Considerações a respeito da anisotropia da madeira*. São Carlos. 293p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- NATIONAL FOREST PRODUCTS ASSOCIATION (1991). *National design specification for wood construction - NDS*. Washington, DC. NFOPA.
- NOGUEIRA, M.C.J.A. (1991). *Indicações para o emprego de dezesseis espécies de eucalipto na construção civil*. São Carlos. 116p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- RYAN JR., T.A.; JOINER, B.L.; RYAN, B.F. (1976). *Minitab student handbook*. Massachusetts, Duxbury.
- SNEDECOR, G.W.; COCHRAN, W.G. (1977). *Metodos estadísticos*. México, Continental.
- STANDARDS ASSOCIATION OF AUSTRALIA (s.d.). *Timber Structures (draft)*. s.l., SAA.
- TAYLOR, G. et al. (1978). *La madera*. Barcelona, Blume.
- WOLCOTT, M.P.; KASAL, B.; KAMKE, F.A.; DILLARD, D. (1989). Testing small wood specimen in transverse compression. *Wood and Fiber Science*, v.21, n.3, p.320-329.