

CLEUBER DELANO JOSÉ LISBÔA

ESTUDO DAS TENSÕES DE CRESCIMENTO EM
TORAS DE *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de "Doutor em Ciências Florestais".

Orientador: Prof. Ivan Tomaselli

CURITIBA
1993

CLEUBER DELANO JOSÉ LISBÔA

**ESTUDO DAS TENSÕES DE CRESCIMENTO EM TORAS DE
Eucalyptus grandis Hill. ex Maiden**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de "Doutor em Ciências Florestais".

Orientador: Prof. Ivan Tomaselli

**Curitiba
1993**

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

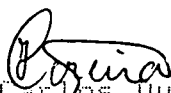
P A R E C E R

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal para realizar a arguição da Tese de Doutorado apresentada pelo candidato CLEUBER DELANO JOSÉ LISBOA, sob o título "ESTUDO DAS TENSÕES DE CRESCIMENTO EM TORAS DE *Eucalyptus grandis* Hill ex- maiden.", para obtenção do grau de Doutor em Ciências Florestais - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná. Área de concentração em **TECNOLOGIA E UTILIZAÇÃO DE PRODUTOS FLORESTAIS**, após haver analisado o referido trabalho e arguido o candidato, são de parecer pela "APROVAÇÃO" da Tese, com nota final: 8,31

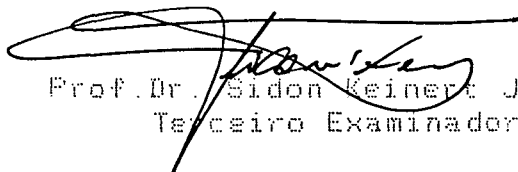
Curitiba, 10 de setembro de 1993



Pesq. Dr. Varlone Alves Martins
Primeiro Examinador



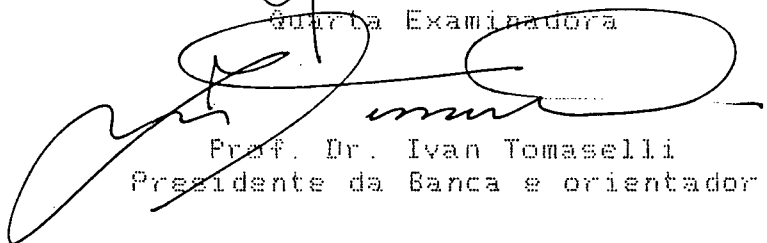
Pesq. Dr. José Carlos Duarte Pereira
Segundo Examinador



Prof. Dr. Sidon Keinert Junior
Terceiro Examinador



Dra. Graciela Inez Balzan de Muniz
Quarta Examinadora



Prof. Dr. Ivan Tomaselli
Presidente da Banca e orientador

Aos meus pais

Rubens e Elza Helena,

com meu franco reconhecimento,

eu ofereço.

À minha esposa

Edinês.

Aos meus filhos

Cleids, Alessandra e

Cleuber Filho,

eu dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos são devidos:

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo apoio financeiro recebido através da concessão de bolsa de estudo durante todo o período de realização desta tese.

À Divisão de Madeira do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. - IPT, na pessoa da pesquisadora Verônica Angyalossy Alfonso, pela identificação da espécie de madeira utilizada.

Ao Instituto Florestal do Paraná - IFP, pela administração dos recursos financeiros aprovados através do Processo nº 5559/87 do extinto Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal - IBDF, possibilitando a execução prática de experimentos envolvidos, especialmente nas pessoas de seus Presidente e Superintendente à época:

- Dr. Sylvio Péllico Netto - Presidente; e
- Sr. Luiz Carlos Herde - Superintendente.

À WEG Motores S.A., pela doação de toda a madeira utilizada, por todo o apoio logístico necessário à condução da parte experimental envolvida, como pela colaboração incondicional de seus dirigentes e funcionários:

- Sr. Euclides Emmendoerfer - Diretor;
- Sr. Waldir Paulo Satler - Gerente do Departamento de Embalagens;
- Sr. Raul Friechl - Chefe de Serraria;
- Sr. Antônio Pedro Lourenço - Chefe de Transporte;
- Sr. Walmor Vicente Meuri - Chefe de Embalagens;
- Sr. Lúcio João Marcon - Chefe de Metrologia;
- Sr. Enio Guesser - Chefe de Marcenaria;

- Srta. Anair da Silva - Secretária;
- Sr. Afonso Nichetti Filho - Escriturário;
- Sr. Sovenir Tomasi - Metrologista;
- Sr. Edmundo Spliter Neto - Metrologista;
- Sr. Mauro Bonatti - Metrologista;
- Sr. Alitor Setter - Laminador;
- Sr. Joaquim Valério Oss Emer - Serrador;
- Sr. Antenor José Simplício - Serrador;
- Sr. Nelson Ziemann - Motorista; e
- Demais dirigentes e funcionários.

À Universidade Federal do Paraná, através do Departamento de Engenharia Mecânica e do curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias, pelas facilidades oferecidas e, em especial, às pessoas do:

- Professor Ivan Tomaselli - Orientador;
- Professor Amauri Simioni - Co-orientador;
- Corpo docente, bibliotecárias e demais funcionários.

Ao extinto Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal - IBDF e ao hoje Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA, em particular ao seu Laboratório de Produtos Florestais - LPF, pela oportunidade de realização do curso e pelo imprescindível apoio aos trabalhos finais de elaboração desta tese:

Liberação do apoio logístico no LPF:

- Sra. Vera Terezinha Rauber Coradin - Chefe

Opiniões e sugestões técnicas:

- Dr. Varlone Alves Martins - Engenheiro Florestal;
- Sr. Júlio Eustáquio de Melo - Engenheiro Civil; e
- Sr. José Arlete Alves Camargos - Administrador/Tecnólogo

Processamento e análise de dados:

- Sr. Júlio César Mendes - Estatístico

Digitação:

- Sr. Jonas Moraes Corrêa - Programador

Ilustrações:

- Srta. Ana Maria Prudente de Fontes - Arquiteta

Aquisição complementar bibliográfica:

- Sra. Rosa Nhuch Boianovsky - Bibliotecária

Serviços administrativos e de secretaria:

- Sr. Hugulino de Almeida Dias;
- Sr. Ednilson de Almeida;
- Sra. Maria Helena M. G. de Figueiredo; e
- Sra. Rose Mary Cerutti Trindade.

Revisão ortográfica, técnica e de formatação:

- Sra. Rita de Cássia Ibarra Pelanda - Geógrafa; e
- Sra. Márcia Helena Bezerra Marques - Engenheira Florestal.

À Sra. Deise Maria da Silva Ibarra pela co-participação na revisão ortográfica.

Ao Sr. Luiz Henrique de Araujo e à Srta. Militze Bortoloto Cajazeira pelos trabalhos de digitação e editoração.

À Sra. Cleusa Terezinha Lisboa pelo trabalho de copidesque-Jornalista.

Pela amizade e reconhecimento de sua capacidade técnica e profissional, releva-se o apoio e incentivo recebidos do Professor/Orientador Dr. Ivan Tomaselli.

Agradecimentos especiais são devidos à Rita de Cássia Ibarra Pelanda, Márcia Helena Bezerra Marques, Ana Maria Prudente de Fontes, Júlio César Mendes e Fernando Mafra Pelandra, pela sincera amizade demonstrada, pelo incentivo e empenho, sem os quais não seria possível concluir os trabalhos dentro do prazo disponível.

Muitas outras pessoas colaboraram, direta ou indiretamente, em diferentes fases de execução desta tese e suas participações são reconhecidas, embora seus nomes não tenham sido mencionados.

Mais uma vez, durante sua vida particular e profissional, o autor sente-se reconhecido pelo inestimável apoio recebido de sua esposa Edinês Gonçalves Lisbôa e de seus filhos Cleids Maria Lisbôa, Alessandra Maria Lisbôa e Cleuber Delano José Lisbôa Filho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	<i>xi</i>
LISTA DE TABELAS	<i>xix</i>
RESUMO	<i>xxi</i>
SUMMARY	<i>xxii</i>
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	7
2.1. Origem das tensões de crescimento	7
2.2. Medição das tensões de crescimento	19
2.2.1 Deformações de crescimento longitudinais	22
2.2.1.1 Deformações periféricas no tronco de uma árvore	22
2.2.1.2 Deformações interiores ao tronco de uma árvore	29
2.2.1.2.1 Método da prancha diametral	30
2.2.1.2.2 Métodos de perfurações de orifícios	36
2.2.1.2.3 Métodos de remoções de finas camadas	40
2.2.1.2.4 Extensão do método da prancha diametral ou de JACOBS	42
2.2.1.2.5 Máquina de teste apresentada por CHARDIN & SALES	48
2.2.2 Deformações de crescimento transversais	51
2.2.2.1 Deformações tangenciais compressivas	51
2.2.2.2 Deformações de trações radiais	55
2.2.3 Medidas indiretas de deformações de crescimento	58

2.3	Distribuição das tensões de crescimento no interior do tronco de uma árvore	64
2.3.1	Deformações de crescimento longitudinais.	65
2.3.1.1	Deformações de crescimento longitudinais parciais ocorrentes no desdobro de toras em pranchas	75
2.3.1.2	Variação das deformações de crescimento longitudinais ao longo do comprimento de um sarrafo	76
2.3.2.	Deformações de crescimento transversais	77
2.3.2.1.	Obtenção de discos de madeira sem a formação de rachas.	82
2.4	Magnitude e variabilidade das deformações específicas de crescimento	85
2.4.1	Deformações longitudinais periféricas.	90
2.4.2	Deformações longitudinais interiores ao tronco de uma árvore	94
2.4.3	Deformações transversais.	98
3.	MATERIAL E MÉTODOS	102
3.1	Madeira e sua amostragem	102
3.2	Preparação do material de teste	112
3.2.1	Amostras para determinação das propriedades mecânicas e das observações anatômicas macroscópicas	112
3.2.2	Amostras para determinação das deformações de crescimento longitudinais	114
3.2.3	Amostras para determinação das deformações de crescimento transversais.	125
3.2.4	Amostras para determinação das propriedades físicas.	126
3.3	Procedimento experimental	127
3.3.1	Determinação das propriedades físicas, mecânicas e observações anatômicas macroscópicas	127
3.3.2	Determinação das deformações de crescimento longitudinais	129

3.3.2.1	Aparelho de medição	129
3.3.2.2	Medições das deformações de crescimento.	133
3.3.3	Determinação das deformações de crescimento transversais.	143
3.3.3.1	Deformações tangenciais	143
3.3.3.2	Deformações radiais	145
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	149
4.1	Caracterização da madeira	149
4.1.1	Identificação da espécie	149
4.1.2	Caracteres gerais das árvores e da madeira	149
4.1.3	Propriedades físicas.	151
4.1.3.1	Teor de umidade	151
4.1.3.2	Densidade.	153
4.1.4	Propriedades mecânicas.	157
4.2	Deformações de crescimento longitudinais.	160
4.2.1	Abate da árvore	160
4.2.2	Desdobro	162
4.2.3	Adequabilidade da amostra.	166
4.2.4	Medição das deformações	171
4.2.4.1	Variação de temperatura e umidade relativa do ar	171
4.2.4.2	Intervalo de tempo de medição	173
4.2.4.3	Reprodutibilidade de medições	175
4.2.5	Magnitude e distribuição	179
4.2.5.1	Deformações de crescimento ocorrentes no desdobro de toras em sarrafos	179
4.2.5.2	Deformações de crescimento ocorrentes no desdobro de toras em pranchas e de pranchas em sarrafos	198
4.3	Deformações de crescimento transversais	203

4.3.1	Deformações tangenciais	203
4.3.2	Deformações radiais	205
4.4	Tensões de crescimento	207
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	209
	ANEXOS	225
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	260

LISTA DE FIGURAS

1.	Rachas de topo em toras de <i>Eucalyptus</i> spp. armazenadas no pátio de toras de WEG MOTORES S.A., em Jaraguá de Sul - SC	2
2.	Diminuição do comprimento da costaneira recém-cortada de uma tora de Tatajuba - <i>Bagassa guianensis</i> (PONCE, 1987)	3
3.	Vista microscópica de uma fibra ilustrando a orientação de microfibrilas nas várias camadas da parede celular (WILKINS, 1986a).	14
4.	Seção transversal do tronco de uma árvore ilustrando tensões de crescimento transversais: as setas indicam a direção de atuação da tensão de compressão tangencial periférica e da tensão de tração radial central (WILKINS, 1986a).	17
5.	Método de NICHOLSON (1971a) para determinação das deformações de crescimento longitudinais periféricas. a. Distância entre pontos de medição fixados no tronco. b. Determinação da posição do ponto central utilizado posteriormente para correção de curvaturas e alinhamentos (ATHERTON, 1978 e apresentada por ARCHER, 1986a).	23
6.	Método de NICHOLSON (1971a) para determinação das deformações de crescimento longitudinais periféricas. a. Amostra de madeira removida do tronco. b. Restabelecimento da posição original da peça de madeira através do ponto central (Figura 5b) e determinação do seu comprimento (ATHERTON, 1978 e apresentada por ARCHER, 1986a).	24
7.	a. Extensômetro para determinação de deformações de crescimento longitudinais periféricas. b. Seqüência de perfurações e cortes para liberar as tensões (SAURAT & GUÉNEAU, 1976).	27

8.	Método de determinação das deformações de crescimento periféricas nas direções longitudinal e tangencial, através da perfuração de apenas um orifício (ARCHER 1986a)	28
9.	Extensômetro para medição de deformações de crescimento periféricas nas direções longitudinal e tangencial, comercializado pelo “Centre Technique Forestier Tropical”, França (catálogo promocional).	29
10.	Prancha diametral utilizada na determinação de deformações de crescimento longitudinais, conforme método de JACOBS(1938) (CLARKE, 1939 e KUBLER, 1987).	31
11.	Método de JACOBS (1938) para determinação de deformações de crescimento longitudinais em uma prancha diametral. a. Pontos de medição fixados na prancha. b. Curvatura dos sarrafos após o corte, devido a gradientes de tensões existentes. c. Sarrafos alinhados para medição. d. Medição da flecha central (JACOBS, 1945).	33
12.	Alterações de dimensões e forma no topo de uma tora, devido ao corte transversal - magnificada de 400 vezes (WILHELMY & KUBLER, 1973a).	34
13.	Método de KIKATA (1972) para determinação de deformações de crescimento longitudinais em árvores em pé (KUBLER, 1987).	36
14.	Método de BOYD (1950a) para determinação de deformações de crescimento longitudinais, através de abertura perfurada no tronco de uma árvore. a. Corte longitudinal ilustrando o sistema de medição. b. Corte transversal mostrando os pinos de medição e um espelho de auxílio às leituras.	37
15.	Método de WILHELMY & KUBLER (1973b) para determinação de deformações de crescimento longitudinais e tangenciais, denominado “sonda para medição de deformações no interior de corpos sólidos”. a. Sonda e amplificador. b. Seção transversal do extensômetro de acoplamento à sonda.	39

16.	Topo de uma tora ilustrando o esquema de distribuição de seções transversais de sarrafos, com correspondentes pinos de medição e local de desdobro, para determinação de deformações de crescimento longitudinais (ATHERTON, 1978).....	44
17.	Método de POST (1979a) para determinação de deformações de crescimento longitudinais. a. Micrômetro para medição de comprimentos dos sarrafos dentro de uma tora, de uma prancha ou isoladamente. b. Gabarito utilizado como comprimento referencial de medição, para aferição de medidas e para manter o sarrafo alinhado quando de sua medição isolada.	46
18.	Diagrama de corte ilustrando a localização de seções transversais de sarrafos no topo de toras para determinação de deformações de crescimento longitudinais. a. Primeiro diagrama utilizado. b. Diagrama atual (CHARDIN & SALES, 1984).....	49
19.	Método apresentado por CHARDIN & SALES (1983a e b) para determinação de deformações de crescimento longitudinais. a. Deformação de crescimento sendo determinada no primeiro sarrafo em processo de corte. b. Tora posicionada verticalmente na máquina de teste para corte e medição. c. Serras circulares que se movimentam verticalmente ao longo do eixo longitudinal da tora (CHARDIN & SALES, 1984).	50
20.	Método de JACOBS (1945) para determinação de deformações tangenciais compressivas em discos de madeira. a. Efeito do corte de um anel ou de uma porção externa. b. Efeito do corte radial da largura de um anel. c. Micrômetro de medição.	52
21.	Método de BOYD (1950a) para determinação de deformações de crescimento tangenciais compressivas em discos de madeira (medição de diâmetros).....	54
22.	Método de BOYD (1950a) para determinação de deformações de crescimento de trações radiais. a. Figura em forma de “V” (CUNHA),	

traçada em uma das faces do disco, mostrando os pontos de medição e locais de corte. b. Cunha cortada do disco e utilizada para medição das deformações. c. Cunha subdividida para comprovação de completa liberação de tensões..	57
23. Sistema de escore de pontos proposto por CONRADIE (1980) para avaliação de rachas de topo e suas correlações com as tensões de crescimento (MALAN, 1984).	59
24. Método de KRILOV & ADES (1985) para determinação de deformações de crescimento longitudinais (WILKINS & ALEXIOU, 1991).	62
25. Deformação longitudinal compressiva (ϵ_l), em função do diâmetro da árvore ou de qualquer ponto diametral (r) de interesse (JACOBS, 1945)..	66
26. Distribuição teórica da tensão de crescimento residual longitudinal (σ_l) ao longo do diâmetro de uma árvore de <i>Eucalyptus regnans</i> , de acordo com modelo matemático proposto por BOYD (1950a) e apresentado por BOYD (1950b)..	69
27. Distribuição teórica da deformação de crescimento residual longitudinal (ϵ_l), ao longo do diâmetro do tronco de uma árvore, de acordo com modelo matemático proposto por KUBLER (1959b). a. Tronco de menor diâmetro. b. Tronco de maior diâmetro (adaptada de KUBLER, 1987).	71
28. Distribuição de deformações de crescimento residuais longitudinais em diferentes posições radiais de uma prancha diametral, provocada pelo desdobro de uma tora de <i>Fraxinus americana</i> (POST, 1979a e apresentada por ARCHER, 1986a).	75
29. Variação da distribuição de deformações de crescimento residuais específicas ao longo do comprimento de sarrafos cortados na periferia de toras de <i>Fagus sylvatica</i> . I, II e III indicam números de toras sucessivas obtidas ao longo de um mesmo tronco (ARCHER, 1986a)..	76
30. Distribuições teóricas das deformações e tensões de crescimento residuais	

na seção transversal do tronco de uma árvore. a. Deformação radial (ϵ_r : - - -) e tangencial (ϵ_t : —) em troncos de menor e maior diâmetro, respectivamente (KUBLER, 1959a e apresentada por KUBLER, 1987). b. Tensões equivalentes: σ_t e σ_r (apresentada por TANTICHAIBORIBOON & COOK, 1977a).....	80
31. Efeito da transformação de tensões de crescimento longitudinais em transversais com conseqüente ocorrência de rachas radiais e empenamentos em uma peça de madeira em forma de cunha (WILHELMY & KUBLER, 1973a).	81
32. Distribuição de tensões e deformações tangenciais ao longo de seções longitudinais de troncos de diversos comprimentos em função do alívio das tensões de crescimento longitudinais pelo corte transversal. a. Tora com comprimento igual a 4 diâmetros. b, c, d, e, f. Seções de tora com comprimentos variados em função do diâmetro (KUBLER & CHEN, 1974).	83
33. Padrão das deformações de crescimento longitudinais específicas na superfície transversal de troncos de <i>Eucalyptus regnans</i> com 30 anos de idade. A cada anel da figura corresponde uma deformação de $200\mu\epsilon$, sendo indicado o valor médio obtido (NICHOLSON, 1971a e apresentada por KUBLER, 1987).	87
34. Distribuição de tensões de crescimento longitudinais (—●—), tangenciais (—○—) e radiais (—△—) no tronco de <i>Eucalyptus</i> sp. (OKUYAMA & KIKATA, 1975c).	100
35. Localização da área de coleta das árvores de <i>Eucalyptus grandis</i> Hill. ex Maiden - Talhão nº 6 - Projeto Porto Itaperiú-Barra Velha - SC.	103
36. Seção transversal do corte de derruba de uma árvore através do sistema convencional de chanframento e corte transversal.	105
37. Seção transversal do corte de derruba de uma árvore utilizando o sistema de anelamento.	106

38.	Seção transversal do corte de uma árvore utilizando-se o procedimento especial de traspassamento do tronco no dia anterior à derruba.	107
39.	Rachas radiais ocorrentes quando da obtenção das toras de teste na floresta.	110
40.	Aspecto das seções longitudinais das toras de teste e da bordadura da floresta de onde foram obtidas.	111
41.	Rachas no topo maior (1.1.1) e no menor (1.1.2) da tora de base da árvore nº 1 utilizada para determinação das deformações de crescimento longitudinais.	115
42.	Posição de medição de diâmetros e raios de cada topo das toras utilizadas para a determinação das deformações de crescimento longitudinais, conforme consta na tabela 8. a. Topo menor. b. Topo maior.	116
43.	Topo menor de uma tora ilustrando a posição dos pontos de medição das deformações de crescimento longitudinais e as linhas de serragem de sarrafos de 20,0 x 20,0mm de seção transversal.	119
44.	Topo menor da tora de base obtida da árvore nº 3 ilustrando o esquema de distribuição das seções transversais dos sarrafos e os pontos de medições das deformações de crescimento longitudinais com seus correspondentes números de identificação.	120
45.	Sistema utilizado para o desdobro da tora em pranchas, onde esta é esquadrejada em duas faces (a e b) e o bloco restante desdobrado em cortes paralelos (c)..	121
46.	Desdobro de uma tora utilizada no experimento, seguindo o sistema de esquadrejamento em duas faces (a e b) e o desdobro direto do restante da tora (c).	124
47.	Aparelho de medição do comprimento de peças de madeira ou aparelho de medição de deformações de crescimento longitudinais.	131
48.	Peça de fixação de relógios comparadores no aparelho de medição de deformações de crescimento longitudinais.	132

49.	Coluna de aferição com diâmetro de 100,70mm e altura de 303,54mm. . .	133
50.	Medição do comprimento de um sarrafo utilizando o aparelho fabricado. .	135
51.	Detalhe da determinação do comprimento de um sarrafo, ilustrando a colocação do relógio comparador em um dos extremos do aparelho de medição.	137
52.	Medição do comprimento de um sarrafo dentro de uma tora (S _i) utilizando o aparelho fabricado.	138
53.	Detalhe do posicionamento do relógio comparador quando da medição do comprimento de um sarrafo dentro da tora.	140
54.	Detalhe da medição da altura correspondente à leitura em um relógio comparador (Figura 53) em uma das hastes verticais do aparelho fabricado.	141
55.	Marcação de um disco de madeira para determinação das deformações de crescimento tangenciais.	144
56.	Corte do anel externo de um disco de madeira para liberação de tensões e medição das deformações de crescimento tangenciais.	145
57.	Determinação das deformações de crescimento radiais. a. Marcação de um disco. b. Corte de uma Figura em forma de “V”, no disco de madeira, para liberação de tensões.	147
58.	Subdivisão de uma figura em forma de “V” (Figura 57) em seções menores para comprovação da total liberação de tensões, na determinação das deformações de crescimento radiais.	148
59.	Técnicas de abate de árvores (MATTHECK & WALTHER, 1991).	161
60.	Redistribuições de tensões no abate de árvores (MATTHECK & WALTHER, 1991).	162
61.	Magnitudes das deformações de crescimento residuais longitudinais ($1\mu\epsilon =$ 10^{-6} mm/mm) decorrentes da liberação de tensões no desdobro de toras de <i>Eucalyptus grandis</i> Hill. ex Maiden em sarrafos. a. Tora nº 1. b. Tora nº 2. c. Tora nº 3. d. Tora nº 4. e. Tora nº 5.	181

62.	Distribuição diamétrica das deformações de crescimento residuais longitudinais ($1\mu\varepsilon = 10^{-6}$ mm/mm) decorrentes da liberação de tensões no desdobro de toras de <i>Eucalyptus grandis</i> Hill. ex Maiden em sarrafos. a. Tora nº 1. b. Tora nº 2. c. Tora nº 3. d. Tora nº 4. e. Tora nº 5.	185
63.	Distribuição radial das deformações de crescimento residuais longitudinais ($1\mu\varepsilon = 10^{-6}$ mm/mm) decorrentes da liberação de tensões no desdobro de toras de <i>Eucalyptus grandis</i> Hill. ex Maiden, em sarrafos (linhas contínuas); em comparação com o modelo teórico (linha tracejada), proposto por KUBLER (1959b). a. Tora nº 1. b. Tora nº 2. c. Tora nº 3. d. Tora nº 4. e. Tora nº 5.	192
64.	Distribuição radial de deformações de crescimento longitudinais ($1\mu\varepsilon = 10^{-6}$ mm/mm) decorrentes da liberação de tensões no desdobro de toras de <i>Eucalyptus grandis</i> Hill. ex Maiden em pranchas. a. Tora nº 1. b. Tora nº 2. c. Tora nº 3. d. Tora nº 4. e. Tora nº 5.	200

LISTA DE TABELAS

1. Deformações de crescimento longitudinais periféricas determinadas por diferentes autores para algumas espécies de <i>Eucalyptus</i> spp. (KLUBER, 1987)	92
2. Tensões de crescimento longitudinais de trações periféricas determinadas para algumas espécies de <i>Eucalyptus</i> spp.	93
3. Deformações de crescimento longitudinais específicas obtidas para <i>Eucalyptus gigantea</i> (<i>Eucalyptus delegatensis</i>), pelo método da “prancha diametral” (resultados ilustrativos do experimento de JACOBS, 1939). . .	96
4. Deformações e tensões de crescimento longitudinais de tração periférica e de compressão próximas à medula, determinadas para <i>Eucalyptus regnans</i> F.V.M. (BOYD, 1950a).	97
5. Variação das deformações e tensões de crescimento longitudinais máximas, determinadas no interior do tronco de diferentes árvores	97
6. Deformações de crescimento tangenciais compressivas determinadas na periferia de árvores de <i>Eucalyptus</i> spp. (BOYD, 1950a).	98
7. Alturas, diâmetros e outras características das árvores de <i>Eucalyptus grandis</i> Hill. ex Maiden selecionadas para estudo.	108
8. Diâmetros, raios e dimensões de maiores rachas ocorrentes nos topos das toras utilizadas para determinação das deformações de crescimento longitudinais	116
9. Variação dos teores de umidade mínimos dos sarrafos utilizados na determinação das deformações de crescimento longitudinais.	152
10. Valores médios das densidades verde, saturada, seca e básica e de seus	

	correspondentes desvios padrão e coeficientes de variação para o lenho adulto e juvenil de <i>Eucalyptus grandis</i> Hill. ex Maiden	153
11.	Densidades verde, seca e básica para o lenho adulto e juvenil de <i>Eucalyptus grandis</i> Hill. ex Maiden utilizado na determinação das deformações de crescimento transversais.	157
12.	Valores médios de propriedades mecânicas em condição verde, correspondentes desvios padrão e coeficientes de variação, determinados para a madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> Hill. ex Maiden.	158
13.	Comparação das dimensões de amostras utilizadas na determinação de deformações de crescimento longitudinais, através de métodos baseados em diferenças entre comprimentos de sarrafos.	168
14.	Intervalo de tempo transcorrido entre o desdobro e a determinação do comprimento dos sarrafos.	175
15.	Deformações de crescimento longitudinais residuais determinadas no interior do tronco de cinco árvores de <i>Eucalyptus grandis</i> Hill. ex Maiden, com 11 anos de idade.	189
16.	Distância radial de transição, a partir da medula, entre o estado de tração longitudinal periférica e o de compressão longitudinal central, no tronco de árvores de <i>Eucalyptus grandis</i> Hill. ex Maiden.	197
17.	Magnitudes das deformações de crescimento longitudinais decorrentes da liberação de tensões no desdobro de toras em pranchas (ϵ_{tp}) e de pranchas em sarrafos (ϵ_{ps}), na espécie de <i>Eucalyptus grandis</i> Hill. ex Maiden.	199
18.	Deformações de crescimento tangenciais determinadas em um disco de madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> Hill. ex Maiden.	204
19.	Deformações de crescimento radiais determinadas em um disco de madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> Hill. ex Maiden.	205
20.	Magnitudes das deformações de crescimento longitudinais determinadas e correspondentes tensões paralelas às fibras, obtidas pela Lei de Hooke, para <i>Eucalyptus grandis</i> Hill. ex Maiden.	207

RESUMO

As tensões de crescimento têm efeitos benéficos para as árvores vivas, constituindo-se entretanto em graves dificuldades para o processamento da madeira, quando cortes transversais e longitudinais, liberando estas tensões, provocam o aparecimento de empenamentos e rachas. Os estudos destas tensões foram conduzidos neste trabalho, utilizando cinco árvores de *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden, provenientes de plantios localizados em Barra Velha - SC, e incluem: uma extensa análise da literatura existente sobre diversos assuntos correlatos; a determinação de propriedades físicas e mecânicas e de alguns caracteres gerais da madeira utilizada; e uma detalhada apreciação dos métodos empregados na determinação destas tensões, culminando com a proposição e fabricação de um equipamento apropriado às suas medições e à conseqüente determinação de suas magnitudes e distribuição no interior dos troncos. Com a finalidade de subsidiar futuros experimentos, este trabalho incluiu discussões de importantes parâmetros relacionados à determinação de deformações de crescimento, como: adequabilidade de amostras quanto às suas dimensões e intervalo de tempo necessário entre medições, visando possibilitar a recuperação de deformações elásticas e visco-elásticas. Os valores da densidade básica determinados, sendo maiores na madeira adulta do que na juvenil, confirmaram a existência de um gradiente crescente de variação no sentido medula-casca. Este mesmo gradiente, sendo observado para as propriedades de resistência da madeira, também confirmou a correlação direta existente entre estas e a densidade básica. Não foi evidenciada nenhuma tendência de variação da densidade com a altura da árvore, ao longo da pequena extensão de comprimento considerada (2,32m). A amostragem realizada para a determinação das densidades (verde, seca, saturada e básica) foi suficiente para garantir intervalos de confiança da média de até 5%, a um nível de confiança de 98%. Para as propriedades mecânicas, os valores obtidos em uma pré-amostragem apenas puderam ser considerados como indicativos de seus valores verdadeiros. A exemplo de procedimentos adotados internacionalmente, as tensões de crescimento foram medidas e analisadas baseando-se nas correspondentes deformações ocorrentes em função de suas liberações pelos cortes transversais e longitudinais efetuados quando do processamento da madeira, sendo expressas em unidades de microdeformação, $\mu\epsilon$ ($1\mu\epsilon = 10^{-6}$ mm/mm). As deformações de crescimento transversais foram medidas de forma similar à proposta por JACOBS (1945) e BOYD (1950a) e os valores obtidos confirmaram a existência de uma compressão tangencial periférica ($1.726\mu\epsilon$), bem como de um gradiente de tração radial crescente, a partir de um valor igual a zero, nas proximidades da camada cambial, até um valor máximo ($2.345\mu\epsilon$), nas proximidades da medula. O desempenho do aparelho fabricado para determinação das deformações de crescimento longitudinais foi considerado satisfatório, uma vez que o erro máximo possível de ter ocorrido ($21\mu\epsilon$) é bem inferior aos computados em outros experimentos similares. A magnitude média das deformações de crescimento longitudinais de compressão, ocorrentes próximas à medula ($1.131\mu\epsilon$), situou-se na faixa central dos valores conhecidos para *Eucalyptus* spp., e a das deformações longitudinais de tração ($390\mu\epsilon$) foi cerca de 45% inferior, devido às suas medições não terem sido realizadas exatamente junto à camada cambial. O gradiente de deformação de crescimento longitudinal passa do estado máximo de tração (na periferia) ao de compressão máxima (próxima à medula) apresentando uma configuração semelhante para as cinco árvores analisadas. Sua comparação com o modelo teórico de KUBLER (1959b) apresentou concordância em sua porção central. O ponto de transição do estado de compressão para o de tração ocorreu, em termos médios, a 61% do valor do raio, a partir da medula, comparando-se muito bem com a variação de 45 a 75% registrada para diferentes espécies de madeira. O aumento do comprimento de pranchas diametraes, decorrente de seus desdobros, conforme é mencionado na literatura, não foi confirmado em todos os resultados. As tensões de crescimento correspondentes às deformações determinadas, calculadas através da Lei de Hooke ($\sigma = \epsilon E$), indicaram a possibilidade de ocorrerem deformações plásticas e até rupturas da madeira nas proximidades da medula (zona de compressão longitudinal), quando da árvore viva. Em função da análise dos dados apresentados, maiores rendimentos qualitativos e quantitativos de madeira serrada deverão ser obtidos utilizando-se o processo de desdobro de "cortes simultâneos". Entretanto, na indisponibilidade de equipamentos de serras múltiplas, o desdobro de "cortes alternados" é indicado.

SUMMARY

Growth stresses have benefic effects to the standing trees, but they become a great problem for wood processing when the transversal and longitudinal cuts releasing these stresses cause serious degrade as it is shown by the splitting of logs and splitting and warping of the resulting sawn timber. The study of these stresses were conducted in this work using five trees of *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden grown in Barra Velha - Santa Catarina State, Brazil. It mainly includes: an extensive literature review concerning the main subjects involved; the physical, mechanical and general characteristics determination of the wood utilised; and a critical analysis of the methods employed in growth stresses evaluation, in order to propose an appropriate device to their measurements and also to determine their magnitudes and distribution inside tree trunk. In order to support future investigation on the matter in Brazil, this work also includes discussions of important parameters related to growth stresses evaluation such as sample size and the time interval required to elastic and plastic growth strain recovery. The sapwood basic density values being greater than those found for the heartwood, support the well known existence of an increasing gradient from the pith to the bark. Also the same increasing variation rate observed for the wood strength properties confirms its direct relationship with the basic density property. No correlation was found between density and tree height inside the small range of length considered (2.32m). The sample size taken for basic, dry, green and saturated densities determination was enough to have up to 5% accuracy range of the mean value at 98% confidence interval, but for the mechanical properties the values obtained in a random exploratory sampling could only be considered as indicative of their real values. Following the procedures adopted world-wide the growth stresses measurement were made and analysed based on the corresponding residual growth strains which the wood sample undertakes as the stress is released by transversal and longitudinal cuts, and they are expressed in units of microstrain, $\mu\epsilon$ ($1 \mu\epsilon = 10^{-6}$ mm/mm). The transversal growth strains were measured through the similar procedure adopted by JACOBS (1945) and BOYD (1950a) and the obtained values corroborate the existence of a peripheral tangential compression ($1,726 \mu\epsilon$) as well as a radial tension gradient increasing from a zero value near the cambial layer up to a maximum value equal to $2,345 \mu\epsilon$ near the pith. The measuring frame proposed for longitudinal growth strains evaluation performed well since the possible maximum error was below $21 \mu\epsilon$. This value is smaller than those accepted by similar experiments conducted elsewhere. The longitudinal compression growth strain mean determined ($1,131 \mu\epsilon$), which takes place near the pith, was around the average mean known for *Eucalyptus* spp. and the tension one ($390 \mu\epsilon$) was around 45% lower, once its measurement was not taken exactly near the cambial layer. The longitudinal growth strain gradient goes from a maximum tension state in the peripheral layer to the mentioned maximum compression near the pith. This same gradient shape was common for the five tree studied. Its comparison with KUBLER's (1959b) theoretical model showed agreement in the central part. The radial point of transition from the compression to tension state was located at 61% of the ray length, on average, departing from pith position. This agrees well with the range of 45 to 75% recorded form different species of timber. The diametrical plank increase in length due to its sawing from the log, as it is recognised by the literature consulted, was not confirmed by all the results obtained. The growth stresses corresponding to the measured growth strains were calculated by Hooke's law ($\sigma = \epsilon E$). They indicated that plastic strain or even wood rupture can happen near the pith (longitudinal compression zone) in the standing tree. Considering all data presented, better qualitative and quantitative yields of sawn timber can be obtained if a "gang sawing process" is applied. In the case where a multiple saw equipment is not available the "sawing around the log process" is indicated.

1. INTRODUÇÃO

As tensões de crescimento ocorrem em função de forças internas, que se desenvolvem no tronco de árvores vivas, conforme definido pela “Society of American Foresters” (DINWOODIE, 1966). Elas têm origem na camada cambial quando, por alguma razão ainda não muito bem definida, as células em crescimento tendem a contrair-se na direção da grã e a expandir-se transversalmente, sendo seus movimentos coibidos pelas forças de ligações já existentes entre células anteriormente formadas.

As tensões de crescimento devem ser diferenciadas de outras tensões adicionais, que possam se desenvolver no interior da madeira. São distintas de forças gravitacionais, exercidas sobre a árvore anteriormente à sua derruba, como por exemplo as devidas à ação do seu próprio peso. Não devem ser confundidas com as forças de tensões de seiva, decorrentes de variações diárias ou sazonais, com as tensões de secagem que se desenvolvem na madeira em função da contração irregular de suas partes e nem com as forças criadas pelo efeito de derruba da árvore. As tensões de crescimento não incluem qualquer força de origem externa.

Estas tensões são significativamente importantes para a própria sustentação da árvore viva e na prevenção de ocorrência de rupturas mecânicas. Através do aumento da resistência dos troncos à flexão, introduzem reforço contra a ação de forças externas, como as induzidas pela ação do vento. Devido à sua natureza dinâmica desempenham importantes funções na reorientação de copas, troncos e galhos, a exemplo das conhecidas “madeiras de reação”, consideradas como um caso especial ou extremo de tensões.

Entretanto, quando ocorre o rompimento do equilíbrio natural existente dentro da árvore, as tensões de crescimento são liberadas com efeitos danosos à utilização da madeira.

A ocorrência de rachas radiais no topo de corte de árvores recém-abatidas ou de toras recém-cortadas é muito comum. Normalmente, elas se iniciam próximas à medula, imediatamente após ser efetuado o corte transversal de abate ou de traçamento, alcançando suas dimensões máximas após um período de três dias (MALAN, 1979) e podem se estender de casca a casca e sobre os comprimentos totais da tora, durante o armazenamento (Figura 1).

A eliminação das seções rachadas, através de novos cortes transversais, é simplesmente impossível. Cada novo topo obtido apresenta uma configuração semelhante à anterior (SALES, 1986).

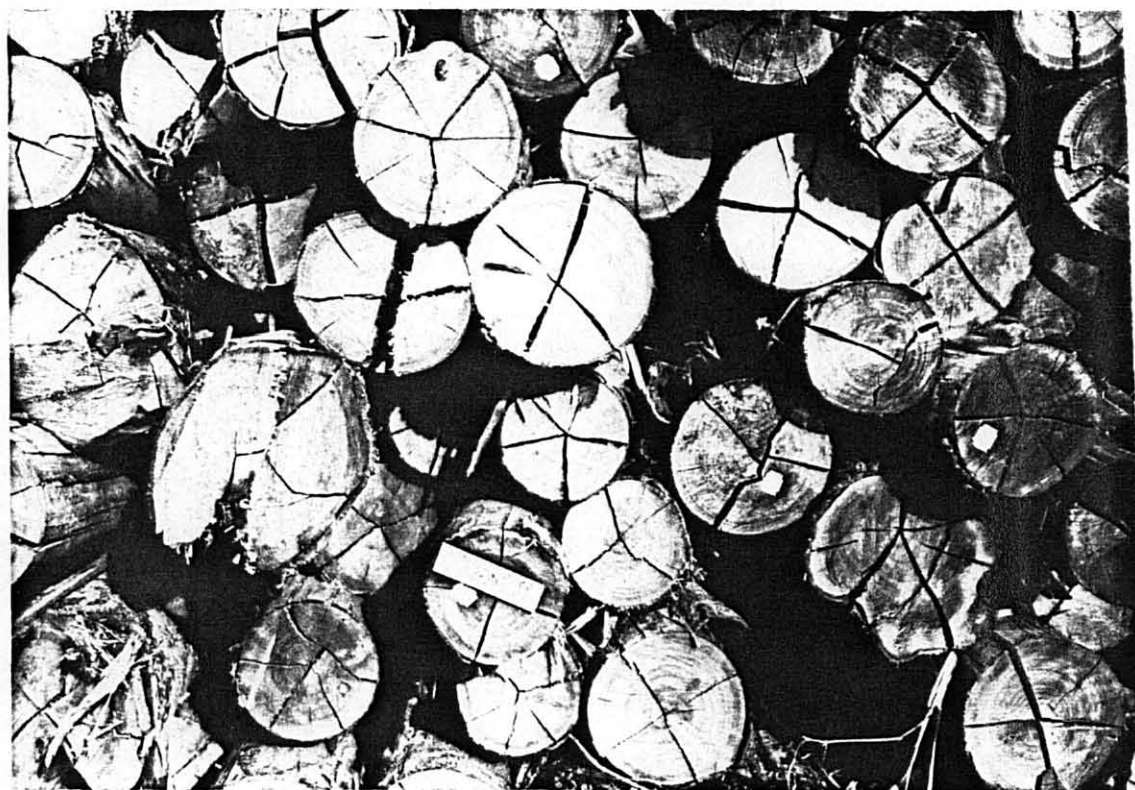
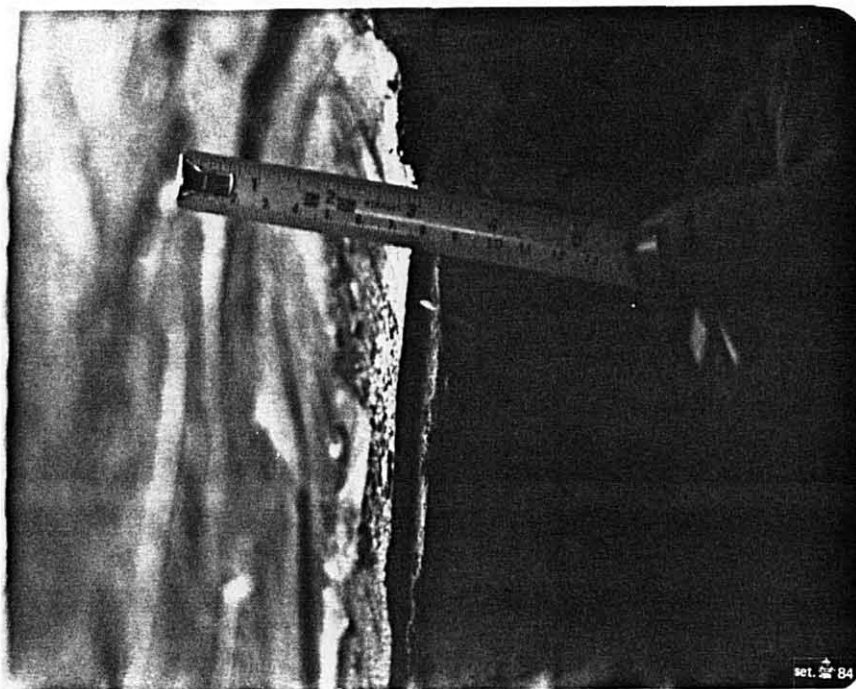


FIGURA 1. RACHAS DE TOPO EM TORAS DE *Eucalyptus* spp. ARMAZENADAS NO PÁTIO DE TORAS DA WEG MOTORES S.A., EM JARAGUÁ DO SUL-SC.

Durante o desdobro da tora, as rachas de topo tendem a aumentar, principalmente se técnicas apropriadas para favorecer um alívio simétrico e homogêneo de tensões não forem utilizadas. Este mesmo cuidado deve ser tomado para minimizar a ocorrência de empenamentos de pranchões e tábuas e, mesmo, de encurvamento da própria tora, freqüentemente observados durante operações rotineiras de desdobro.

Ao lado das considerações econômicas intrínsecas relativas aos defeitos mencionados, os quais podem ser bastante elevados, ocasionando a perda de toda a tora em alguns casos (GUÉNEAU, 1973), ressaltam-se as possibilidades de suas ocorrências de formas imprevistas, durante o processamento de troncos em toras e destas em madeira serrada, com conseqüências danosas para o operador ou para o próprio equipamento.

Na madeira serrada, as degradações, devido às tensões de crescimento, apresentam-se na forma de todos os defeitos comentados, ou sejam, rachas, empenamentos diversos (arqueamentos, encurvamentos, encanoamentos e torcimentos), bem como variações de dimensões (espessura, largura e comprimento) das peças serradas (Figura 2).



- (1) Topo da tora
- (2) Costaneira
- (3) Diminuição do comprimento da costaneira após o corte

FIGURA 2. DIMINUIÇÃO DO COMPRIMENTO DA COSTANEIRA RECÉM-CORTADA DE UMA TORA DE TATAJUBA - *Bagassa guianensis* (PONCE, 1987).

As tensões de crescimento podem ser de tração ou de compressão, sendo esta diferenciação uma função da localização dentro do xilema e da direção longitudinal, tangencial ou radial de suas atuações.

Embora as tensões transversais sejam apenas da ordem de 10% das longitudinais, elas provocam rachas de magnitudes bem mais acentuadas, devido a madeira ser muito menos

resistente nesta direção. Por outro lado, as tensões longitudinais são as principais responsáveis pelos empenamentos em função das dimensões das peças de madeira serrada (KUBLER, 1987), sendo também associadas à ocorrência de cerne quebradiço próximo à medula (JACOBS, 1938; NICHOLSON, 1973b, etc.), defeito que inviabiliza a utilização da madeira para diferentes produtos.

O fenômeno de desenvolvimento das tensões de crescimento e de seus efeitos adversos é comum a todas as espécies de madeira, sendo de menor intensidade nas gimnospermas (NICHOLSON, 1973b). Em madeiras de angiospermas, a ocorrência é diversificada. PONCE (1993) relata ter observado evidências destas tensões em importantes espécies da amazônia brasileira, como Mogno (*Swietenia macrophylla*), Jatobá (*Hymenaea* sp.), Andiroba (*Carapa guianensis*), Cedro (*Cedrela* sp.), Cupiúba (*Goupia glabra*) e em Tatajuba (*Bagassa guianensis*), esta última exemplificada na Figura 2. Entretanto, não resta dúvida de que o fenômeno é bastante sério em *Eucalyptus* spp. e mais particularmente em *Eucalyptus grandis* (MALAN, 1979 e 1984).

Embora os defeitos adversos citados sejam considerados comuns a uma ou outra espécie, pela indústria de serraria brasileira, suas ocorrências são freqüentemente atribuídas a causas diversas, como: característica intrínseca de determinada espécie, falhas de processamento e influência de ciclos lunares quando da derruba da árvore, fato este ainda não comprovado cientificamente.

No próprio meio científico e de pesquisa o assunto é muito pouco difundido. Além de publicações relacionadas principalmente com as propriedades físicas de espécies com reconhecidos problemas de utilização, como é o caso dos *Eucalyptus* spp., muito pouco tem sido feito. BERENGUT et al. (1973), VIANNA NETO (1986) e MONTAGNA et al. (1990) apresentam resultados práticos concernentes ao desdobro de Eucaliptos; BAENA (1982), FERNANDES (1982) e AGUIAR (1986) envolvem-se com tensões de crescimento em Eucaliptos, mas considerando-as através de medidas indiretas de suas intensidades; finalmente, de conhecimento do autor, pode-se citar PONCE (1993) que apresenta comentários sobre o Eucalipto como madeira serrada.

Desta forma, considerando a gravidade dos efeitos adversos decorrentes das tensões de crescimento, quando do processamento da madeira e por tratar-se de um campo de pesquisa ainda pouco explorado, principalmente no Brasil, faz-se necessário dirigir os estudos nesta área de conhecimento, de tal forma a propiciar o entendimento necessário à minimização dos conseqüentes prejuízos.

A espécie de *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden é selecionada, devido a mesma ser apontada como tendo seu processamento efetivamente dificultado pela presença das tensões de crescimento e por sua relevante importância nos reflorestamentos brasileiros, onde possui elevado potencial de crescimento, apresentando incrementos médios que podem alcançar até 30m³/ha/ano (FAO, 1981), cerca de seis a sete vezes maior do que a média mundial (JACOBS, 1973). Também, a sua importância como madeira serrada é confirmada em vários países como Austrália, África do Sul, Chile, Nova Zelândia, Uruguai e Argentina (FAO, 1981 e PONCE, 1993), sendo as possibilidades de sua utilização bastante diversificadas: madeira estrutural, construção de casas, assoalhos, móveis, artigos de marcenaria e carpintaria em geral, chapas compensadas, aglomeradas e de fibras, conforme citado por diferentes autores (HILLIS & BROWN, 1978; FAO, 1981; MALAN, 1984; PONCE, 1993; etc).

Especificamente, os objetivos desta tese incluem:

- Apresentar uma "Revisão de Literatura" detalhada, buscando situar o leitor na evolução dos assuntos envolvidos, ao mesmo tempo em que auxilia o autor a encontrar os conhecimentos e justificativas necessárias ao desenvolvimento experimental proposto.
- Estudar a madeira da espécie de *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden, quanto a seus caracteres gerais e propriedades físicas e mecânicas. As suas propriedades mecânicas são ainda muito pouco estudadas no Brasil.
- Determinar a magnitude das deformações de crescimento transversais e longitudinais, bem como o espectro da distribuição destas no interior de toras da madeira selecionada, de forma a confirmar configurações propostas e possibilitar a

escolha de processos de desdobros alternativos, que possam propiciar melhores rendimentos quantitativos e qualitativos de madeira serrada.

- Avaliar a metodologia utilizada na determinação de tensões de crescimento, considerando a "Revisão de Literatura" apresentada e a parte experimental executada, de tal forma a possibilitar o seu aprimoramento em pesquisas similares, destacando: a introdução de um aparelho de medição de deformações, avaliado pela reprodutibilidade dos resultados obtidos e a discussão de importantes parâmetros correlatos como o abate de árvores, o desdobro, a adequabilidade de amostras e o intervalo de tempo entre as medições.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Várias publicações tratam da revisão de literatura sobre assuntos correlatos a tensões de crescimento na madeira. ARCHER (1986a) considera que existem boas revisões sobre o período inicial, apresentadas por diferentes autores: MÜNCH (1938), CLARKE (1939), JACOBS (1945), BOYD (1950a, b e c), MAYER-WEGELIN (1955), PLATON (1959), LENZ & STRASSLER (1959), KUBLER (1959a) e DINWOODIE (1966).

A partir de 1966 bastam ser citadas três excelentes publicações revisórias: CHAFE (1979b) e, principalmente, o próprio ARCHER (1986a) e KUBLER (1987). O trabalho de ARCHER enfatiza o tratamento matemático do problema e o de KUBLER apresenta uma extensa descrição comparativa da evolução alcançada até a época.

A revisão aqui apresentada objetiva ser completa e detalhada, de tal forma a situar o leitor sobre a evolução dos assuntos mais intimamente relacionados com os experimentos realizados, para determinação da magnitude e distribuição das tensões de crescimento no interior de troncos de árvores do *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden.

2.1. Origem das tensões de crescimento

Conforme é demonstrado nesta tese, as tensões de crescimento atuam longitudinalmente e transversalmente em relação ao tronco de uma árvore. No sentido longitudinal apresentam um gradiente variável a partir de uma tração máxima nas proximidades da casca a uma compressão também máxima na medula.

Transversalmente seus gradientes manifestam-se como tensões radiais de tração de valor nulo na periferia e máximo na medula e tensões tangenciais máximas de: compressão periférica e tração na medula.

JACOBS (1945) observa que estas tensões ocorrem de forma geral em troncos retilíneos de árvores, deixando sugerir que têm origem em um fator ou fatores comuns a todas elas. A natureza de suas distribuições, por sua vez, sugere que a tensão de tração longitudinal desenvolve-se primeiramente em cada nova camada de células formada, sendo a compressão longitudinal interior um efeito reativo. Seria pouco razoável supor que a madeira sem vida, interna no tronco, pudesse ser responsável por uma força de compressão primária que originasse uma tração, de valor periférico constante, em uma árvore em crescimento.

Fundamentando-se nestas considerações iniciais, este item discute as diversas hipóteses existentes sobre a origem das tensões de crescimento.

Em geral, é atribuída a MARTLEY (1928) a primeira tentativa para explicar a origem das tensões de crescimento. Segundo CHAFE (1979b), MARTLEY questionou quando o peso da árvore, durante seu crescimento, poderia ser responsável pelas tensões internas dentro da madeira. Entretanto, de acordo com as próprias conclusões do autor, o valor de 21kg/cm^2 , determinado como a compressão máxima provável no centro da árvore, não pode ser responsável pelas deformações observadas na madeira serrada, ou pelo início de rompimento das paredes celulares associado ao cerne quebradiço. Segundo POST (1979a), os valores obtidos por MARTLEY variaram de apenas $0,7$ a $3,5\text{kg/cm}^2$, o que corresponde a aproximadamente 1% da magnitude máxima das tensões de crescimento longitudinais comumente observadas, sendo portanto bastante razoável desconsiderar a influência do peso da árvore.

JACOBS (1945) concorda que o peso da árvore constitui-se em uma contribuição secundária às tensões de crescimento longitudinais, acrescentando que os gradientes longitudinais de deformações, encontrados nos troncos retilíneos de eucaliptos, correspondem quantitativamente àqueles encontrados em galhos da mesma espécie.

KOEHLER (1933) analisa três hipóteses para justificar as tensões de compressão

tangencial e tração radial existentes na madeira verde: crescimento circunferencial maior do que o radial, redução da turgidez de tecidos mais velhos e contração química da madeira mais antiga. No primeiro caso, o menor crescimento do diâmetro (d) da árvore em relação ao crescimento de sua circunferência ($c = \pi d$) provoca o aparecimento de tensões de compressão circunferenciais, trações radiais e, conseqüentemente, fissuras internas. O inverso seria improvável, uma vez que fissuras na periferia são menos comuns de serem observadas. Nas outras duas hipóteses, as alterações de dimensões de células em função da plasmólise ou de alterações químicas quando da morte da célula, estando estas presas a outras células, originam as referidas tensões. KOEHLER reconhece a falta de dados concretos para suportar suas hipóteses.

MÜNCH (1938), citado por DINWOODIE (1966), interessado primeiramente em madeira de reação, sugere que as tensões envolvidas são devidas à contração longitudinal das paredes das células da madeira de tração, seguida concomitantemente de inchamento das paredes transversais. Este processo deve-se ao incrustamento de lignina entre as fibrilas celulósicas (KUBLER, 1987). DINWOODIE acrescenta que, em conseqüência do aumento da pressão dentro da parede celular, provocando o inchamento exterior da célula e de sua parede, resulta na redução do ângulo fibrilar responsável pela diminuição do comprimento da célula e elevada tensão longitudinal.

Embora a hipótese apresentada por MÜNCH tenha sido relacionada com a madeira de tração de angiospermas (ARCHER, 1986a, descreve observações de MÜNCH, 1937 e 1938, referindo-se a gimnospermas), ela é utilizada para explicar as tensões de crescimento em troncos de árvores eretas e normais, conforme será tratado posteriormente.

JACOBS (1938) observa que a teoria mais razoável para explicar o estado de tração de fibras da madeira consiste na existência de pequena tendência de contração de seus elementos, quando do processo de suas solidificações a partir do câmbio. Esta tendência de contração sendo resistida pela adesão destes elementos a outros, situados mais no interior da madeira, provoca um estado de tração em cada nova fibra formada, mas acumula uma tremenda força ao longo de cada raio, à medida que a árvore cresce em diâmetro. De acordo

com JACOBS, esta nova teoria refuta o fenômeno de “tração da seiva” (“sap pull” ou “pull toward the sap”) já conhecida há muitos anos.

Entretanto, JACOBS (1945) novamente considera várias possibilidades de origem das tensões, inclusive o efeito do peso da árvore conforme já comentado, as conexões com o desenvolvimento celular (pressões de vacuolização e da casca, tamanho da célula e diversas alterações na parede celular compreendendo complexos celulósicos e coloidais, complexos de lignina, substância intercelular, paredes primária e secundária) e a tensão superficial juntamente com as forças devidas à tração da seiva. Ele faz opção por esta última, por melhor ajustar-se às deformações de crescimento encontradas em troncos de espécies de folhosas e em coníferas de grandes diâmetros.

A hipótese envolvendo a tração da seiva baseia-se em princípios da capilaridade. Quando um líquido sobe em um tubo capilar, ele é colocado em estado de tração e as paredes do tubo em estado de compressão. Similarmente, quando da queda de um líquido que desenvolve um menisco côncavo em cada extremo, ele novamente se encontra em estado de tração e a parede do tubo em compressão longitudinal. No caso do tubo capilar possuir um ponto de menor diâmetro, a queda do líquido com seu menisco côncavo se dirigirá para esta posição mais estreita, da qual somente será deslocado através de uma força maior do que a pressão capilar exercida pelo menisco neste ponto.

Considerando que o fenômeno da capilaridade também ocorre em árvores, JACOBS argumenta que a seiva dentro de tubos celulares, contendo várias obstruções e situados na periferia do tronco, está em estado de tração. Este fato é comprovado pela saída de líquidos em cortes efetuados com uma faca no tronco da árvore, após a retirada cuidadosa da casca. Esta força de tração dos líquidos, que pode ser igual ou superior a aproximadamente 200kg/cm^2 , coloca as células tubulares em estado de compressão longitudinal, a qual, por sua vez, sendo transferida para o interior da madeira incrementalmente com o crescimento diametral da árvore, pode ser responsável pelas deformações de crescimento observadas. A contração medida em sarrafos da periferia de pranchas representa um ajuste de dimensões dos elementos da madeira em reação à tração remanescente nas colunas de seivas.

A respeito da rejeição inicial desta hipótese (JACOBS, 1938), é argumentado que não havia sido considerado o efeito de obstáculos existentes nas colunas de seiva, os quais provocando estreitamentos são capazes de manter o estado de tração necessário à explicação do fenômeno.

Em caso da hipótese de tração da seiva ser correta, o termo “tração das fibras”, usualmente empregado, é incorreto. A seiva próxima à periferia do tronco encontra-se em estado de tração, comprimindo progressivamente a madeira, a partir da periferia e em direção à medula.

A pressão de vacuolização e as forças desenvolvidas durante a maturação das células, tanto pelas alterações nos micélios celulósicos quanto durante o processo de lignificação, podem contribuir com a hipótese em questão.

Adicionalmente, JACOBS argumenta que a tração da seiva pode reduzir o diâmetro da célula, provocando uma pequena expansão na direção tangencial. Em função das células estarem presas umas às outras, esta alteração de dimensão origina o estado de compressão circunferencial e tração radial observado.

BOYD (1950c) analisa criticamente as hipóteses formuladas até então sobre a origem das tensões de crescimento, concluindo que o próprio desenvolvimento estrutural das células periféricas constitui-se em uma explicação mais convincente.

Concordando com JACOBS (1945), BOYD acrescenta diversos outros fatores inconsistentes com a hipótese de efeito do peso da árvore: magnitude de tensões longitudinais e transversais determinadas (JACOBS, 1945 e BOYD, 1950a), existência de um anel ou zona de tração periférica em torno da árvore e variação com a altura - a tração periférica é aproximadamente constante em volta (JACOBS, 1945 e BOYD, 1950a) e em qualquer altura da árvore (JACOBS, 1938 e 1945).

O crescimento circunferencial maior do que o radial é refutado ao considerar-se que qualquer ajustamento da forma da célula pode ocorrer na diferenciação dos tecidos lenhosos, anteriormente ao desenvolvimento da parede secundária. Esta parede é de maior importância nas considerações sobre tensões de crescimento, em função de sua maior

espessura e resistência comparada com a parede primária (PRESTON, 1947 e Figura 3), não estando sujeita a nenhuma pressão externa, o que é comprovado pela uniformidade do tamanho das células. Dúvidas sobre a validade desta hipótese persistem ainda em função da dificuldade criada para explicar a distribuição relativamente uniforme das tensões de crescimento com o crescimento da árvore (JACOBS, 1945), em face do esmagamento ou estiramento de camadas celulares que ocorreriam.

A redução da turgidez das células proposta por KOEHLER (1933) é contestada por BOYD em função da existência de apenas uma pequena proporção de células vivas na madeira adulta da maioria das espécies e, portanto, com a referida redução já ocorrida. Desta forma, é improvável que o efeito decorrente de indução de tensões transversais estenda-se por toda a seção transversal. Acrescenta-se ainda que o volume relativo de madeira com células vivas tende a diminuir, com a idade da árvore, mas o efeito de tensões de crescimento não está confinado às árvores mais jovens.

A contração “química” subsequente à morte das células, também proposta por KOEHLER (1933), é improvável devido aos mesmos argumentos colocados no caso de perda de turgidez, além de não estar de acordo com efeitos observados e resultados experimentais.

Dois argumentos apresentados por BOYD (1950c), entre outros, os quais são também acordados por CHAFE (1979b), inviabilizam a hipótese de tração da seiva apresentada por JACOBS (1945). Em primeiro lugar, se forças de sucção da ordem de $140\text{kg}/\text{cm}^2$ ou mesmo maiores, forças estas necessárias para originar as tensões de crescimento, são aplicadas às células, então existe a real possibilidade de colapso de vasos e de fibras do lenho inicial, o que não ocorre na prática. Por outro lado, a necessária sucção depende diretamente das dimensões dos canais condutores e da altura da árvore (THOMAS, 1937). Como a sucção da seiva é desenvolvida pelas folhas, espera-se que forças maiores sejam desenvolvidas nas partes mais elevadas das árvores do que na sua base, correspondendo conseqüentemente a tensões de crescimento maiores e menores respectivamente, o que também não ocorre nos experimentos do próprio JACOBS (1938 e 1945).

Fazendo uso de resultados de experimentos desenvolvidos por JACOBS (1945) e

baseando-se em diversas suposições para ter-se uma idéia das forças de vacuolização, BOYD conclui que as magnitudes destas forças são inadequadas para explicar as tensões de crescimento longitudinal e transversal.

Finalmente, dentre todas as hipóteses propostas, BOYD (1950c), concordando com MÜNCH (1938), conclui que aquela que melhor se adapta aos fatos consiste na existência de uma tendência para que as células periféricas diminuam de comprimento e aumentem irreversivelmente suas seções transversais. Se este mecanismo ocorre em madeira em condições normais, conforme sugerido por CLARK (1939), então as tensões de crescimento longitudinal e transversal podem ser explicadas. BOYD sugere que “o material celulósico deve ser o primeiro responsável, embora possivelmente modificado pela quantidade e disposição de lignina e carboidratos integrantes”.

WATANABE (1965), citado por CHAFE (1979b), apresenta uma detalhada descrição do processo de encurtamento da célula como causa das tensões de crescimento, de forma similar aos estudos de BOYD (1972). A intercalação e polimerização da lignina nos espaços intermicrofibrilares das paredes celulares provoca inchamento destas paredes, aumentando o diâmetro das células, o que é comprovado por dados obtidos por GROZDITS & IFJU (1969) e compilados por BOYD (1972). Associado com o aumento diametral, ocorre um aumento ou diminuição do comprimento da célula, em função do ângulo microfibrilar da sua camada (S_2) da parede secundária. Para ângulos menores ocorre o encurtamento e, inversamente, para os maiores ocorre o alongamento.

O aumento diametral acompanhado por uma diminuição no comprimento da célula é explicado pela teoria geral da mecânica, segundo a qual “para todo material estrutural, incluindo a madeira, a qualquer alteração em uma de suas dimensões ou forma, correspondem alterações secundárias nos dois planos mutuamente perpendiculares ao primeiro”. Já a dependência angular é explicada pelo modelo matemático de BARBER & MEYLAN (1964), desenvolvido para a contração da madeira em suas três dimensões (devido à remoção de água), considerando ainda a significativa interação dos efeitos da matriz de materiais

(conforme existente nas paredes celulares), os materiais incrustados e suas interações com ângulos microfibrilares (BOYD, 1972).

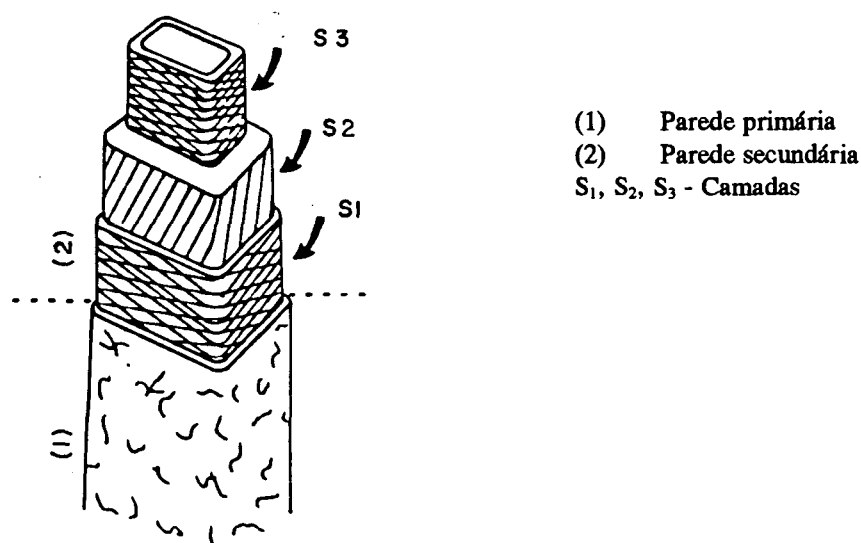


FIGURA 3. VISTA MICROSCÓPICA DE UMA FIBRA ILUSTRANDO A ORIENTAÇÃO DE MICROFIBRILAS NAS VÁRIAS CAMADAS DA PAREDE CELULAR (WILKINS, 1986a).

Fazendo uso destas teorias e levando-se em conta o efeito de inchamento provocado pela lignina na parede celular como o equivalente inverso da contração pela remoção de água, BOYD mostra que, para ângulos microfibrilares entre 10 a 40°, a célula contrai longitudinalmente, enquanto para valores acima de 40° ela se alonga.

CHAFE (1979b) reporta que os ângulos fibrilares na parede secundária tendem a ser relativamente pequenos em troncos retos e verticais e, desta forma, o encurtamento constitui-se em tendência normal, o que é acordado por BOYD (1972) para os ângulos microfibrilares usuais observados nas células da madeira.

WILSON (1981) e TIMELL (1973) reportam sobre a determinação de ângulos menores de 30° para a madeira de compressão e 50° para a madeira oposta a esta (“opposite wood”), respectivamente, conforme citado por WILKINS (1986a). Este último autor concorda com WILSON (1981) quanto à possibilidade da não dependência angular na geração

de tensões, ao posicionar os valores angulares para as madeiras normais de gimnospermas entre os dois extremos determinados (30 e 50°).

A geração de tensões, considerando a ocorrência do inchamento e do alongamento ou encurtamento de células devido ao processo de lignificação, é perfeitamente compreensível. Qualquer alteração nas dimensões de uma célula como resultado da lignificação de suas paredes em um estágio moderadamente avançado de sua diferenciação, força alterações similares em todo o tecido já diferenciado, ao qual a célula está firmemente presa. Inevitavelmente, o tecido maduro resiste a tal alteração forçada de suas dimensões, impondo, por sua vez, uma restrição na alteração de dimensão da célula em diferenciação. Esta restrição de movimentos de elementos presos uns aos outros provoca o aparecimento de tensões.

Na direção longitudinal, a restrição imposta à diminuição do comprimento das células em diferenciação na periferia do tronco, pelos tecidos maduros, origina tensão de tração longitudinal na periferia. Inversamente, a força exercida pelas células em diferenciação, que tendem a diminuir de comprimento, sobre os tecidos maduros, origina tensões de compressões longitudinais incrementais através de qualquer seção transversal do tronco ou galho de uma árvore.

Cada camada consecutiva de crescimento é depositada no tronco de uma árvore em estado de tração longitudinal. Esta tração, pequena para elementos individuais, tem um efeito cumulativo de compressão longitudinal sobre os elementos vizinhos, de tal forma a alcançar valores de magnitudes consideráveis em direção à medula.

Através dos dados obtidos por GROZDITS & IFJU (1969), referentes a alterações de dimensões das células, e considerando a Razão de Poisson e a Lei de HOOKE (Item 2.2), BOYD (1972) demonstra que as alterações de dimensões durante a lignificação são compatíveis com as ordens de grandeza das tensões de crescimento medidas por JACOBS (1945) e HALLOCK (1965), nas direções longitudinal e transversal de madeiras de gimnospermas. Como as intensidades médias das tensões de crescimento têm a mesma ordem de grandeza para as angiospermas, BOYD considera que os mesmos resultados são esperados para estas últimas.

Inversamente às deduções acima apresentadas, células com ângulos fibrilares maiores tenderão a alongar-se, originando tensões de compressão. Este fato é observado por JACOBS (1945) em troncos de árvores jovens de gimnospermas, conforme comentado por WATANABE (1965) e CHAFE (1979b). Também nesta situação encontra-se a madeira de compressão (BOYD, 1973a e b; e BOYD, 1974, citado por KUBLER, 1987).

KUBLER (1987) explica a origem das tensões transversais de crescimento de forma similar àquela utilizada para as tensões longitudinais. Por estarem comprimidas (em função da tendência de diminuição de comprimento) as células da periferia tendem a expandir-se diametralmente e, conseqüentemente, puxam os tecidos mais antigos, aumentando os diâmetros destes últimos e reduzindo suas compressões. A parte central do tronco fica então submetida a um aumento progressivo de tração, devido à força cumulativa de arraste exercida por cada nova camada de células. JACOBS (1965) simplesmente explica o fenômeno da seguinte forma: “o estado de compressão das camadas externas tende a aumentar a periferia circunferencial da árvore e, desta forma, impõe uma tensão de tração radial na madeira próxima à medula” (Figura 4).

Segundo CHAFE (1979b), KUBLER (1959a) concorda que o encurtamento da célula é a causa das tensões de crescimento, mas a formação destas tensões ocorre anteriormente à lignificação. Concordando com STOCKMANN (1972), KUBLER (1973a) comenta sobre a existência de uma força inerente de contração agindo longitudinalmente nas fibrilas celulósicas. Em 1987, KUBLER relata sobre a realização de testes comprobatórios da existência de tensões de tração periférica e de compressão interior em diferentes tipos de plantas, incluindo cipós, raízes e galhos, e plantas com tecidos não lignificados. A existência de tensões de crescimento nesta última situação constitui-se, talvez, no mais forte argumento contra a hipótese do “inchamento devido à lignificação celular”, conforme denominação dada por OKUYAMA et al. (1992).

Existem controvérsias quanto à aceitação da hipótese de “inchamento devido à lignificação” em madeira de reação e naquelas provenientes de troncos inclinados, iniciando-se pelas diferentes opiniões quanto ao conteúdo de lignina na madeira de tração (esta com

reconhecida maior magnitude de tensões de tração), conforme tratado por diferentes autores, a maioria dos quais citados por KUBLER (1987), ARCHER & WILSON (1982), BAMBER (1978), BOYD (1973a e b, 1977a e b, 1985b), BOYD & FOSTER (1974), GROZDITS & IFJU (1969), HUGHES (1965), KRAUS (1967), KUBLER (1959a e 1973b), MARIAUX (1981), MARIAUX & VITALIS-BRUN (1983), NICHOLSON et al. (1972), OKUYAMA et al. (1992), TOIT (1964), WARDROP (1956), WARDROP (s.d.), WATANABE (1965), WILSON & ARCHER (1977), etc. Entretanto, a revisão aqui apresentada não pretende discutir este assunto, incluindo tão somente a origem das tensões de crescimento em troncos retos e verticais.

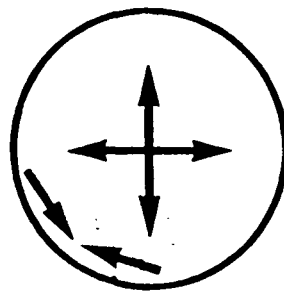


FIGURA 4. SEÇÃO TRANSVERSAL DO TRONCO DE UMA ÁRVORE ILUSTRANDO TENSÕES DE CRESCIMENTO TRANSVERSAIS: AS SETAS INDICAM A DIREÇÃO DE ATUAÇÃO DA TENSÃO DE COMPRESSÃO TANGENCIAL PERIFÉRICA E DA TENSÃO DE TRAÇÃO RADIAL CENTRAL (WILKINS, 1986a).

Partindo do pressuposto envolvendo o baixo conteúdo de lignina da madeira de tração em relação ao da madeira normal, a despeito de seu estado fortemente tracionado, BAMBER (1978) propõe uma nova hipótese de origem das tensões de crescimento, conforme comentado por KUBLER (1987). De acordo com esta nova hipótese, denominada de “tração celulósica” ou de “cristalização celulósica”, estas tensões têm origem na formação das microfibrilas durante o processo de cristalização, o qual, envolvendo fases bem ordenadas e distintamente desordenadas, provocam a contração longitudinal das microfibrilas (STOCKMANN, 1972). A criação de desordem é associada com a expansão transversal, que é a causa da compressão tangencial periférica. ZASADA & ZAHNER (1969) explicam a

compressão devido ao crescimento, quando as células em diferenciação e maturação tendem a empurrar os demais tecidos lenhosos.

BOYD (1985) contesta a hipótese de “tração celulósica”, citando as diversas publicações já mencionadas de sua autoria, bem como as de diversos outros autores: MÜNCH (1938), CLARKE (1939), WATANABE (1965), MEYLAN (1981), TIMELL (1982), WARDROP & DADSWELL (1955), BOYD & FOSTER (1975), etc.

KUBLER (1987) ressalta entre as argumentações de BOYD, apenas a ausência de observações da contração das fibrilas celulósicas, embora STOCKMANN (1972) tenha mencionado esta possibilidade. Suportando ambas as teorias quanto ao fato da existência de alta tração longitudinal associadas com alta compressão tangencial na periferia do tronco, incluem-se os trabalhos de SASAKI et al. (1978), MARIAUX (1981) e MARIAUX & VITALIS-BRUN (1983). A falta de correlação significativa entre o crescimento em comprimento das fibras, quando de suas formações, com as deformações longitudinais contraria ambas.

OKUYAMA & KIKATA (1981) relatam em seus experimentos sobre a interrupção do aumento da tensão longitudinal de crescimento, enquanto a transversal continua aumentando gradualmente, em função das estações do ano. Este desenvolvimento, independente das tensões de crescimento nas duas direções ortogonais, contradiz as evidências até aqui discutidas e aceitas.

OKUYAMA et al. (1992), estudando tensões em madeira de tração de algumas espécies de angiospermas, apresenta diversas conclusões dependentes da existência ou da ausência de fibras gelatinosas, da seguinte forma: a) espécies com fibras gelatinosas na parte superior do tronco inclinado: altas trações de crescimento longitudinais (acima de 700kg/cm^2) em regiões de alta concentração de camadas gelatinosas e alta correlação de tensões com o coeficiente de contração longitudinal, sugerindo a ocorrência de contração longitudinal das microfibrilas; b) espécies sem fibras gelatinosas na parte superior do tronco inclinado: a tensão de crescimento longitudinal não é correlacionada com o conteúdo de lignina ou apresenta apenas uma correlação ligeiramente negativa, sendo que esta tensão aumenta com

o aumento do conteúdo alfa-celulósico, com a cristalinidade e com a diminuição do ângulo microfibrilar. Esta última tendência também é verificada em regiões de madeira normal, inclusive nas gimnospermas; c) a tensão de crescimento na direção tangencial é sempre pequena.

Baseando-se nestas conclusões, OKUYAMA et al. (1992) sugerem a existência de uma contribuição positiva das microfibrilas na geração das tensões de crescimento, ou melhor, estas tensões são produzidas nas microfibrilas durante a maturação das paredes celulares.

Pelo exposto nesta revisão, pode-se concluir que existe concordância quase geral quanto à origem das tensões de crescimento durante a maturação das células nas camadas de crescimento mais recentemente formadas. Estas tensões distribuem-se pelo tronco da árvore de forma cumulativa, em função da deposição de sucessivas camadas e de suas inerentes tensões. Os desacordos existentes são, principalmente, de ordem fisiológica e carecem de novas comprovações para serem elucidados. Tais desacordos não interferem, entretanto, no mecanismo, de geração e distribuição das tensões longitudinal e transversais, apresentado quando da exposição sobre a hipótese de “inchamento devido à lignificação”.

2.2 Medição das tensões de crescimento

Ao contrário da maioria das situações normais de análise de tensões em materiais, onde uma certa carga ou força é aplicada a um corpo sob determinada condição de apoio e a correspondente deformação é medida, no estudo de tensões de crescimento a situação inversa tem que ser adotada para obter-se o valor da tensão residual. É impossível medir diretamente as tensões de crescimento em troncos de árvores contando com os conhecimentos e facilidades disponíveis até o presente.

A tensão residual é referida em função de que o valor da deformação medida pode não refletir a magnitude exata do processo que lhe deu origem, devido às alterações impostas às condições naturais de sua existência, quando de sua determinação.

Como exemplo neste sentido, ARCHER (1986a) cita que as análises conduzidas sobre a redistribuição de tensões residuais, provocadas pela remoção de um disco de madeira do tronco de uma árvore, deixam concluir sobre a ocorrência de significativa modificação na configuração esperada da distribuição, embora não tenha sido observada nenhuma alteração significativa nas dimensões dos diâmetros de discos utilizados em experimentos realizados por BOYD (1950a).

Na ausência de outra alternativa, as tensões de crescimento são invariavelmente determinadas a partir da medição da alteração nos comprimentos de peças de madeira, após a liberação de suas junções a outros elementos vizinhos, dentro de um tronco de uma árvore. Em consequência, os processos de medições utilizados determinam as deformações e não as tensões. Peças de madeira retiradas da periferia do tronco tenderão a diminuir de comprimento em resposta ao seu estado de tração e, inversamente, peças retiradas próximas à medula tenderão a alongar-se em resposta ao estado de compressão anterior.

Efeitos similares ocorrerão na direção transversal com a liberação de forças de tração radial e de tração e compressão tangenciais, através do corte para a obtenção das peças.

Uma vez determinado o encurtamento ou o alongamento de uma peça de madeira em relação ao seu comprimento, quando ainda no interior da árvore, basta multiplicar este valor pelo correspondente módulo de elasticidade determinado na própria peça em que foi medida a alteração de comprimento, ou simplesmente pelo valor médio deste módulo, determinado rotineiramente em laboratório, para a espécie de madeira em questão (KUBLER, 1987; POST et al. 1980; YAO, 1979; NICHOLSON, 1971a e 1973b; NICHOLSON et al., 1975).

A prática comum de utilização do módulo de elasticidade médio na determinação das tensões de crescimento da madeira constitui-se em uma nova aproximação, pois este valor varia transversal e longitudinalmente com a altura da árvore (POST, 1979a). BOYD (1950a) considera o procedimento não satisfatório, particularmente na zona de alta intensidade de compressão, mas KUBLER (1987), ponderando a respeito de que o módulo de elasticidade deveria ser determinado em cada peça de madeira na qual se determinou a deformação de

crescimento, observa ser prática comum quantificar apenas o valor da deformação e não o da tensão que lhe deu origem.

Considerando que as deformações produzidas pelas tensões de crescimento são totalmente recuperadas após a liberação destas, ou seja, que o fenômeno ocorra dentro do limite de elasticidade da madeira, os cálculos matemáticos necessários são resolvidos pela Lei de HOOKE, que estabelece a proporcionalidade entre a deformação e a tensão (KOLLMANN & CÔTÉ, 1968):

$$\varepsilon = \alpha \times \sigma$$

$$\alpha = \frac{1}{E}$$

$$\sigma = \varepsilon E$$

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$$

onde,

ε = deformação relativa;

α = constante de proporcionalidade;

σ = tensão;

E = módulo de elasticidade (MOE) na compressão ou tração paralela às fibras, conforme o caso;

l = comprimento deformado ou final; e

l_0 = comprimento não tensionado ou inicial.

Embora o limite de elasticidade na compressão paralela às fibras da madeira seja consideravelmente menor do que na tração paralela, os seus módulos de elasticidade são aproximadamente iguais, assim como também o são ao da flexão estática. Valores médios podem ser obtidos baseando-se na constante de proporcionalidade (α) do material (KOLLMANN & CÔTÉ, 1968):

$$\alpha_m = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$$

$$E_m = \frac{1}{\alpha_m} = \frac{2}{\alpha_1 + \alpha_2} = \frac{2 E_1 E_2}{E_1 + E_2}$$

onde, o sufixo “m” indica o valor médio obtido entre os valores de sufixos 1 e 2.

Nos estudos dos efeitos das tensões de crescimento, nas direções transversais e longitudinal da madeira, a Razão de Poisson (μ) é freqüentemente utilizada. Esta razão é expressa, por definição, como o quociente obtido pela divisão da deformação ocorrente em uma direção normal à aplicação da força pela deformação nesta direção (BODIG & JAYNE, 1982):

$$\mu_{l,r} = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_l}$$

$$\mu_{r,l} = \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_r}$$

$$\mu_{l,t} = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l}$$

$$\mu_{t,l} = \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_t}$$

$$\mu_{t,r} = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_t}$$

$$\mu_{r,t} = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_r}$$

onde, os sufixos “l”, “r” e “t” indicam as direções longitudinal, radial e tangencial, respectivamente.

As deformações de crescimento expressas como deformações específicas ou relativas, ou seja, como uma proporção entre a alteração de comprimento de uma peça de madeira em relação ao seu comprimento não tensionado, são grandezas bastante pequenas. Constitui regra comum entre os autores consultados expressá-las como microdeformações ($\mu\varepsilon$), onde $1 \mu\varepsilon = 10^{-6} m/m$ (KUBLER, 1987).

2.2.1 Deformações de crescimento longitudinais

2.2.1.1 Deformações periféricas no tronco de uma árvore

As deformações de crescimento longitudinais periféricas referem-se tão-somente à madeira mais recentemente formada. Os métodos utilizados para suas avaliações são relativamente simples, de execuções rápidas, somente destrutivos localmente e podem ser utilizados na própria árvore (ARCHER, 1986a).

NICHOLSON (1971a) lista como aplicações técnicas dos resultados a possibilidade de examinar detalhadamente as tensões circunferenciais ao longo do comprimento de toras e árvores. Possibilita também a comparação entre árvores e o acompanhamento de alterações que possam ocorrer em tratamentos para redução e para seleção daquelas com baixas tensões, com fins a estudos genéticos e de utilização em experimentos de propagação vegetativa.

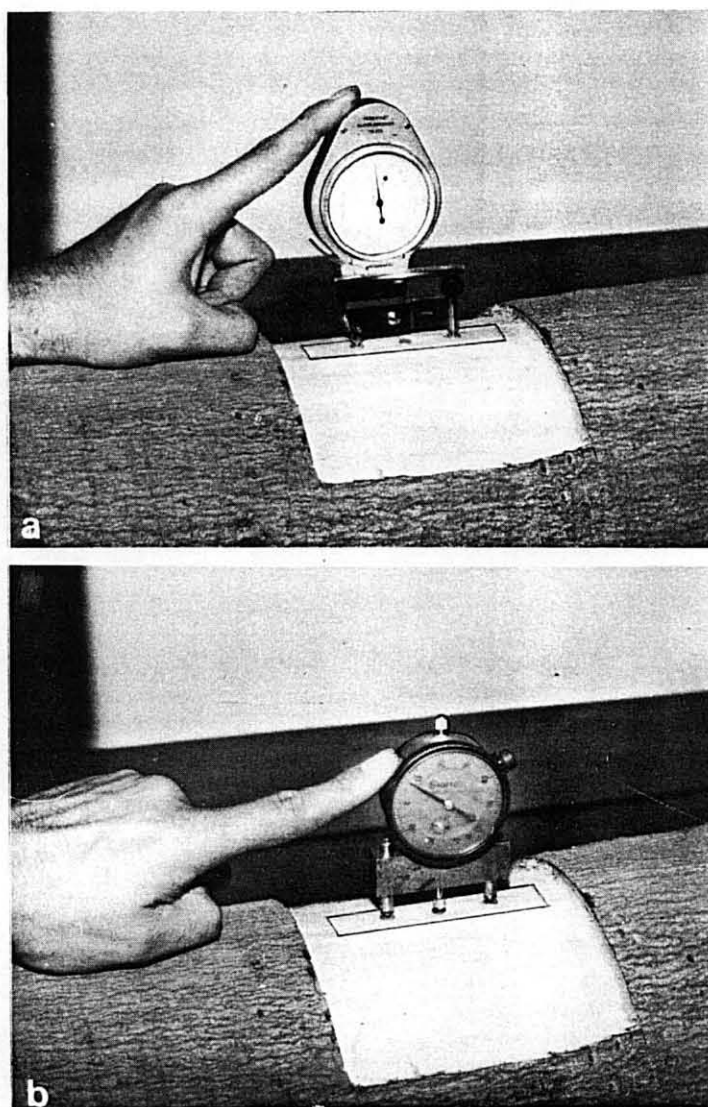


FIGURA 5. MÉTODO DE NICHOLSON (1971a) PARA DETERMINAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS PERIFÉRICAS. a. DISTÂNCIA ENTRE PONTOS DE MEDIÇÃO FIXADOS NO TRONCO. b. DETERMINAÇÃO DA POSIÇÃO DO PONTO CENTRAL UTILIZADO POSTERIORMENTE PARA CORREÇÃO DE CURVATURAS E ALINHAMENTOS (ATHERTON, 1978 E APRESENTADA POR ARCHER, 1986a).

Um dos métodos mais amplamente utilizados, especialmente na Austrália, é devido a este último autor (ARCHER, 1986a).

O método de NICHOLSON consiste na fixação de dois pontos de medição na periferia do tronco, após a retirada da casca, para apoio das hastes de contacto de um extensômetro mecânico, conforme ilustrado na Figura 5. Para extensômetros com precisão aproximada de 0,001mm, um intervalo padrão de 50mm entre os pontos de medição é considerado satisfatório.

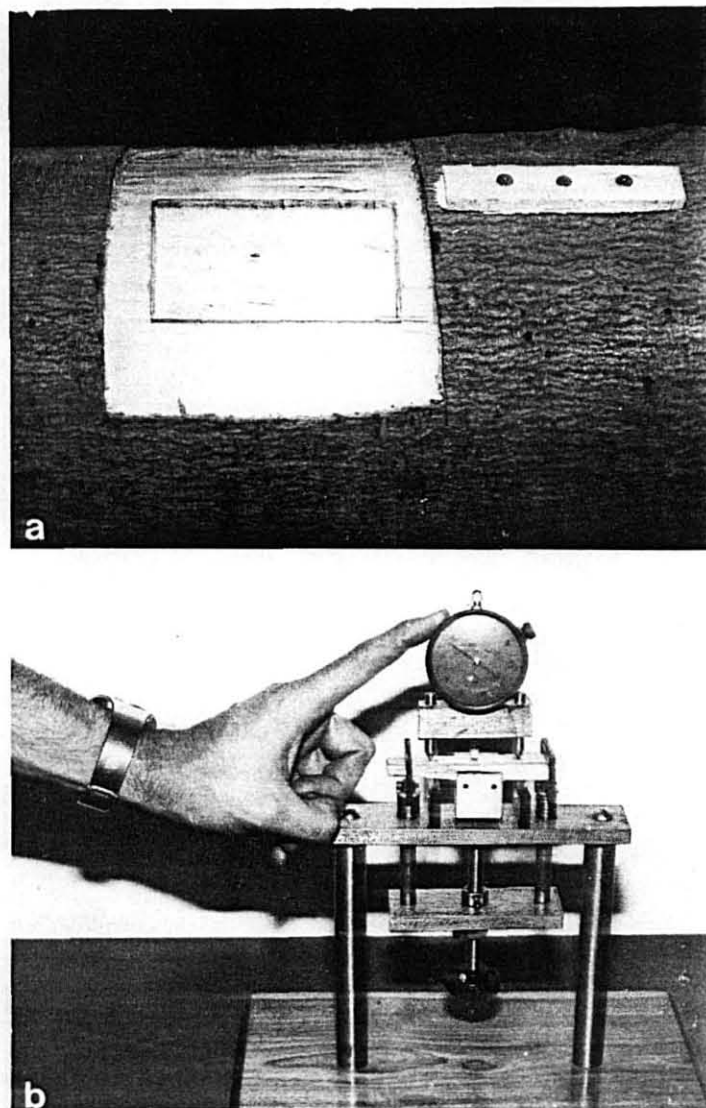


FIGURA 6. MÉTODO DE NICHOLSON (1971a) PARA DETERMINAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS PERIFÉRICAS. a. AMOSTRA DE MADEIRA REMOVIDA DO TRONCO. b. RESTABELECIMENTO DA POSIÇÃO ORIGINAL DA PEÇA DE MADEIRA ATRAVÉS DO PONTO CENTRAL (FIGURA 5b) E DETERMINAÇÃO DO SEU COMPRIMENTO (ATHERTON, 1978 E APRESENTADA POR ARCHER, 1986a).

A deformação de crescimento é determinada pela diferença da distância entre os dois pontos, quando no tronco da árvore (Figura 5a) e quando em uma peça de madeira retirada, contendo os mesmos (Figura 6a e b).

Um terceiro ponto, fixado como os anteriores e situado no mesmo alinhamento e no meio da distância entre eles, é necessário para corrigir as curvaturas da peça e eventuais desalinhamentos dos dois primeiros pontos nela fixados, em consequência da liberação de tensões devido ao corte para sua retirada do tronco (Figuras 5b e 6b).

Esta peça, com dimensões aproximadas de 9,5mm de espessura, 19mm de largura e 89mm de comprimento, é obtida simplesmente com o auxílio de uma faca e um formão.

Os locais de cada experimento devem situar-se a uma distância de três diâmetros de qualquer outro corte, a fim de prevenir a influência mútua de liberações de tensões.

Muitos outros experimentos foram conduzidos adotando o método de NICHOLSON (1971a), podendo ser citados: NICHOLSON (1973a e b), NICHOLSON et al. (1973 e 1975), YAO (1979) e CHAFE (1981 e 1985).

OKUYAMA & SASAKI (1979) estudando a influência de tensões de crescimento longitudinais em toras de madeira encurvadas, não consideraram satisfatório o método de liberação de tensões testado, incluindo apenas a incisão de cortes longitudinais de 3 e 7cm de profundidade ao longo de seus 2m de comprimento. As deformações longitudinais periféricas foram então medidas através da liberação de tensões devido a cortes transversais, sendo registradas por extensômetros colados à periferia do tronco.

Utilizando extensômetros colados em seções de medição de 6x6cm, OKUYAMA et al. (1981) descrevem superficialmente um método de medição que possibilita a determinação das deformações de crescimento nas direções longitudinal e transversal das camadas mais exteriores da madeira, incluindo a parte interior da casca, as fibras gelatinosas do câmbio e as camadas internas ao anel de crescimento. A liberação de tensões é obtida quando cortes realizados com um serrote alcançam a profundidade correspondente a cada camada. A remoção subsequente de cada uma delas, com o auxílio de um formão de mão, possibilita a medição na próxima camada.

Procedimento similar é utilizado por OKUYAMA & KIKATA (1981) em estudos de processos gerativos de tensões residuais. OKUYAMA et al. (1983) também utilizam cortes em volta de extensômetros fixados na periferia, para investigar correlações com madeira de reação.

Deformações longitudinais periféricas são determinadas através da liberação de tensões proporcionada por dois orifícios perfurados acima e abaixo de extensômetros de medição fixados no tronco de uma árvore (Figura 7), conforme descrito por GUÉNEAU (1973), GUÉNEAU & KIKATA (1973), GUÉNEAU & CHARDIN (1973), KIKATA (1974c), GUÉNEAU & SAURAT (1974), TRENARD & GUÉNEAU (1975), SAURAT & GUÉNEAU (1976), KIKATA & MIWA (1977) e por MALAN (1984), sendo alguns destes autores citados por KUBLER (1987).

GUÉNEAU (1973), citado por ARCHER (1986a), investiga até que ponto é possível assumir que a perfuração de dois orifícios fornece uma estimativa da total liberação das deformações próximas a eles, em comparação com o procedimento de remoção completa da peça de madeira (NICHOLSON, 1971), concluindo pela ocorrência de uma subestimação dos resultados em aproximadamente 15%. Conseqüentemente, este método é apenas indicado para trabalhos de campo, onde se deseja obter a intensidade média das deformações de crescimento, sua distribuição periférica e sua variação entre árvores e espécies.

SASAKI et al. (1978) utilizam a perfuração de orifícios abaixo, acima, à direita e à esquerda de um extensômetro preso à superfície do xilema para liberar as tensões nas direções longitudinal e tangencial.

ARCHER (1986a) comenta que o método clássico de medição de tensões residuais em materiais elásticos utiliza a medida de deformações obtida próxima a apenas um orifício (SACHS, 1927; METHAR, 1934 e RENDLER & VIGNESS, 1966), sendo comumente utilizado em materiais isotrópicos como no aço. Para materiais ortotrópicos, a recuperação de tensões residuais a partir de deformações superficiais é mais complicada (BERT & THOMPSON, 1968; LAKE et al., 1970).

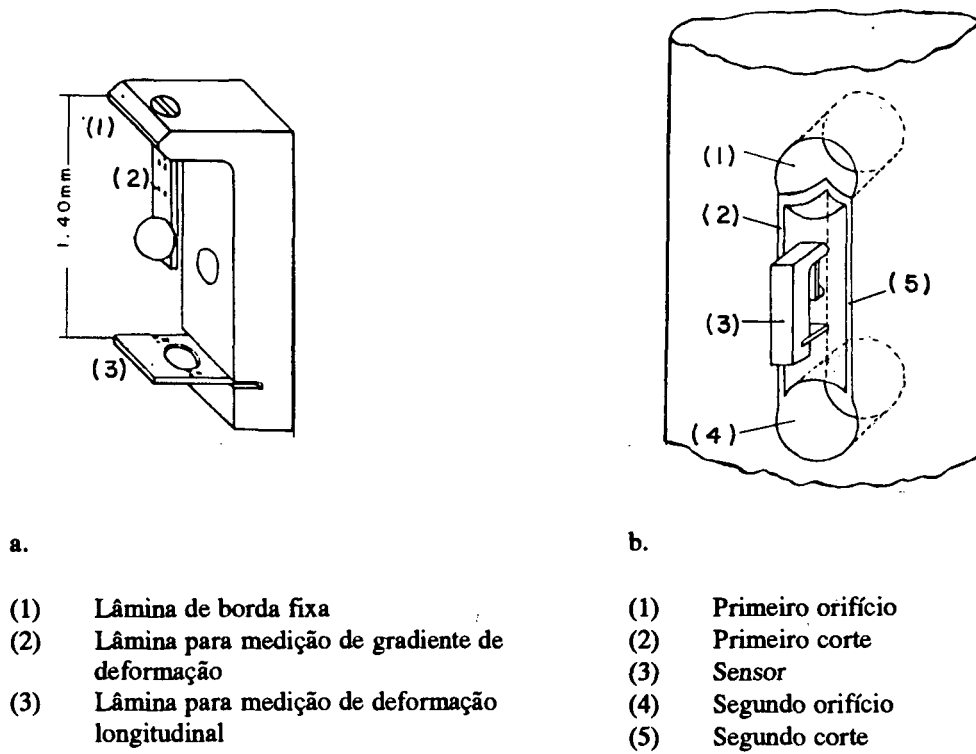


FIGURA 7. a. EXTENSÔMETRO PARA DETERMINAÇÃO DE DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS PERIFÉRICAS. b. SEQÜÊNCIA DE PERFURAÇÕES E CORTES PARA LIBERAR AS TENSÕES (SAURAT & GUÉNEAU, 1976).

Um exemplo da aplicação do método é apresentado por ARCHER (1978 e 1986b), conforme ilustrado na Figura 8.

Uma quantidade suficiente de casca é removida para permitir a marcação dos pontos AA', BB', CC' e DD' em volta de um círculo de 50mm de diâmetro. A distância entre estes pontos é medida com um extensômetro, de precisão igual a 0,001mm, antes e após a perfuração de um orifício concêntrico de aproximadamente 20 a 25mm de profundidade, quando os pontos deslocam-se para a nova posição ilustrada na Figura 8 e a alteração de dimensões é registrada. Cálculos apresentados por ARCHER (1986a) ilustram haver novamente diferenças entre os resultados obtidos comparados aos de NICHOLSON (1971).

Também MARIAUX (1981) e MARIAUX & VITALIS-BRUN (1983), citados por KUBLER (1987), utilizam o método de orifício central a um grupo de pontos de medição.

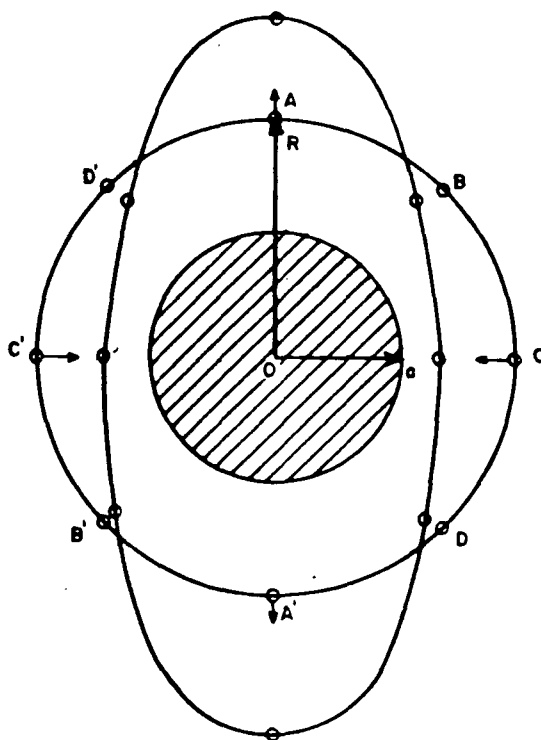


FIGURA 8. MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO PERIFÉRICAS NAS DIREÇÕES LONGITUDINAL E TANGENCIAL, ATRAVÉS DA PERFURAÇÃO DE APENAS UM ORIFÍCIO (ARCHER 1986a).

FERRAND (1982b) reporta sobre a fabricação e teste de um extensômetro que permite a medição simultânea de deformações de crescimento periféricas em duas direções perpendiculares com uma precisão de $5\mu\epsilon$, tendo como vantagem dispensar a utilização de cola para sua fixação na madeira.

Também o Departamento do Centro de Cooperação Internacional em Pesquisas Agronômicas para o Desenvolvimento - CIRAD, pertencente ao "Centre Technique Forestier Tropical", França, comercializa um extensômetro com a mesma finalidade (Figura 9), o qual CHARDIN & SALES (1984) referem ter sido por eles desenvolvido para medição do comprimento de deformação nas direções tangencial e longitudinal.

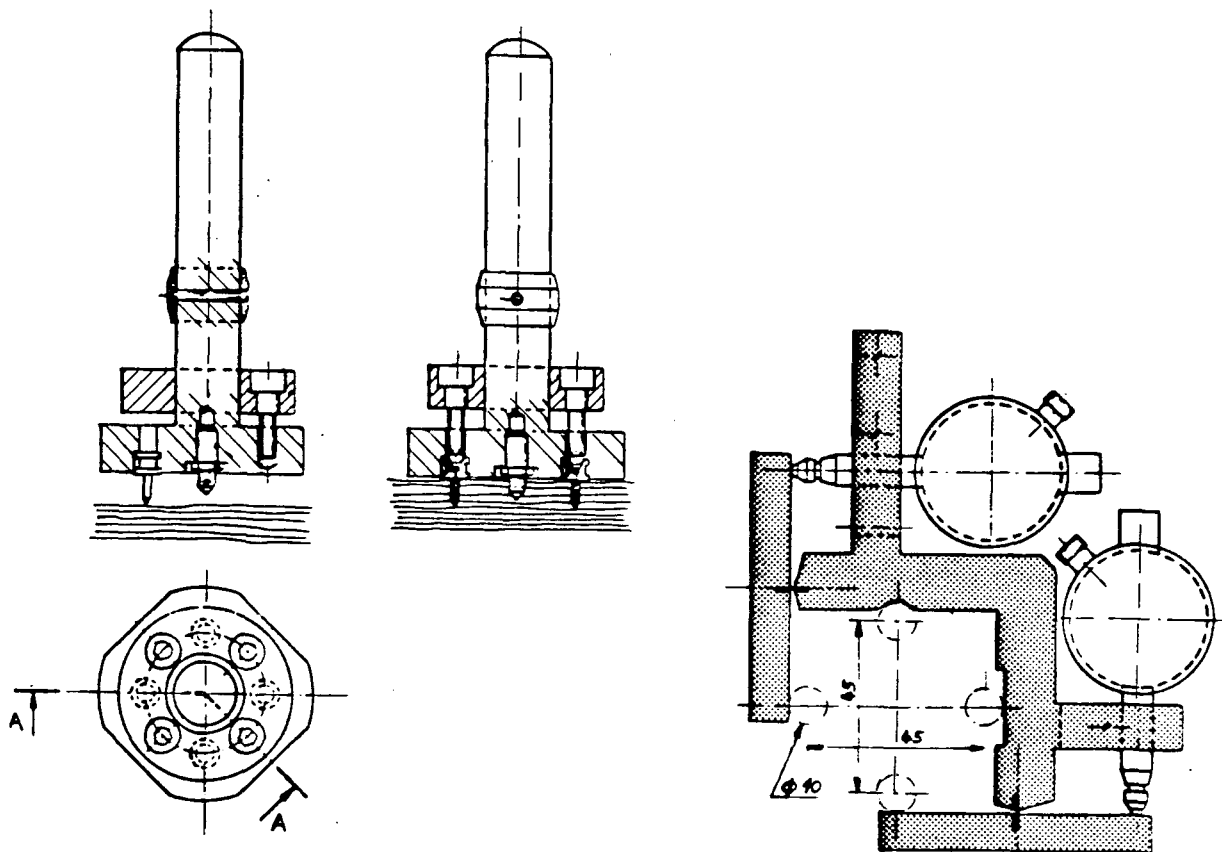


FIGURA 9. EXTENSÔMETRO PARA MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO PERIFÉRICAS NAS DIREÇÕES LONGITUDINAL E TANGENCIAL, COMERCIALIZADO PELO "CENTRE TECHNIQUE FORESTIER TROPICAL", FRANÇA (CATÁLOGO PROMOCIONAL).

2.2.1.2 Deformações interiores ao tronco de uma árvore

O conhecimento das deformações de crescimento periféricas é de importância para várias aplicações práticas. Entretanto, não informa sobre a magnitude e a distribuição radial das tensões longitudinais no interior do tronco de uma árvore. Estas últimas, não deixando de contribuir com as aplicações do primeiro, são de imprescindível importância na busca do

melhor processamento da madeira (minimizando perdas de material e danos a equipamentos e operadores), desde o abate da árvore até a utilização final da matéria-prima.

2.2.1.2.1 Método da prancha diametral

O primeiro estudo sistemático sobre a medição e distribuição de deformações de crescimento longitudinais no interior do tronco de uma árvore foi conduzido por JACOBS (1938, 1939, 1945, 1954 e 1965).

O método desenvolvido, conhecido como “método da prancha diametral”, é descrito detalhadamente em suas publicações, especialmente em 1938, 1939 e 1945. Consiste na remoção da madeira da parte central de uma tora até a obtenção de uma prancha diametral contendo a medula, com comprimento aproximado de 2,5m, espessura de 5,0 a 7,5cm e de largura igual ao diâmetro da tora. Nos extremos desta prancha é deixada uma porção do tronco de 0,3 a 0,9m de comprimento, com fins a prevenir contra a ocorrência de defeitos, principalmente de rachas (Figura 10).

Próximo aos dois extremos da prancha diametral são fixados pontos de contacto (pinos, pregos ou parafusos, em função do comprimento da peça e do micrômetro a ser utilizado), que definem o comprimento referencial de determinação das deformações (Figuras 10 e 11a). Os sarrafos longitudinais, contendo cada um o correspondente par de pontos de contacto, são serrados a seguir (Figura 11b), tomando o devido cuidado de alternância em relação à medula e de, somente em último lugar, eliminar a porção do tronco deixada nos extremos (Figura 10).

A espessura de cada sarrafo é pequena e varia com a inclinação da grã. Também todas as dimensões compiladas acima, a título de exemplo, podem variar em função do diâmetro da árvore.

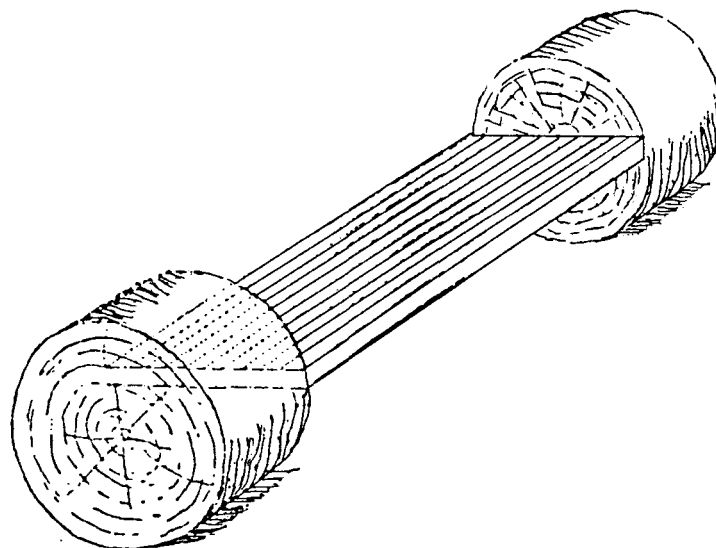


FIGURA 10. PRANCHA DIAMETRAL UTILIZADA NA DETERMINAÇÃO DE DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS, CONFORME MÉTODO DE JACOBS(1938) (CLARKE, 1939 e KUBLER, 1987).

É interessante observar que a curvatura dos sarrafos, ilustrada na Figura 11b, comprova o estado de tração das camadas exteriores que contraem e o de compressão das interiores que se alongam, em função do relaxamento de tensões.

JACOBS utiliza dois procedimentos para determinação das deformações de crescimento. Um deles, mais comumente adotado, envolve a diferença entre os comprimentos de cada sarrafo quando presos na prancha e quando isolados dela, mas forçados em suas posições retilíneas originais (Figura 10c). Este procedimento é considerado mais efetivo pelo próprio JACOBS (1945).

O outro procedimento utiliza a flecha central devido à flexão do sarrafo (Figura 11d), em fórmula derivada por JACOBS (1938):

$$\Delta l = \frac{8d}{l^2}$$

onde,

Δl = contração unitária das camadas interiores da madeira, provocada pela remoção de camadas (sarrafos) exteriores;

d = flecha central; e

l = comprimento do sarrafo quando na prancha.

Esta última forma é extremamente conveniente para utilização na própria floresta, onde os equipamentos disponíveis são limitados. Entretanto, a análise dos dados obtidos não ilustram a magnitude da tração que ocorre nas camadas exteriores (JACOBS, 1938).

Finalmente, as deformações determinadas para cada sarrafo são representadas graficamente em função das suas localizações radiais, obtendo a distribuição das deformações de crescimento longitudinais ao longo do diâmetro da árvore.

A enorme contribuição prestada por JACOBS para o entendimento das tensões de crescimento é reconhecida em todas as publicações relevantes consultadas. Entretanto, o método proposto apresenta importantes problemas e/ou dificuldades, as quais são analisadas a seguir.

GILLIS (1973) e VENDHAN & ARCHER (1977) predizem, através de modelos teóricos, um alongamento da tora diametral devido ao seu corte. BECK (1974), citado por POST (1979a) e POST et al. (1980), apresenta conclusões semelhantes. Estas análises mostram que a remoção de uma prancha diametral de uma tora é estatisticamente equivalente à aplicação de uma força e/ou momento a cada extremidade da prancha, de forma a cancelar a força existente quando dentro da árvore. Assim, além do efeito local de equilíbrio que ocorre no topo (Figura 12), um aumento uniforme do comprimento da prancha ocorrerá. Em consequência, os experimentos que se iniciam com pranchas diametraes terão, como resultado, deformações de tração de magnitude maiores na periferia e de compressão menores próximo à medula, em comparação com aquelas realmente existentes. ARCHER (1986a), em sua revisão bibliográfica, volta a chamar a atenção para este fato, já comprovado pelo experimento de POST (1979a) e já discutido no item 2.3.1.1.

O próprio JACOBS (1945) reconhece a possível influência em seus resultados da existência na prancha de uma maior proporção de madeira juvenil (tensões de compressão) do que de madeira adulta (tensões de tração), quando em comparação com a situação existente dentro da árvore. Como consequência o efeito descrito no parágrafo acima pode ser verificado.

Existe um “efeito de topo” que pode ser potencialmente sério em experimentos

iniciados diretamente com pranchas. Quando um tronco de uma árvore é cortado transversalmente, quer seja para a derruba ou para a obtenção de toras, as tensões na nova superfície (topo) igualam-se a zero e suas magnitudes, ao longo de um determinado comprimento longitudinal, são reduzidas em função do relaxamento das tensões inicialmente existentes.

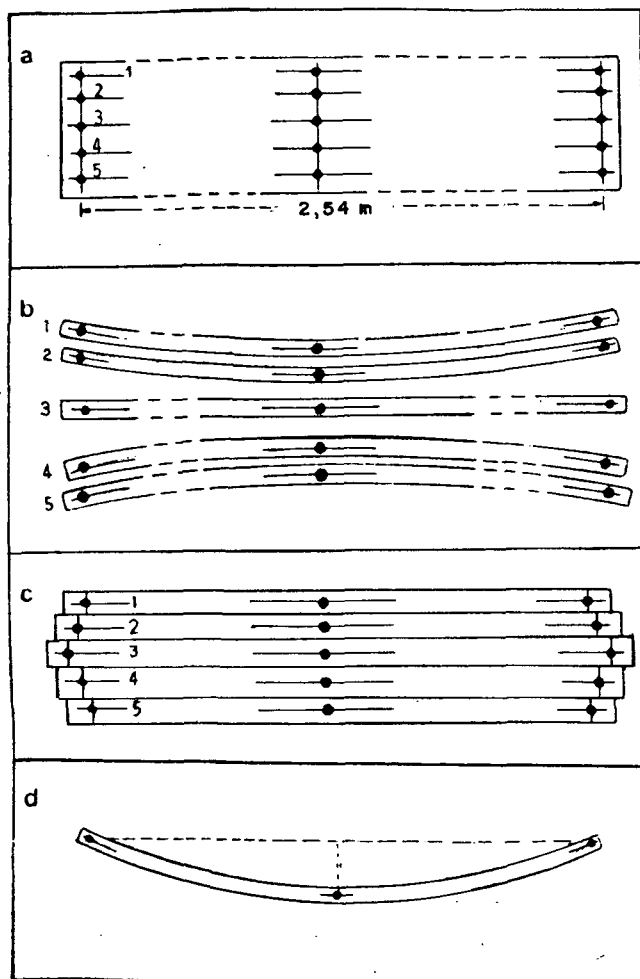


FIGURA 11. MÉTODO DE JACOBS (1938) PARA DETERMINAÇÃO DE DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS EM UMA PRANCHA DIAMETRAL. a. PONTOS DE MEDIÇÃO FIXADOS NA PRANCHA. b. CURVATURA DOS SARRAFOS APÓS O CORTE, DEVIDO A GRADIENTES DE TENSÕES EXISTENTES. c. SARRAFOS ALINHADOS PARA MEDIÇÃO. d. MEDIÇÃO DA FLECHA CENTRAL (JACOBS, 1945).

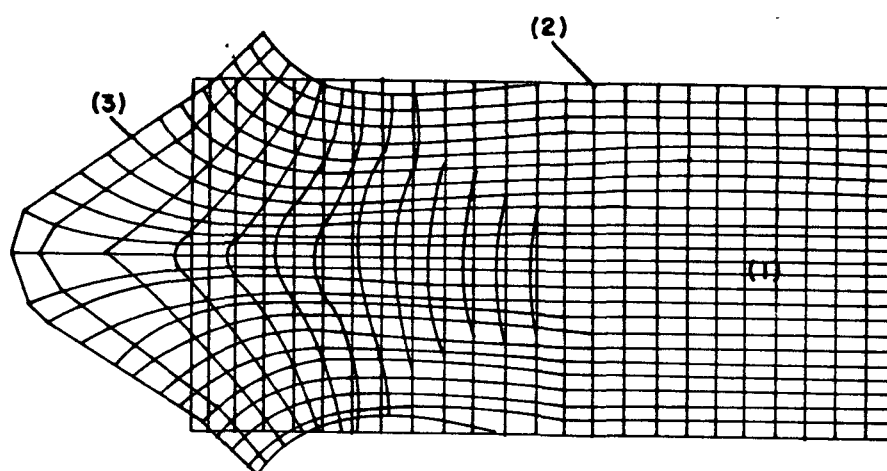
BOYD (1950b) reafirma suas próprias determinações (1950a), segundo as quais não ocorrem significantes influências a partir de uma distância igual a 0,90m do topo transversal.

WILHELMY & KUBLER (1973a e b) concordam que no novo plano de corte

transversal as tensões de crescimento são completamente liberadas, estendendo seus efeitos sobre uma distância de aproximadamente 1,3 a 2,3 vezes o diâmetro da tora, valores estes confirmados por SCWACZYNA (1978), citado por KUBLER (1987).

Entretanto, diversos autores como CHARDIN & SALES (1983a e b e 1984), baseados em WILHELMY & KUBLER, adotam ser a influência quase desprezível a uma distância do topo igual a três vezes o diâmetro em questão.

Durante o relaxamento das tensões, o centro da madeira expande (devido à liberação de tensões de compressão) enquanto a periferia contrai (devido a liberação de tensões de tração), de tal forma que o topo da tora assume uma forma abaulada (Figura 12).



- (1) Medula
- (2) Superfície longitudinal
- (3) Topo ou seção transversal de corte

FIGURA 12. ALTERAÇÕES DE DIMENSÕES E FORMA NO TOPO DE UMA TORA, DEVIDO AO CORTE TRANSVERSAL - MAGNIFICADA DE 400 VEZES (WILHELMY & KUBLER, 1973a).

BYRNES & ARCHER (1977) e VENDHAN & ARCHER (1977 e 1978) confirmam a influência do “efeito de topo” através de análises teóricas suportadas por resultados experimentais. POST (1979a) conclui que a influência pode ser reduzida locando-se os pontos de medição a uma distância igual a três diâmetros do topo da prancha.

De qualquer forma, a porção de tora deixada por JACOBS em cada topo da prancha diametral contribui para a diminuição do efeito discutido.

Um terceiro problema levantado por POST (1979a) refere-se à possibilidade de obtenção de apenas uma prancha diametral por tora, o que é inconseqüente no caso de árvores radialmente simétricas. Para as árvores assimétricas, comumente encontradas, é necessário o conhecimento da distribuição de tensões em mais de um plano através da medula, situação em que apenas uma prancha diametral não é suficiente.

A despeito das dificuldades existentes, o método proposto por JACOBS tem sido discutido e/ou utilizado pela maioria dos pesquisadores que dedicam alguma atenção às tensões de crescimento, devido à riqueza de detalhes incluídos. Em particular, CURRÓ & CIVIDINI (1961) utilizam o mesmo método de medição de flechas para estudo de derruba e transformação de árvores em dormentes de estradas de ferro. GIORDANO & GHISI (1980) e GIORDANO et al. (1969) utilizam-no nos estudos da influência do cintamento de árvores quando da derruba e GIORDANO & CURRÓ (1972 e 1973) com fins ao conhecimento e considerações sobre a eliminação de tensões quando do desdobro. WATANABE (1965), citado por POST et al. (1980), também faz uso das técnicas apresentadas por JACOBS.

HALLOCK (1966), utilizando o procedimento de medição da flecha no ponto central, não encontra significativa correlação entre as deformações de crescimento (flecha medida na madeira verde) e os empenamentos de montantes secos obtidos segundo diferentes diagramas de corte. As relativas grandes seções transversais dos montantes (aproximadamente 5,0x10,0cm) não permitem a visualização interna da distribuição das tensões, objetivo desta tese.

KIKATA (1972), citado por KUBLER (1987), adapta o método de JACOBS para determinação de tensões em árvores em pé. A prancha diametral obtida e dois montantes periféricos são preservados para sustentação da árvore (Figura 13), bem como de sua copa. Extensômetros de alta precisão, colados aos pares nas faces opostas da prancha diametral, permitem a utilização de comprimentos longitudinais de medição menores, bem como

correções da influência do efeito de flexão da árvore provocado pela ação do vento em sua copa. Para obtenção das medições finais, a árvore é derrubada e a prancha cortada.

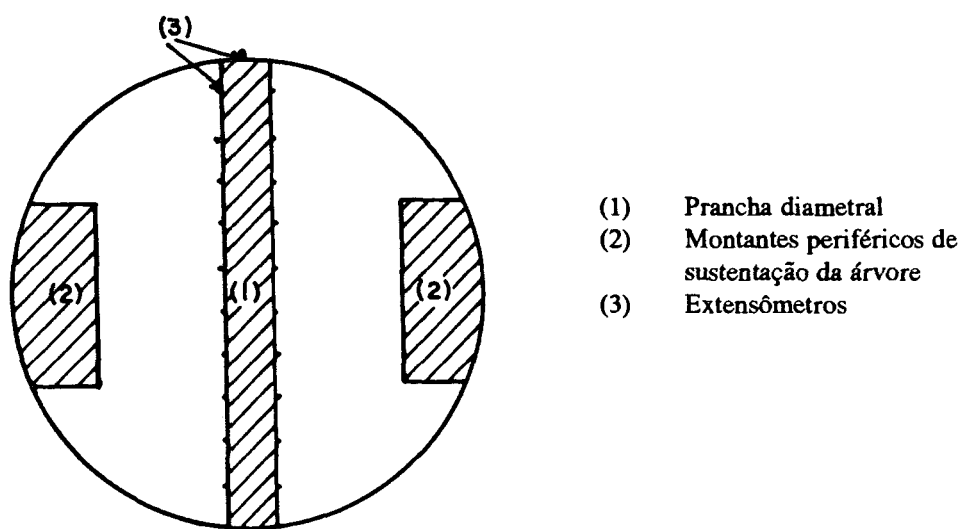


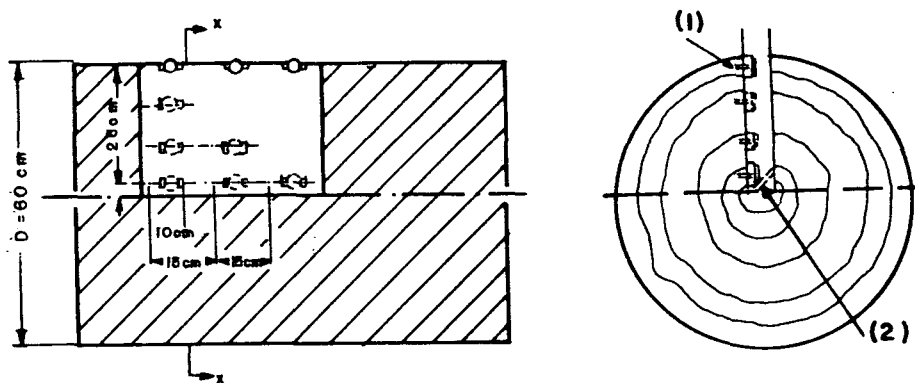
FIGURA 13. MÉTODO DE KIKATA (1972) PARA DETERMINAÇÃO DE DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS EM ÁRVORES EM PÉ (KUBLER, 1987).

O método de JACOBS (1945) tem sido investigado teoricamente por GILLIS (1973), VENDHAN & ARCHER (1977) e GILLIS & HSU (1979). Estes últimos apresentam modelos matemáticos bem ajustados aos resultados obtidos por GIORDANO et al. (1969). ARCHER (1986a) discute os principais aspectos teóricos e matemáticos envolvidos nas medições de tensões de crescimento através do “método da prancha diametral”.

2.2.1.2.2 Métodos de perfurações de orifícios

Considerando as possíveis dificuldades para interpretação de resultados em experimentos conduzidos de acordo com o método de JACOBS e interessado nos estudos dos efeitos de cortes transversais na derruba de árvores e na obtenção de toras, BOYD (1950a) planejou novo método de determinação de deformações longitudinais.

Por este método, uma abertura (aproximadamente 6,4cm de largura e 0,46m de comprimento) com lados paralelos é perfurada no meio do comprimento da tora e a partir da casca até alcançar a medula. Nas paredes laterais radiais são fixados pontos de medição aos pares, alinhados entre si e paralelos ao eixo longitudinal da tora (Figura 14). Após a leitura inicial (extensômetros com precisão de $2,5 \times 10^{-3}$ mm) da distância entre cada par de pontos, paralelamente ao eixo longitudinal da árvore (distância esta de referência e com magnitudes aproximadas de 0,01m), prossegue-se com o acompanhamento da variação desta distância, quando a tora é sucessivamente cortada em sentido transversal a partir de cada topo e em direção cada vez mais próxima da abertura. Este procedimento permite a obtenção das deformações longitudinais (diferença entre a distância inicial e cada nova medida) a várias distâncias dos recém-cortados novos topos. Finalmente, amostras contendo pares de pontos de medição são isoladas da remanescente seção da tora e as medidas tomadas, nas correspondentes distâncias radiais, consideradas como no estado de total liberação de tensões.



a.

b.

- (1) Pinos de medição
 (2) Espelho de leitura

FIGURA 14. MÉTODO DE BOYD (1950a) PARA DETERMINAÇÃO DE DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS, ATRAVÉS DE ABERTURA PERFURADA NO TRONCO DE UMA ÁRVORE. a. CORTE LONGITUDINAL ILUSTRANDO O SISTEMA DE MEDIÇÃO. b. CORTE TRANSVERSAL MOSTRANDO OS PINOS DE MEDIÇÃO E UM ESPELHO DE AUXÍLIO ÀS LEITURAS.

Em adição ao experimento descrito, amostras retiradas próximas ao local de medição das deformações são testadas em compressão paralela às fibras para obtenção de correspondentes tensões de crescimento e representação gráfica de suas distribuições radiais.

É a partir deste experimento que BOYD conclui pela não influência de cortes transversais (“efeito de topo”) a distâncias superiores a 0,90m, conforme discutido anteriormente.

O experimento de BOYD confirma aproximadamente a ordem de magnitude das tensões de tração determinadas por JACOBS (80kg/cm^2) próximo à casca e, próximo à medula, seus valores (140 a 214kg/cm^2), sendo inferiores aos de JACOBS (770kg/cm^2), têm diferença atribuída a possíveis efeitos inelásticos, conforme também comentado por ARCHER (1986a).

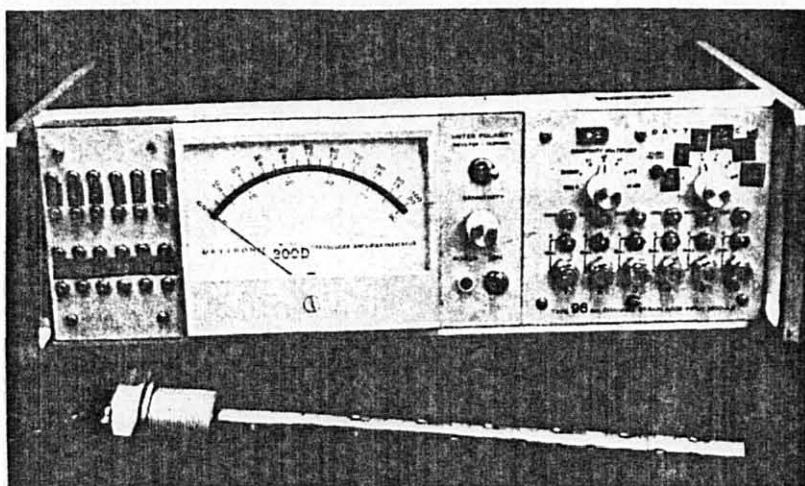
KUBLER (1959b) e WILHELMY & KUBLER (1973a e b) propõem um método de medição de deformações de crescimento similar ao de BOYD (1950a).

O experimento de KUBLER (1959b), descrito por este mesmo autor em 1987, avalia a distribuição radial de deformações longitudinais através da perfuração de orifícios de 36mm de largura, a partir da superfície da casca até ultrapassar a medula. As deformações são obtidas através de diferenças entre medições dos diâmetros do orifício, realizadas com uma sonda, à medida que sucessivas porções de ambos os topos da tora são eliminados por cortes transversais, similarmente ao método de BOYD. Como a liberação de tensões devido à perfuração dos orifícios alteram os seus diâmetros, anteriormente à execução dos cortes transversais previstos, os resultados obtidos são considerados apenas como tendo valores aproximados indicativos das deformações.

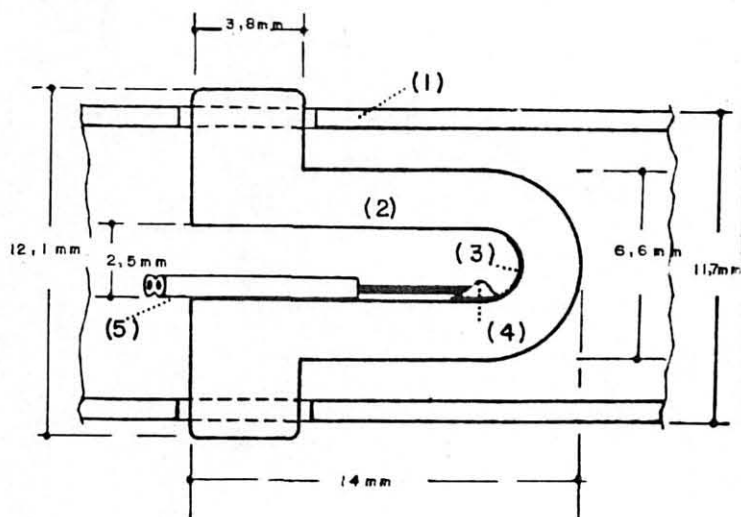
WILHELMY & KUBLER (1973b) apresentam detalhada descrição de seus métodos, aos quais denominam “sonda para medição de deformações no interior de corpos sólidos”.

Em relação ao procedimento descrito acima (KUBLER, 1959b), um orifício bem mais fino é perfurado radialmente (12mm de largura) e seu diâmetro medido a diferentes profundidades, tanto inicialmente quanto após cada corte transversal da tora.

A sonda de medição tem um diâmetro externo de aproximadamente 11,4mm, contendo 12 extensômetros em forma de grampos (Figura 15a), os quais tocando levemente na superfície interior do orifício perfurado no tronco, acusam as alterações de suas dimensões. Sendo posicionados perpendicularmente uns aos outros, os extensômetros permitem medidas simultâneas nas direções longitudinal e tangencial às camadas de crescimento circulares. Finalmente, os sinais elétricos emitidos pelos extensômetros são medidos por um amplificador (Figura 15a).



a.



b.

- (1) Tubo de metal
- (2) Grampo de alumínio (2,5 mm)
- (3) Extensômetro
- (4) Junta de solda
- (5) Fios condutores

FIGURA 15. MÉTODO DE WILHELMY & KUBLER (1973b) PARA DETERMINAÇÃO DE DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS E TANGENCIAIS, DENOMINADO "SONDA PARA MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÕES NO INTERIOR DE CORPOS SÓLIDOS". a. SONDA E AMPLIFICADOR. b. SEÇÃO TRANSVERSAL DO EXTENSÔMETRO DE ACOPLAMENTO À SONDA.

KUBLER (1987) observa que, aparentemente, a liberação de tensões devido à perfuração do orifício afeta somente uma pequena área, de tal forma que apenas são registrados pelos extensômetros os efeitos das liberações de tensões devido aos cortes transversais.

POST (1979a) e POST et al. (1980) consideram que todos os métodos que envolvam o corte ou a perfuração de orifícios na tora (cortes estes usualmente utilizados para colocação de instrumentos de medição) introduzem tensões descontínuas sobre a madeira na vizinhança do orifício. A liberação de tensões devido à perfuração do próprio orifício e mesmo devido ao processo de cortes transversais, cada vez mais próximos, tem efeitos variados nos diferentes pontos radiais da parede do orifício, utilizados para medição das deformações.

2.2.1.2.3 Métodos de remoções de finas camadas

JACOBS em 1945, considerando que o crescimento de uma árvore ocorre através da deposição de sucessivas camadas de madeira, pondera que o melhor método para investigar o efeito desta forma de crescimento deveria ser através da remoção das camadas, uma a uma e tanto a partir do interior quanto do exterior do tronco, medindo-se a seguir o efeito provocado na madeira remanescente. Embora reportando haver experimentado este método com sucesso, através do volteamento ou da perfuração de toras em torno mecânico, JACOBS considera-o inadequado quanto à obtenção de dados suficientes para análises estatísticas. Primeiramente, os anéis de crescimento não sendo realmente concêntricos e nem a medula perfeitamente centrada implicam na impossibilidade de remoção de sucessivas camadas, da mesma forma que elas foram formadas, simplesmente com o auxílio de um torno. Em segundo lugar, a operação com o torno é limitada a pequenos comprimentos. Por último, o demorado processo de torneamento ou perfuração e medições pode propiciar a secagem superficial da madeira, influenciando nos resultados obtidos.

Argumentando, entretanto, da necessidade de utilização de um método que reflita,

com a devida clareza, a interpretação física do processo de criação das tensões de crescimento, podendo simultaneamente fornecer as medições nas três direções da árvore, OKUYAMA & KIKATA (1975b e c), OKUYAMA & SASAKI (1978), SASAKI et al. (1981a e b) e SAURAT (1977), este último citado por KUBLER (1987), analisam e utilizam o método descrito por JACOBS (1945), sob a denominação de “método de remoção de finas camadas” (“thin layer removal method”).

Partindo de processo proposto por SACHS (1927) para obtenção de tensões (longitudinal, tangencial e radial) em cilindros de material elástico isotrópico, aplicado à madeira como um corpo homogêneo anisotrópico (DOI & KATAOKA, 1967), os autores acima citados generalizam o método, considerando agora a madeira como um material anisotrópico não homogêneo, ou seja, suas constantes elásticas variam nas três direções em função do raio “ r ”.

A obtenção das deformações de crescimento é realizada segundo dois processos (OKUYAMA & SASAKI, 1978). Primeiramente, pequenas toras são torneadas com suas medulas centradas no eixo de um torno mecânico para obtenção de cilindros simétricos de 18cm de diâmetro e 0,45m de comprimento.

Em um dos processos, este cilindro é preso por um dos seus topos no mandril do torno. Extensômetros são colados na sua periferia nas direções longitudinal e tangencial, simetricamente em relação à medula e a uma distância de 20cm do topo livre. Perfurações com 35cm de profundidade, a partir deste topo e iniciadas a partir da medula, liberam as tensões, sendo as correspondentes deformações registradas em intervalos regulares.

No outro processo, uma perfuração de aproximadamente 2cm de profundidade, feita com serrote e formão, em volta de extensômetros, os protegem quando do desenrolamento da tora a partir da periferia. As deformações resultantes são registradas a diferentes distâncias radiais, uma vez que o processo de perfuração para proteção dos extensômetros é repetido quando de suas remoções pelo desenrolamento, até a posição que o diâmetro da tora assim o permita.

As tensões de crescimento residuais finais nas direções longitudinal, tangencial e

radial são obtidas através de complexas fórmulas com derivações apresentadas por SASAKI et al. (1981a), e ainda considerando as seguintes suposições:

- o material é não homogêneo somente na direção radial;
- o eixo principal das tensões residuais corresponde ao eixo geométrico do cilindro;
- existem três tensões residuais em cada espessura de camada e em qualquer ponto radial (α_t , α_l e α_r);
- a distribuição de tensão é simétrica em relação ao eixo do cilindro e constante ao longo de seu comprimento;
- quando o cilindro é perfurado, as alterações das deformações e tensões na direção longitudinal são constantes através da seção transversal da madeira remanescente;
- e
- a teoria referente a cilindros de paredes espessas de um corpo anisotrópico polar é aplicada para obtenção das tensões residuais.

POST (1979a) reafirma as constatações de JACOBS (1945), comentadas no início desta apresentação do “método de remoção de finas camadas”, à luz dos experimentos conduzidos por OKUYAMA & SASAKI (1978). A transformação de uma tora em forma cilíndrica, anteriormente ao início das medições, impede a determinação das tensões de crescimento na madeira mais recentemente formada. A remoção da excentricidade original da madeira altera a distribuição de tensões previamente existentes no tronco. Finalmente, como um dos problemas mais importantes, existe o “efeito de topo”: as distribuições de tensões obtidas por OKUYAMA & SASAKI, determinadas em cilindros com comprimentos totais de aproximadamente três vezes os seus diâmetros, são invariavelmente influenciadas por este efeito.

2.2.1.2.4 Extensão do método da prancha diametral ou de JACOBS

ATHERTON (1978) inicia seus experimentos pela determinação das deformações

de crescimento periféricas, através dos métodos de NICHOLSON (1971 e 1973) e de SAURAT & GUÉNEAU (1976).

Considerando a seguir que entre os métodos existentes para determinação das deformações de crescimento longitudinais, o de JACOBS (1938, 1945) é o mais simples e efetivo, e contando com a orientação dos Professores ARCHER & VENDHAN, estes com larga experiência no assunto (ver Referências Bibliográficas), ATHERTON propõe aperfeiçoar as técnicas experimentais envolvidas.

A proposta de ATHERTON para extensão do método de JACOBS é muito bem sumariada por POST et al. (1980) da seguinte forma: uma tora com extremos esquadrejados é cortada da árvore em estudo. Pinos são colocados nos seus dois topos definindo pontos de medição. As distâncias entre os correspondentes pinos, em relação aos dois topos, são medidas com micrômetros convenientemente utilizados em um aparelho de medição (Figura 17). Após o desdobro da tora em pranchas e estas em sarrafos, tendo cada um deles um pino em cada extremo, medem-se novamente as distâncias entre pares de pinos, tanto na prancha quanto no sarrafo. As diferenças entre as correspondentes medidas obtidas possibilitam a determinação das deformações de crescimento longitudinal, quando da transformação de tora em prancha, prancha em sarrafo e tora em sarrafo. Finalmente, amostras retiradas dos sarrafos são testadas em compressão longitudinal às fibras para determinação do módulo de elasticidade necessário à estimativa das tensões de crescimento.

Este método, utilizado originalmente por ATHERTON (1978) e posteriormente por POST et al. (1980), determina as deformações de crescimento em todos os sarrafos possíveis de serem obtidos, tendo como referência o menor topo da tora (Figura 16).

POST (1979a e b) utiliza o mesmo método de ATHERTON (1978) medindo as deformações de crescimento longitudinais apenas ao longo dos dois diâmetros delineados no topo menor da tora, onde se loca o centro de medição de cada sarrafo. Ao transpor o diagrama de corte para o topo maior, POST distribui a conicidade da tora igualmente entre todos os sarrafos, de tal forma que cada um deles obtenha a forma de um tronco de pirâmide de bases paralelas. Este procedimento é conseguido através da adição, nas dimensões de cada sarrafo

delineado no topo menor, do valor obtido pela diferença entre os raios da tora em cada topo e em cada uma das suas quatro direções, dividida pelo número de sarrafos existentes em cada uma delas. Para a serragem de sarrafos com estas dimensões transversais variáveis, uma serra circular portátil facilita o trabalho. As medidas dos comprimentos de cada sarrafo na tora, na prancha e isoladamente são obtidas com a utilização de um aparelho de medição especialmente fabricado, ao qual POST denomina de “grande micrômetro” (Figura 17) e que o autor desta tese acredita ser similar ao utilizado por ATHERTON (1978).

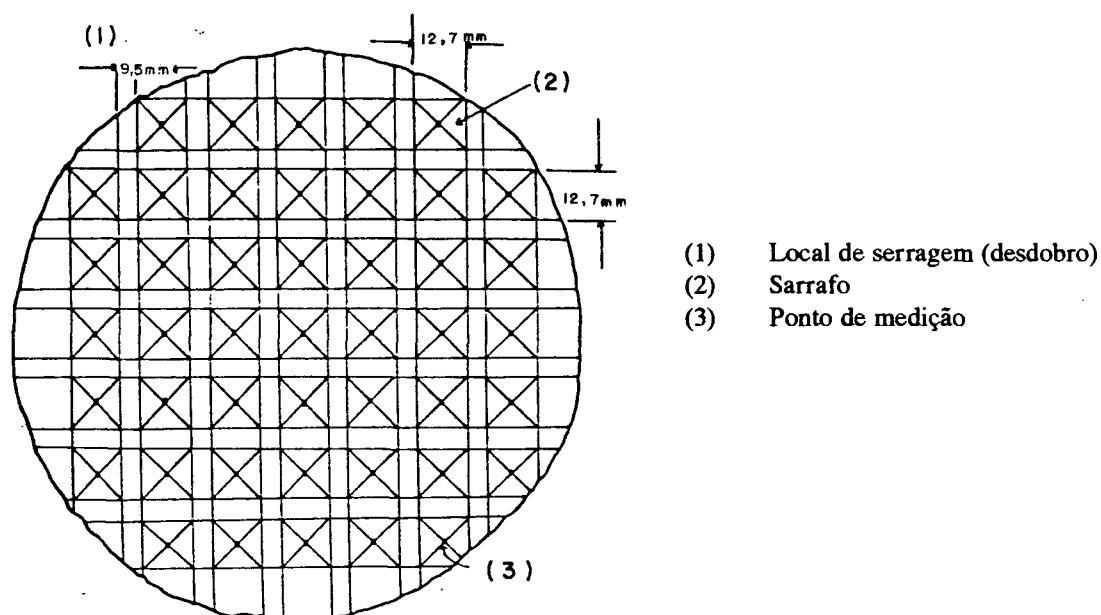


FIGURA 16. TOPO DE UMA TORA ILUSTRANDO O ESQUEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE SEÇÕES TRANSVERSAIS DE SARRAFOS, COM CORRESPONDENTES PINOS DE MEDIÇÃO E LOCAL DE DESDOBRO, PARA DETERMINAÇÃO DE DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS (ATHERTON, 1978).

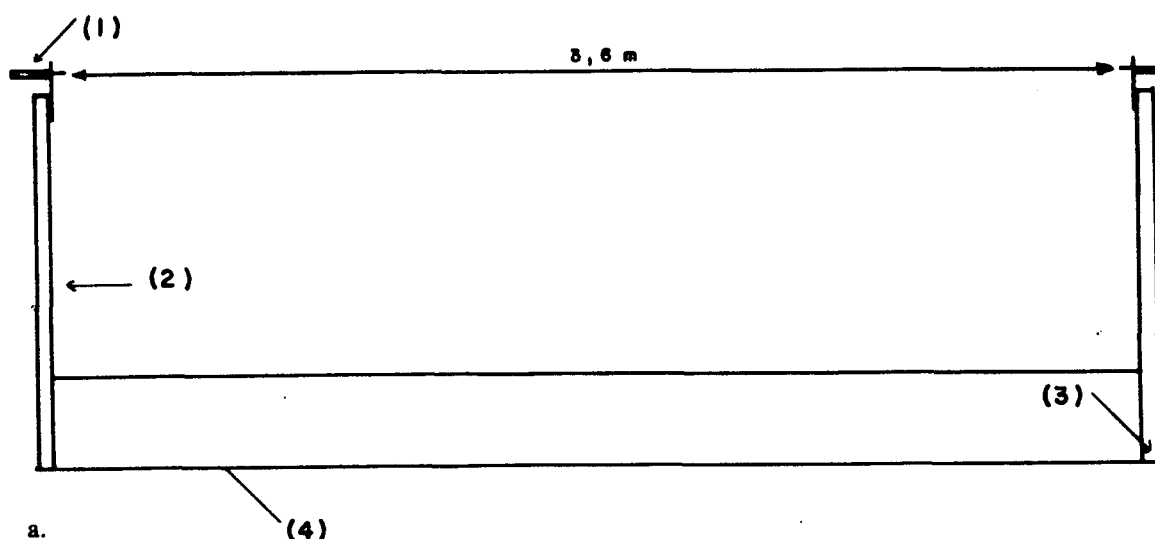
POST et al. (1980) examinam algumas dificuldades e problemas associados com a utilização do procedimento recém-descrito.

O método determina o valor médio da deformação de crescimento para cada sarrafo locado no comprimento da tora, não existindo nenhuma forma de determinação da variação possível de ocorrer ao longo do mesmo. Para minimizar o “efeito de topo” é vantajoso utilizar maiores razões entre o comprimento e o diâmetro da tora. Quando da ocorrência de significantes defeitos em árvores, como grandes nós por exemplo, é impossível a obtenção

de sarrafos com seções transversais inteiramente sadias. Havendo a ocorrência de rachas radiais, as tensões podem ser aliviadas em grandes quantidades, anteriormente ao início das medições. Assim, ambos, o “efeito de topo” e as rachas radiais, resultam na obtenção de deformações e tensões menores do que aquelas existentes normalmente dentro da árvore.

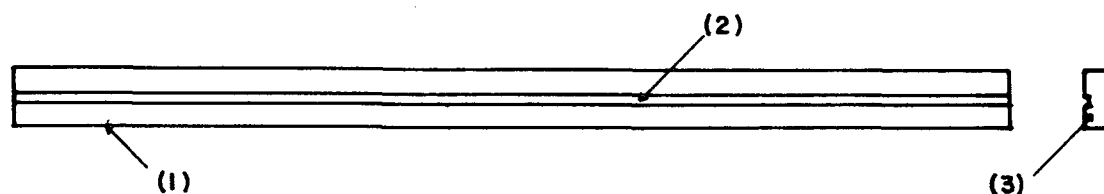
Outro problema considerado potencial encontra-se na recuperação de deformações visco-elásticas com o tempo. Este fenômeno é analisado por BOYD & SCHUSTER (1972) que definem estas deformações como aquelas que podem ser recuperadas, mas não imediatamente após a retirada da força causadora, ao contrário das deformações plásticas que não são recuperáveis sob condições ambientais normais.

De acordo com estes autores, a maioria das deformações visco-elásticas são recuperadas em um período aproximado de 14 dias. Analisando os gráficos apresentados pode-se concluir, em especial para *Eucalyptus obliqua*, que a maior parte da recuperação ocorre após os primeiros dois dias de liberação das tensões (corte da árvore), sendo mais demorada para a madeira próxima à medula, quando o período pode prolongar até dez dias. KUBLER (1987), citando VIDELOV (1977), comenta que o período de dois a três minutos é necessário para completarem-se as alterações de dimensões. NICHOLSON (1971), citando ARMSTRONG (1953), reconhece que a demora na obtenção das deformações pode influir significativamente nos resultados, recomendando um período de três a cinco minutos como adequado para medições de efeitos elásticos imediatos. CHARDIN & SALES (1984) limitam o tempo do experimento em no máximo oito horas para evitar efeitos secundários em sarrafos de pequenas dimensões, como a secagem. WILHELMY & KUBLER (1973a) citam a espera de várias horas em seus experimentos. MALAN (1984) considera 72 horas como o intervalo de tempo necessário para o desenvolvimento máximo de rachas de topo. MAEGLIN et al. (1985), considerando intervalos de tempo variando de um minuto a mais de 24 horas nas suas medições de deformações de crescimento, concluem que os valores máximos são obtidos após 15 minutos. OHSAKO & YAMADA (1968), citados por ARCHER (1986a), também estudam o problema de recuperação visco-elástica de deformações.



a.

- (1) Micrômetro
- (2) Canaleta de metal com 76,2cm de comprimento e 3,8x7,6cm de seção transversal
- (3) Parafusos
- (4) Canaleta de madeira de angiosperma com 30,5cm de largura e 7,6cm de espessura



b.

- (1) Gabarito fabricado com madeira de angiosperma, tendo um pino nos seus extremos
- (2) Sulco direcional para alinhamento de sarrafos com 14,3mm de largura e 9,5mm de profundidade
- (3) Seção transversal do gabarito e correspondente pino

FIGURA 17. MÉTODO DE POST (1979a) PARA DETERMINAÇÃO DE DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS. a. MICRÔMETRO PARA MEDIÇÃO DE COMPRIMENTOS DOS SARRAFOS DENTRO DE UMA TORA, DE UMA PRANCHA OU ISOLADAMENTE. b. GABARITO UTILIZADO COMO COMPRIMENTO REFERENCIAL DE MEDIÇÃO, PARA AFERIÇÃO DE MEDIDAS E PARA MANTER O SARRAFO ALINHADO QUANDO DE SUA MEDIÇÃO ISOLADA.

De qualquer forma, todas as dificuldades e problemas levantados ocorrem nos métodos existentes e tratados nesta Revisão.

Reforçando esta opinião, POST (1980) comenta que o método de determinação das deformações de crescimento longitudinais residuais, já descrito anteriormente como uma “extensão do método de JACOBS” (ATHERTON, 1978; POST et al., 1980), bem como sua variação apresentada por POST (1979a), tem vantagens decisivas sobre os demais: sobre aqueles que se iniciam com pranchas diametrais (“método da prancha diametral”, proposto por JACOBS, 1938, 1939, 1945, 1954 e 1965; utilizado por diversos autores de forma idêntica e adaptado para medições em árvores em pé por KIKATA, 1972) que, embora tenham fornecido informações de grande utilidade, necessitam de uma interpretação cuidadosa dos resultados; sobre aqueles que utilizam orifícios de acesso para instrumentos (“método de perfuração de orifícios”: BOYD, 1950a; KUBLER, 1959b; WILHELMY & KUBLER, 1973a e b), quando a liberação das tensões durante a perfuração do orifício e o efeito de concentração de tensões durante a liberação das deformações são desconhecidas; e, finalmente, sobre aqueles que removem camadas de madeira através do desenrolamento interior ou exterior de toras (“método de remoção de finas camadas”, proposto e utilizado por diferentes autores, especialmente no Japão), caso em que a liberação de tensões durante a preparação dos cilindros de medição é também desconhecida.

Sem considerar as dificuldades e problemas comentados acima, MAEGLIN et al. (1985) utilizam uma combinação aproximada dos métodos de JACOBS (1938 e 1945) e de POST et al. (1980), com o propósito de investigar as tensões de crescimento que provocam empenamentos em peças de madeira verdes e suas possíveis reduções em peças de madeira secas, pelo processo de serragem-secagem-resserragem (“saw, dry and rip” - SDR). Segundo MAEGLIN (1978) e MAEGLIN & BOONE (1980 e 1983), este processo que consiste em serrar as toras em pranchas, secar estas últimas e resserrá-las em peças de dimensões menores, diminui substancialmente a ocorrência de empenamentos.

Na obtenção das deformações, pinos são fixados nos topos das pranchas obtidas em toda a tora, definindo os pontos de medição. Na prancha central (diametral), utilizada para determinação das deformações de crescimento, as distâncias entre correspondentes pinos nas duas extremidades são medidas, tanto na prancha quanto no sarrafo isoladamente. Nas

demais pranchas o mesmo procedimento é utilizado, mas considerando a madeira seca a altas temperaturas, até um teor de umidade de $12 \pm 3\%$, com e sem tratamento final de condicionamento. Os correspondentes valores médios de tensões obtidos revelam redução de suas magnitudes da condição verde para a seca sem tratamento final e desta para a condição de seca com condicionamento, embora não haja correlação entre nenhuma das variáveis investigadas.

2.2.1.2.5 Máquina de teste apresentada por CHARDIN & SALES

CHARDIN & SALES (1983a e b e 1984), CHARDIN et al. (s.d.) e SALES (1986) reportam sobre a fabricação de uma máquina especialmente projetada para serrar toras de madeira posicionadas verticalmente, possibilitando ao mesmo tempo a medição das variações nos comprimentos dos sarrafos obtidos, bem como a medição da influência no comprimento da própria tora, à medida que cada um deles é retirado.

A remoção dos sarrafos é realizada seqüencialmente em volta da circunferência de toras com até 2,50m de comprimento e as deformações de crescimento longitudinais são constantemente registradas, através da tomada de sucessivas medidas durante todo o processo. Esta última facilidade permite não somente obter os valores médios das deformações de crescimento, como também da variação possível de ocorrer ao longo do comprimento do sarrafo (Figura 29), ao contrário do que é acreditado por POST et al. (1980), conforme anteriormente comentado.

Em um primeiro estágio, os experimentos iniciaram com medições em sarrafos de pequenas seções transversais, a que os autores referem-se como sendo um estudo em detalhe (Figura 18a). Posteriormente, um diagrama de corte para obtenção de sarrafos com 6x6cm de seção transversal e orientados de acordo com as direções anisotrópicas da madeira é aconselhado (Figura 18b), a fim de possibilitar a obtenção de amostras para estudo das relações entre tensões de crescimento e a qualidade da madeira.

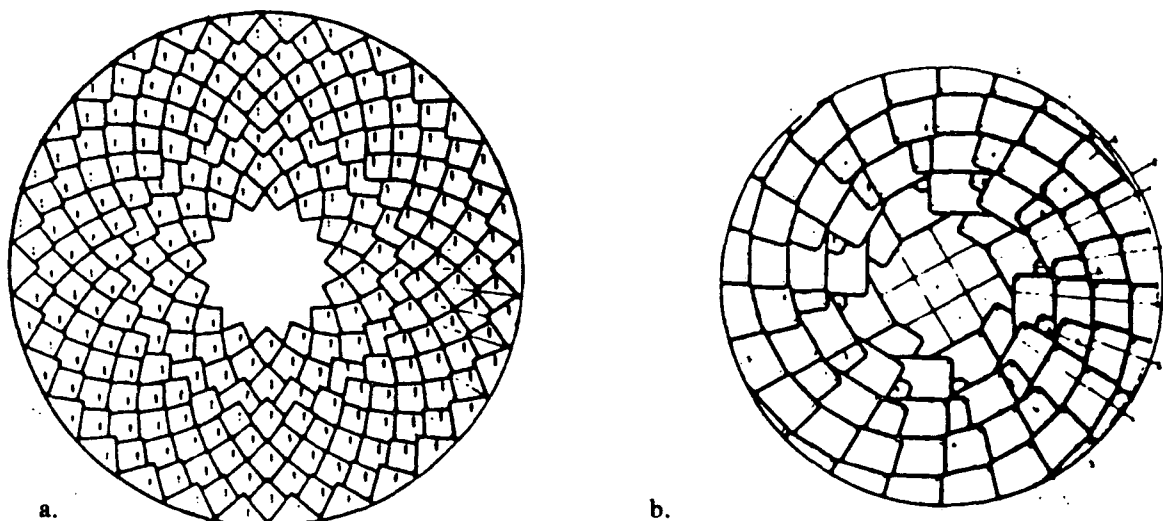


FIGURA 18. DIAGRAMA DE CORTE ILUSTRANDO A LOCALIZAÇÃO DE SEÇÕES TRANSVERSAIS DE SARRAFOS NO TOPO DE TORAS PARA DETERMINAÇÃO DE DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS. a. PRIMEIRO DIAGRAMA UTILIZADO. b. DIAGRAMA ATUAL (CHARDIN & SALES, 1984).

A Figura 19 ilustra o procedimento proposto, onde uma tora presa por garras em posição vertical (Figura 19b) é cortada pela ação de serras circulares que se deslocam para cima e para baixo (Figura 19c). Um grande disco inferior controla a posição angular da tora e o movimento rotativo da mesma, possibilitando o corte periférico de sucessivos sarrafos. Um extensômetro fixo na parte superior da máquina mede a variação de comprimento entre a superfície da tora e a extremidade do sarrafo (Figura 19a), mantido na posição vertical, em intervalos de 10cm de corte.

Através do método proposto não é possível desdobrar toda a tora, sendo a porção cilíndrica central interna processada em serra de fita. Também é mencionado que somente o primeiro sarrafo fornece um valor correto da deformação de crescimento. Após a remoção deste, as medidas referem-se à redistribuição de tensões residuais que se estendem por toda a porção da tora ainda remanescente.

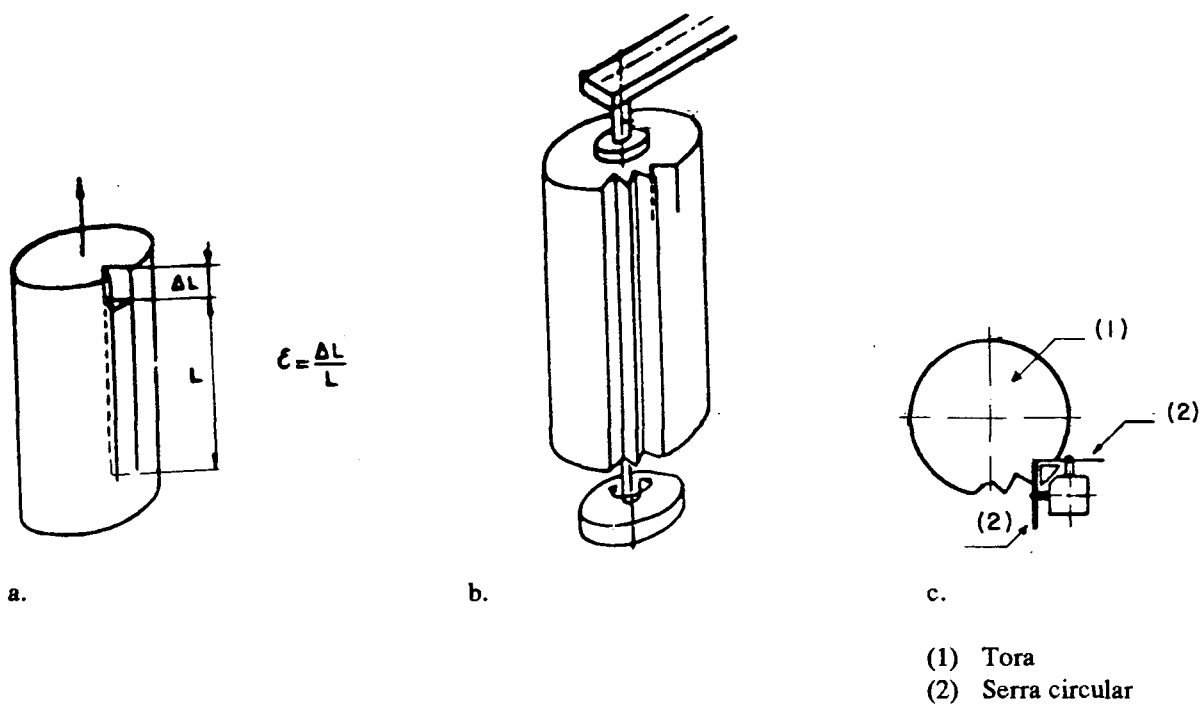


FIGURA 19. MÉTODO APRESENTADO POR CHARDIN & SALES (1983a e b) PARA DETERMINAÇÃO DE DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS. a. DEFORMAÇÃO DE CRESCIMENTO SENDO DETERMINADA NO PRIMEIRO SARRAFO EM PROCESSO DE CORTE. b. TORA POSICIONADA VERTICALMENTE NA MÁQUINA DE TESTE PARA CORTE E MEDIÇÃO. c. SERRAS CIRCULARES QUE SE MOVIMENTAM VERTICALMENTE AO LONGO DO EIXO LONGITUDINAL DA TORA (CHARDIN & SALES, 1984).

ARCHER (1986a) refere-se aos resultados de BEGE (1982), como tendo sido obtidos pelo mesmo procedimento de relaxamento de tensões apresentado por CHARDIN & SALES (1983a e b) e, portanto, em data anterior.

2.2.2 Deformações de crescimento transversais

Alguns métodos apresentados, quando da determinação de deformações de crescimento longitudinais periféricas, incluíram também a determinação das deformações transversais tangenciais compressivas (Item 2.2.1.1). O item 2.2.2, agora em pauta, trata de procedimentos realizados exclusivamente para determinação das deformações transversais tangencial e radial.

KUBLER (1987) relata que a maioria dos autores determinam as deformações de crescimento transversais em discos de madeira e utilizando extensômetros ou microscópios de medição, conforme será considerado pelos itens a seguir.

2.2.2.1 Deformações tangenciais compressivas

KOEHLER (1933), citado por JACOBS (1945), mostra que existe uma tendência de fechamento na periferia da abertura de um corte radial, realizado através de toda a espessura de um disco até o seu centro. Este fenômeno sugere que as camadas de células exteriores da madeira encontram-se em estado de compressão tangencial, a qual, tendendo a aumentar o tamanho de seus comprimentos circunferenciais, coloca o interior da madeira em estado de tração radial.

JACOBS (1939) apresenta um método de determinação preliminar das deformações de crescimento tangenciais, utilizando a medição de distâncias entre pares de pinos fixados em intervalos regulares e em ambos os lados de uma figura, em forma de "V", traçada na face de discos de aproximadamente 2,5cm de espessura. O estado de compressão circunferencial ou anelar (compressão tangencial aos anéis de crescimento) é comprovado em toda a extensão do disco, através da liberação das tensões pelo corte da referida figura, quando as distâncias entre pares de pinos opostos aos lados do "V" (distâncias medidas na direção tangencial aos anéis de crescimento) diminuem após o corte.

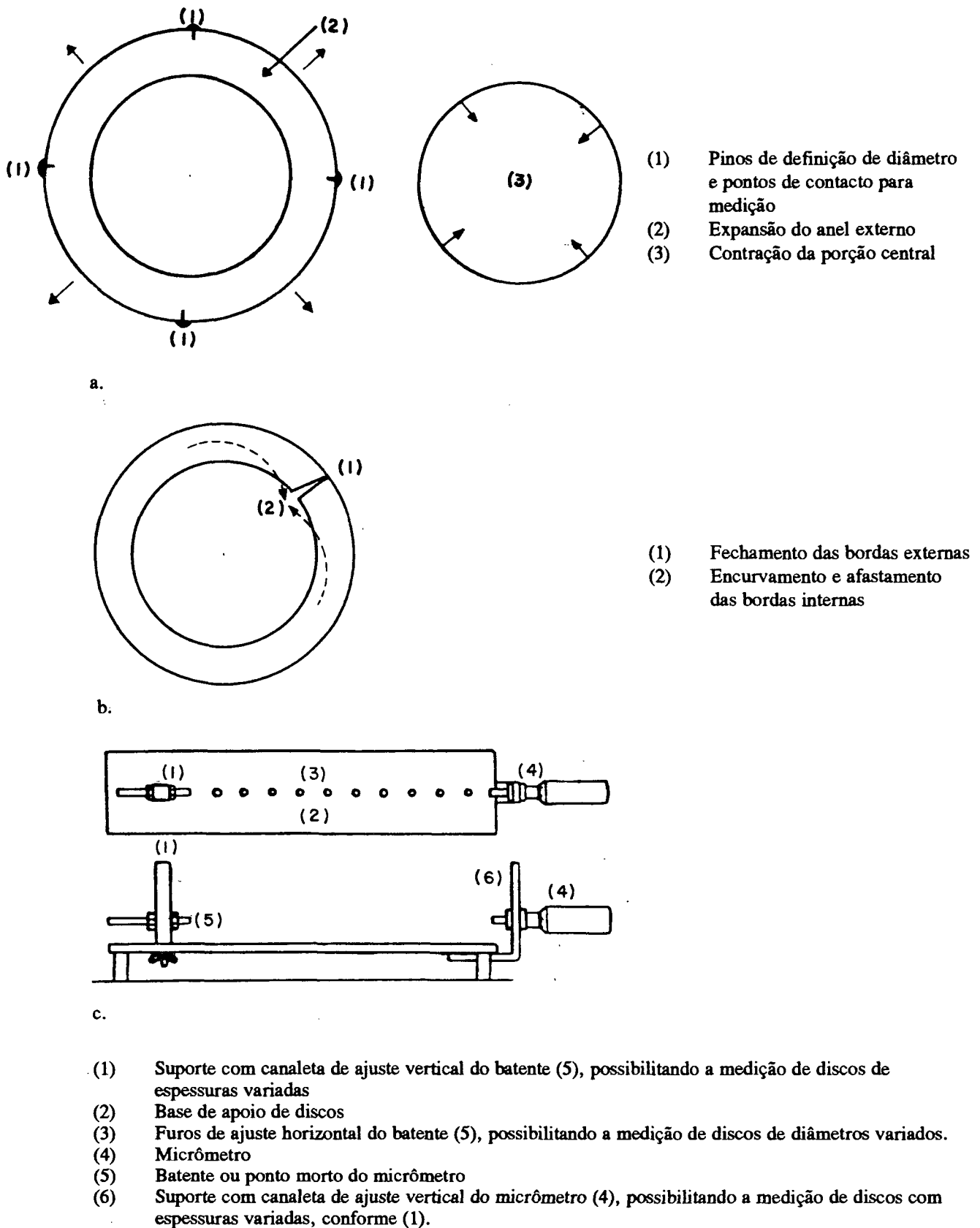


FIGURA 20. MÉTODO DE JACOBS (1945) PARA DETERMINAÇÃO DE DEFORMAÇÕES TANGENCIAIS COMPRESSIVAS EM DISCOS DE MADEIRA. a. EFEITO DO CORTE DE UM ANEL OU DE UMA PORÇÃO EXTERNA. b. EFEITO DO CORTE RADIAL DA LARGURA DE UM ANEL. c. MICRÔMETRO DE MEDIÇÃO.

Este mesmo procedimento é utilizado por BOYD (1950a) para determinação das deformações de crescimento radiais, considerando, naturalmente, as medidas entre pares de pinos tomadas nesta nova direção (Figura 22).

Em 1945, JACOBS descreve outro método de determinação das deformações tangenciais compressivas, utilizando como parâmetro a expansão diametral de anéis ou de porções circulares dos tecidos externos de discos de madeira, provocada pelos seus cortes com uma serra tico-tico (Figura 20a). As deformações de crescimento são obtidas através da diferença entre os comprimentos de cada um de dois diâmetros, perpendiculares entre si e definidos pela fixação de pinos ao longo da espessura (1,3 a 2,5cm), antes e posteriormente ao corte (Figura 20a), sendo utilizado um micrômetro especialmente adequado às medições (Figura 20c).

A expansão do anel externo é acompanhada pelo encurvamento de suas bordas internas em direção ao centro, quando um corte radial é feito através de sua largura (Figura 20b).

O fenômeno de encurvamento das bordas internas, não explicado por JACOBS, deve-se a uma acomodação de deformações. Este encurvamento e o afastamento relativo das bordas podem ser explicados pela existência de tensões tangenciais de tração, em contradição às conclusões de JACOBS (1939), conforme será discutido no item 2.3.2. Já o fechamento das bordas externas não deixa de ilustrar as observações de KOEHLER (1933), apresentadas no início deste item.

Na Figura 20a são indicadas a expansão do anel externo (devido às tensões tangenciais compressivas) e a contração da porção central remanescente do disco (devido ao seu estado de tração transversal radial anterior ao corte).

BOYD (1950a) conduz um completo experimento com o objetivo de demonstrar a natureza e a forma de medição dos valores das tensões circunferenciais e daquelas que ocorrem ao longo do raio de uma seção transversal de uma árvore.

Primeiramente, BOYD investiga se as determinações de deformações realizadas em discos cortados de seções transversais são realmente representativas das condições

existentes em árvores em crescimento, através de uma série de medições diamétrais. Estas medições iniciaram-se em árvores em pé, na floresta, demarcando-se os discos a serem cortados no tronco e fixando-se quatro pregos em posições indicativas de dois diâmetros perpendiculares entre si, após a retirada da casca da seção de interesse. A tomada de medidas prosseguiu logo após o abate da árvore e a obtenção das toras contendo as posições de interesse, nestas mesmas toras após um dia de suas obtenções e, finalmente, nos discos previamente demarcados. Os comprimentos diamétrais obtidos com um aparelho, consistindo de uma armação ajustável e tendo um relógio comparador com precisão de $2,5 \times 10^{-2}$ mm em um dos extremos (Figura 21), não apresentando nenhuma diferença significativa, conduzem à conclusão de que estudos realizados em discos constituem-se em um método adequado de determinação das tensões transversais ocorrentes em árvores que não sofreram perturbações anteriores.

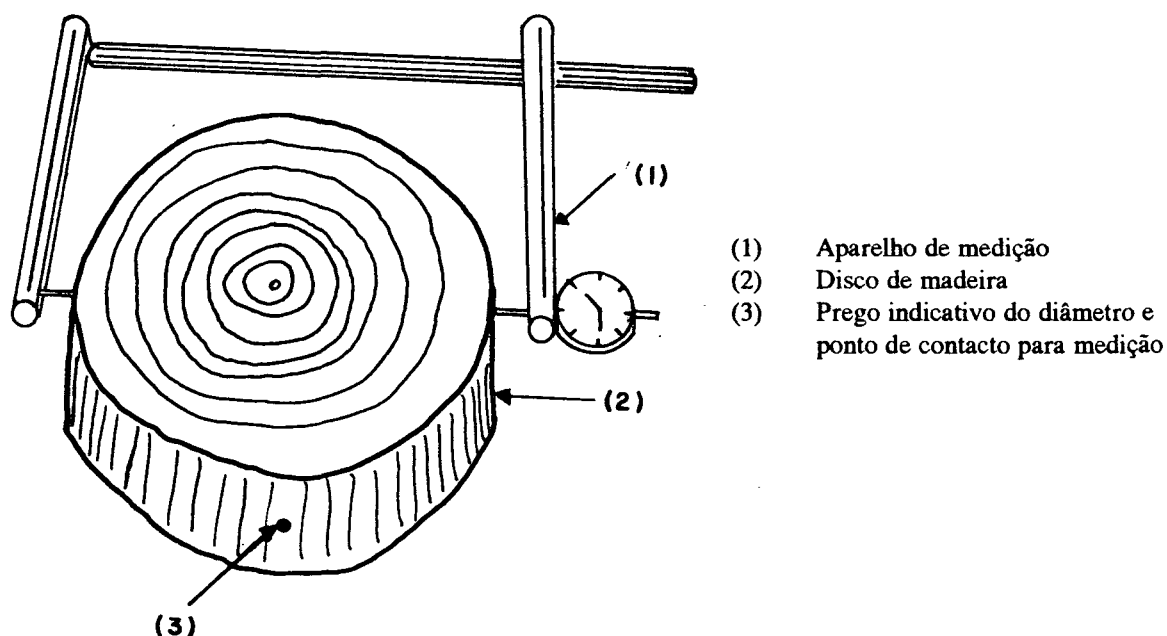


FIGURA 21. MÉTODO DE BOYD (1950a) PARA DETERMINAÇÃO DE DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO TANGENCIAIS COMPRESSIVAS EM DISCOS DE MADEIRA (MEDIÇÃO DE DIÂMETROS).

ARCHER (1986), entretanto, baseando-se em análises teóricas, não apóia esta conclusão, conforme já comentado anteriormente nesta Revisão de Literatura (Item 2.2).

As deformações de crescimento tangenciais compressivas são determinadas por BOYD, da mesma forma que JACOBS (1945), apenas utilizando aparelhos de medição diversos (Figuras 20c e 21). Quatro pregos fixados ao longo da espessura (3,2cm) de discos com diâmetros variados definem dois diâmetros perpendiculares entre si, cujos comprimentos são obtidos com o aparelho de medição (Figura 21). Um orifício é perfurado a aproximadamente 3,8cm da periferia e o corte, para retirada de uma porção circular externa, é realizado seguindo aproximadamente a direção de um anel de crescimento (Figura 20a). As alterações observadas nos comprimentos dos diâmetros possibilitam a obtenção das correspondentes deformações de crescimento.

No presente experimento, o estado de compressão tangencial periférico é comprovado para todos os discos examinados, através do aumento do diâmetro das porções circulares externas após o corte.

2.2.2.2 Deformações de trações radiais

Na determinação das deformações radiais de crescimento, BOYD (1950a) utiliza discos de aproximadamente 5,1cm de espessura e de 68,6cm de diâmetro, tendo suas faces transversais paralelas. Uma figura na forma de “V” é desenhada em uma de suas faces, tendo o vértice na medula e abertura de 10,0cm na periferia, definindo as linhas de posterior corte desta peça de madeira. Outro “V” é desenhado interiormente ao primeiro, com seus lados distanciados de 1,3cm e ao longo dos quais são fixados pregos de 1,9cm de comprimento, em orifícios pré-perfurados, distanciados uns dos outros de 5,1cm na direção radial (Figura 22a). Linhas transversais ao sentido radial são firmemente definidas nas cabeças dos pregos, para serem utilizadas como ponto de referência por um microscópio de medição com graduações de aproximadamente 1×10^{-3} mm. A diminuição das distâncias na direção radial entre pares de pregos, após o corte da peça de madeira em forma de “V” (Figura 22b), com

referência aos valores obtidos anteriormente ao corte, comprova e fornece os valores das deformações de crescimento de trações radiais.

Para verificar que as tensões são completamente liberadas com este procedimento de serragem da peça de madeira em forma de “V”, BOYD divide cada uma destas peças entre pares de pregos (Figura 22c) e as medições são novamente realizadas, não se verificando nenhuma alteração nos resultados anteriormente obtidos.

As tensões correspondentes são obtidas através do teste em tração e compressão, de amostras de madeira retiradas do disco, adjacente e paralelamente à direção radial de medição das deformações.

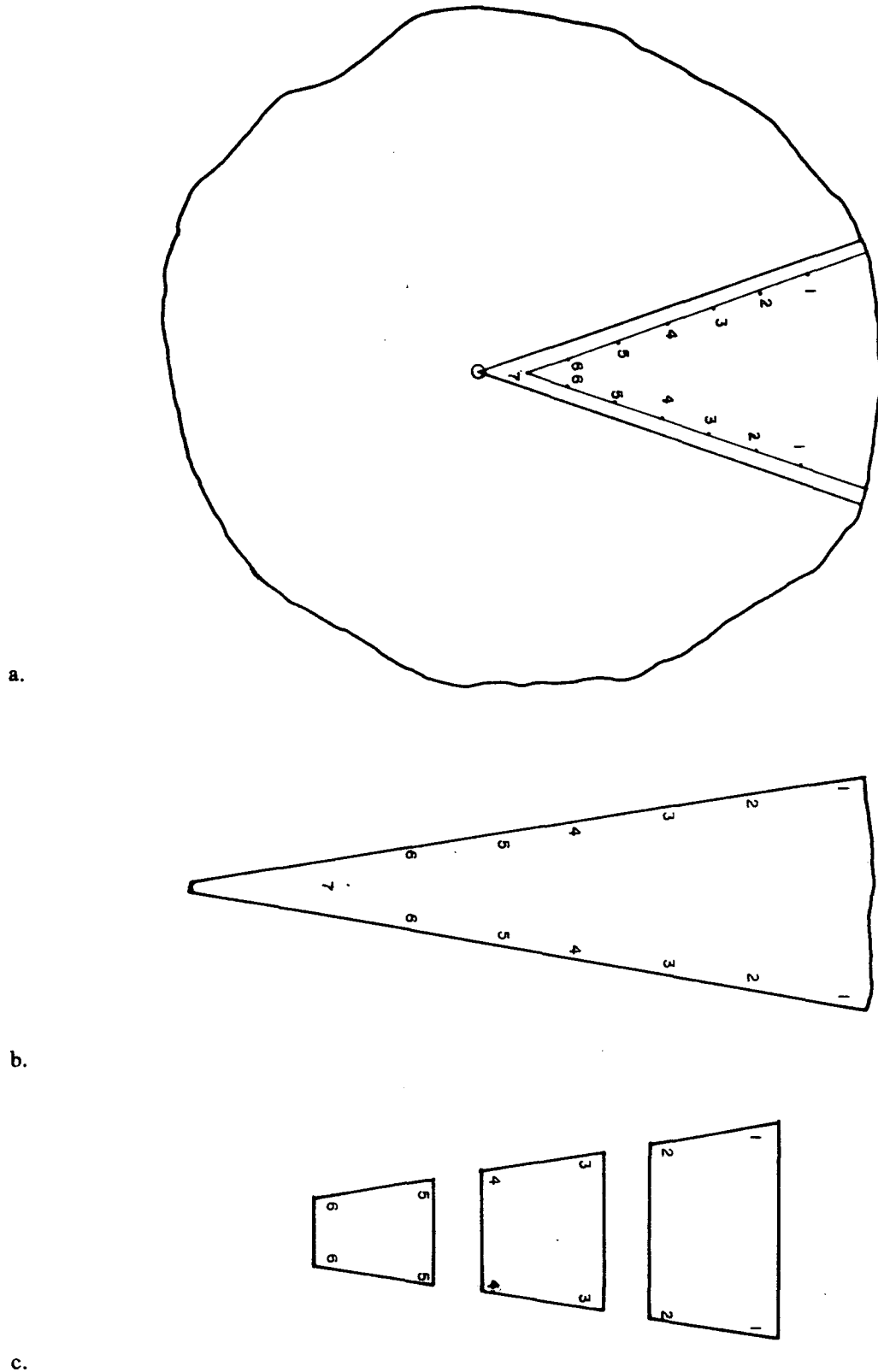


FIGURA 22. MÉTODO DE BOYD (1950a) PARA DETERMINAÇÃO DE DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO DE TRAÇÕES RADIAIS. a. FIGURA EM FORMA DE "V" (CUNHA), TRAÇADA EM UMA DAS FACES DO DISCO, MOSTRANDO OS PONTOS DE MEDIÇÃO E LOCAIS DE CORTE. b. CUNHA CORTADA DO DISCO E UTILIZADA PARA MEDIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES. c. CUNHA SUBDIVIDIDA PARA COMPROVAÇÃO DA COMPLETA LIBERAÇÃO DE TENSÕES.

2.2.3 Medidas indiretas de deformações de crescimento

Embora os métodos existentes para determinação das tensões de crescimento sejam efetivos para vários propósitos, como nos estudos de distribuições destas tensões no interior do tronco de uma árvore, eles não são adequados para avaliações rápidas quando grandes amostragens são envolvidas.

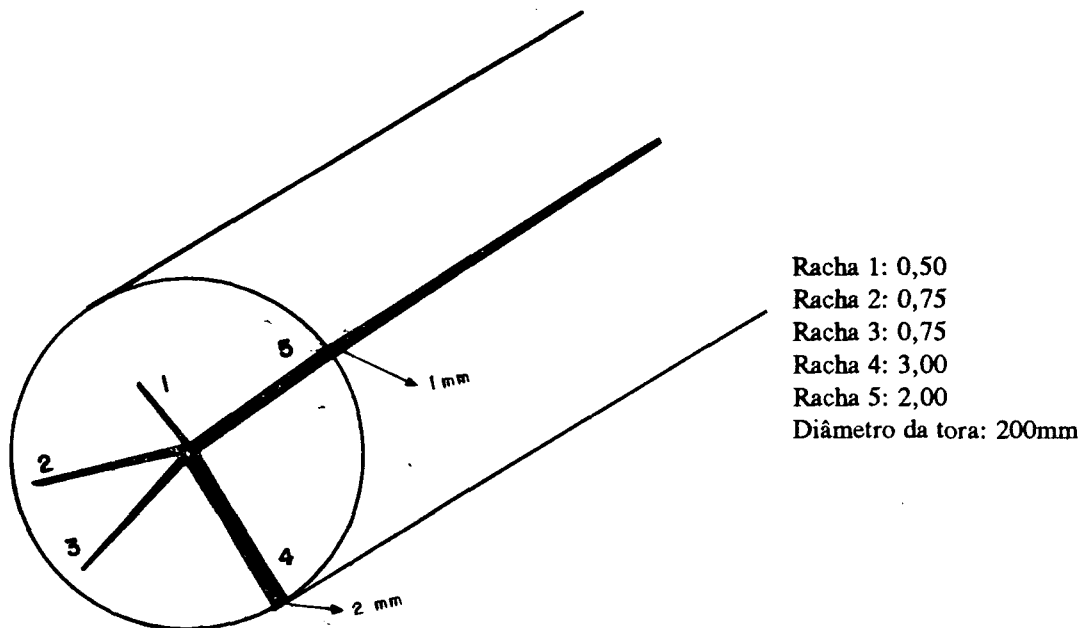
Apresentando esta justificativa, MALAN (1984) conduz experimentos de avaliação da variação das tensões de crescimento em plantações de *Eucalyptus grandis*, baseando-se em um dos seus efeitos adversos de maior importância: as rachas.

As investigações conduzidas por NICHOLSON (1971b) e BOYD (1950a), citados por MALAN, demonstram que as rachas, principalmente as radiais que ocorrem no topo, provocadas pelo corte de traçamento para derruba de árvores ou para obtenção de toras, podem ser utilizadas como uma medida eficiente do nível de tensão nesta parte do tronco. Deve ser considerado, entretanto, que o equilíbrio é governado principalmente pelo valor da racha crítica que ocorre na área examinada.

A técnica de aumento circunferencial (“girth increase technique”) tem sido utilizada por muitos anos na África do Sul, consistindo em expressar o aumento da circunferência do tronco, provocado pela abertura das rachas, como uma função da circunferência original medida anteriormente ao corte de traçamento, medidas estas, tomadas no mesmo ponto.

Outra técnica relatada por MALAN denominada “sistema de escore de pontos” (“point scoring system”), baseada em CONRADIE (1980), consiste em atribuir valores às rachas que ocorrem na superfície transversal do topo, em função de suas dimensões. Para cada comprimento de uma racha, que não alcance a periferia do tronco, é atribuído o valor de 0,5 a cada porção de seu comprimento igual à metade do raio. O valor 1 é adicionado às larguras das aberturas provocadas pelas rachas, medidas em milímetros na periferia, para obter o escore daquelas que estejam nesta situação. A soma dos valores ou pontos obtidos é dividida por 0,01, multiplicado pelo diâmetro do topo onde elas ocorrem, a fim de considerar

um valor proporcional apropriado a este diâmetro. A aplicação deste sistema é ilustrado na Figura 23.



$$\text{Escore total ajustado} = \frac{0,50 + 0,75 + 0,75 + 3,00 + 2,00}{200 \cdot 0,01} = 3,50$$

FIGURA 23. SISTEMA DE ESCORE DE PONTOS PROPOSTO POR CONRADIE (1980) PARA AVALIAÇÃO DE RACHAS DE TOPO E SUAS CORRELAÇÕES COM AS TENSÕES DE CRESCIMENTO (MALAN, 1984).

O sistema de escore de pontos é correlacionado com deformações de crescimento, segundo a equação abaixo, referente à *Eucalyptus grandis* da África do Sul (MALAN, 1984).

$$y = 5,73 \cdot 10^{16} \cdot x^{5,27}$$

onde,

y = rachas de topo em escore ou escore total ajustado; e

x = deformações de crescimento superficiais.

Embora não tenha sido explicado por MALAN, o termo "superficiais" deve referir-se a "periféricas".

AGUIAR (1986) investiga o controle de rachas de topo em toras de *Eucalyptus*

grandis Hill. ex Maiden, quando submetidas a diversos processos de derruba e de armazenamento para a produção de lâminas por desenrolamento. É utilizado um sistema de escore de pontos modificado, onde se atribui pesos às diferentes larguras de um racha crítica, em função da sua posição radial dentro da seção transversal. A média de escores obtidos nos dois topos de cada tora é tomada como valor de avaliação.

BAENA (1982) também utiliza a quantificação de rachas de topo em toras de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis*, como critério de severidade relativa das tensões de crescimento internas, quando analisando a utilização destas espécies para a fabricação de sarrafos.

POLGE & THIERCELIN (1979), considerando que todos os métodos existentes para determinação das deformações de crescimento são destrutivos, mesmo que localmente, examinam a possibilidade de correlacionar tais deformações com o diâmetro axial (medido exatamente na direção da grã) e o diâmetro tangencial (medido perpendicularmente ao primeiro) de amostras incrementais obtidas da forma usual com o emprego de um trado.

Às deformações de crescimento determinadas por POLGE & THIERCELIN, de acordo com GUÉNEAU & KIKATA (1973), sendo periféricas, correspondem às tensões de tração.

Com referência ao diâmetro axial entre árvores, o valor de - 0,068 determinado para o coeficiente de correlação é bastante baixo em uma primeira série de experimentos, passando a -0,60 em uma segunda, considerando um nível de confiança de 1%. Entretanto, ressalta-se que a relação negativa confirma a associação da diminuição do diâmetro axial com o aumento da tensão de tração periférica, após sua liberação. Para o diâmetro tangencial, o valor de $R = - 0,578$, também relativamente baixo, causa surpresa quanto ao seu sinal negativo, pois às altas tensões de tração deveriam corresponder maiores distorções tangenciais (conforme também comentado por ARCHER, 1986a).

Segundo KUBLER (1987), KREMPL (1970) também reporta sobre a possibilidade das tensões de crescimento serem responsáveis pelas deformações de amostras “trado”; POLGE (1982) apresenta novas investigações medindo os diâmetros com precisão de 1 μm ;

e FERRAND (1981) considera que o método é adequado para comparações não destrutivas de tensões de crescimento entre um grande número de árvores. Esta mesma opinião é externada por FERRAND (1982a), baseando-se em coeficientes de variação entre o diâmetro tangencial e as deformações longitudinais de crescimento, variando de - 0,67 a -0,77, embora não seja aconselhado a utilização do procedimento para previsões isoladas.

Em 1984, PERRIN & FERRAND introduzem e descrevem um dispositivo completamente automático para medição simultânea de diâmetro axial e tangencial de “amostras trado” incrementais, com precisão de 0,001mm.

WILKINS & BAMBER (1986) chamam a atenção para a redução, com o tempo, dos diâmetros axial e tangencial das amostras em questão, fato este atribuído à própria ação das tensões de crescimento. Segundo os autores, esta alteração de dimensões pode ser considerada para os fins previstos, simplesmente tomando a precaução de efetuar as medições 48 horas após a obtenção das amostras.

Embora WILKINS & BAMBER salientem ser a primeira vez que são observados os efeitos retardados das tensões de crescimento, no caso da recuperação visco-elástica ser a responsável, há muito mais tempo já se conhece sua provável influência (Item 2.2.1.2.4).

Na realidade as pesquisas referentes à busca de correlação entre outras características da madeira e as tensões de crescimento têm como finalidade evitar as dificuldades inerentes às suas determinações. Neste sentido, vários experimentos podem ser citados:

CHAFE (1979a) conclui que a dureza da madeira, determinada com algumas modificações no procedimento adotado pela ASTM D143, da espécie de *Eucalyptus regnans* não constitui em uma boa indicação prática de deformações de crescimento.

KUBLER (1987) considera que as deslocamentos radiais de paredes de células, observadas em *Eucalyptus regnans*, também não podem ser utilizadas como indicativas, embora CHAFE (1977) sugira que tais deslocamentos possam ocorrer quando do relaxamento de altas tensões.

Esta última ponderação de KUBLER é confirmada pelos experimentos de WILKINS & ALEXIOU (1991), que também citam as mesmas expectativas de WILKINS

(1986b), sobre a ausência de correlação entre as deformações de paredes celulares e as tensões de crescimento longitudinais em espécies de *Eucalyptus pilularis* Sm. e *Eucalyptus grandis* W. Hill. ex Maiden.

WILKINS & ALEXIOU utilizam o método de KRILOV & ADES (1985) para a determinação das tensões de crescimento em toras de 2m de comprimento e diâmetro de topo menor ou igual a 20cm. As toras são serradas longitudinalmente até uma profundidade de 1,5m através da medula (Figura 24). O deslocamento radial no topo rachado (deformação) fornece a medida do gradiente de tensão.

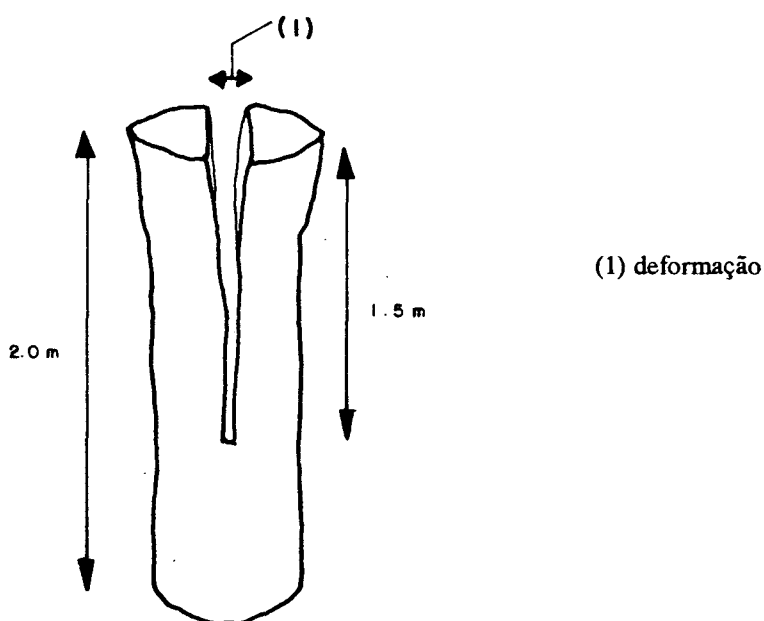


FIGURA 24. MÉTODO DE KRILOV & ADES (1985) PARA DETERMINAÇÃO DE DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS (WILKINS & ALEXIOU, 1991).

O próprio método de KRILOV & ADES, em princípio, constitui-se em uma medida indireta de tensões de crescimento ainda não comentado.

A contração volumétrica (y) da condição verde até 12% de teor de umidade é correlacionada ($R^2 = 84\%$) com as deformações de crescimento longitudinais periféricas (x_I) obtidas pelo método de NICHOLSON (1971a), com o módulo de elasticidade em

compressão (x_2) e com a densidade (x_3), através da equação abaixo, determinada por NICHOLSON & DITCHBURNE (1973) para *Eucalytus obliqua*:

$$y = 3,33 x_1 + 0,866 x_2 - 43,8 x_3 + 20,47$$

POLGE (1981) encontra altas tensões de crescimento longitudinais e altas contrações em todas as direções anisotrópicas da madeira situada nos lados superiores de árvores inclinadas de *Fagus sylvatica*. Entretanto, LENZ & STRASSLER (1959) não confirmam as observações de POLGE quando analisam a correlação entre as contrações volumétricas e as altas intensidades de tensões, detectadas pela ocorrência de rachas em árvores inclinadas de “Beech”. Ambas as observações acima são reportadas por KUBLER (1987).

NICHOLSON et al. (1972) determinam as deformações de crescimento longitudinais periféricas de apenas uma árvore de *Eucalyptus regnans*, através do método de NICHOLSON (1971). Apesar de apresentarem os resultados obtidos apenas graficamente, concluem haver encontrado alta correlação entre as correspondentes tensões e as diversas variáveis examinadas: contração volumétrica, módulo de elasticidade em compressão, densidade básica, teor de lignina e proporção de células com paredes muito espessas.

Utilizando seis árvores de troncos retos verticais, uma inclinada e três severamente inclinadas, todas da mesma espécie testada em 1972, mas também apresentando as relações observadas apenas graficamente, NICHOLSON et al. (1975) confirmam suas observações anteriores quanto à existência de boa relação entre deformações de crescimento (determinadas de acordo com NICHOLSON, 1971a) e as seguintes variáveis: módulo de elasticidade, densidade básica, contração volumétrica, diferentes tipos de fibras (normais, de paredes médias e espessas, e gelatinosas), bem como com a forma do tronco.

FERRAND (1982c), citado por KUBLER (1987), confirma a associação de altos valores de MOEs com altas deformações de crescimento para a madeira de “Beech”.

POST (1979a), investigando em detalhe a distribuição de tensões de crescimento longitudinais no interior do tronco, mas utilizando apenas uma árvore de *Fraxinus americana*, não encontra nenhuma correlação entre o módulo de elasticidade, em compressão paralela às fibras, e a densidade verde.

BOYD (1980) confirma a existência de correlação entre as deformações de crescimento e a densidade da madeira de árvores reorientadas de *Eucalyptus regnans*.

MALAN (1985) determina diferenças radiais marcantes, inclusive dentro da própria árvore, na densidade e em diversas propriedades anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis* de altas e baixas intensidades de tensões de crescimento. Estas últimas, sendo medidas indiretamente pelas rachas de topo, conforme procedimento adotado pelo autor em 1984. A densidade básica de árvores com baixas intensidades de tensões são significativamente menores em magnitude e no gradiente de variação da medula à casca, quando comparadas com as de alta densidade, exceto na proximidade da medula.

FERNANDES (1982), também avaliando as tensões de crescimento através da quantificação das rachas de topo na espécie *Eucalyptus urophylla* St. Blake com 11 anos de idade, conclui pela não existência de correlação entre a densidade média da madeira, à 10% de teor de umidade, com a intensidade de rachas ocorrentes.

BUCUR (1982) sugere a determinação de tensões de crescimento utilizando oscilações ultra-sônicas, mas KUBLER (1987) considera que da mesma forma que é difícil medir as deformações é também difícil medir suas indicações indiretas.

Utilizando esta última técnica na determinação das constantes elásticas da madeira, BUCUR (1985) relata ser o caráter não homogêneo da madeira uma limitante na precisão dos resultados.

2.3 Distribuição das tensões de crescimento no interior do tronco de uma árvore

A distribuição de tensões de crescimento no interior do tronco de uma árvore possui uma configuração bastante complicada. As camadas mais externas da madeira estão em estado de tração longitudinal e compressão tangencial, enquanto as camadas internas encontram-se em estado de compressão longitudinal e tração radial e tangencial (Figuras 27 e 30).

Da mesma forma que adotado por KUBLER (1987), a abordagem da distribuição

e magnitudes das deformações de crescimento (Item 2.4) é considerada nesta Revisão de Literatura preferencialmente às tensões, as quais necessitam do conhecimento da variação do módulo de elasticidade para serem conhecidas com precisão. Também as deformações conduzem a uma melhor interpretação das estimativas dos efeitos adversos provocados pelas tensões, constituindo-se em uma medida da probabilidade de uma madeira romper-se, independentemente da espécie. Uma dada tensão tem maior efeito em espécies de madeira menos densas do que nas de maior densidade.

2.3.1 Deformações de crescimento longitudinais

As tensões de trações longitudinais geradas pelas novas camadas de células comprimem toda a madeira já existente no tronco da árvore e, em conseqüência, reduzem suas próprias deformações provocadas por este tipo de solicitação (JACOBS, 1939 também citado por KUBLER, 1987). Este efeito cumulativo altera as deformações de tração iniciais, a cada distância (r) a partir da medula, de tal forma a impor deformações de compressão crescentes ao centro da madeira. As forças de compressão no centro são contrabalançadas com as de tração próximas à casca, em cada fase do crescimento (KUBLER, 1987), para manter a condição de equilíbrio.

BOYD (1950a), segundo ARCHER (1986a), foi o primeiro autor a apresentar uma expressão matemática sobre as deformações de crescimento acumuladas no tronco de uma árvore.

Partindo da equação determinada por JACOBS (1945), o qual, analisando os seus dados experimentais pelo método dos mínimos quadrados, apresenta a relação abaixo também ilustrada na Figura 25:

$$\varepsilon_l = \frac{0,00364}{\left[\frac{d}{25,4} \right]^{0,9250}}$$

$$\varepsilon_l = \frac{0,07254}{d^{0,9250}}$$

onde,

ϵ_l = deformação longitudinal compressiva (deformação específica) induzida por uma camada de células de espessura radial unitária sobre toda a madeira compreendida no interior desta camada (valor adimensional); e

d = diâmetro da árvore ou da camada de células de interesse (mm).

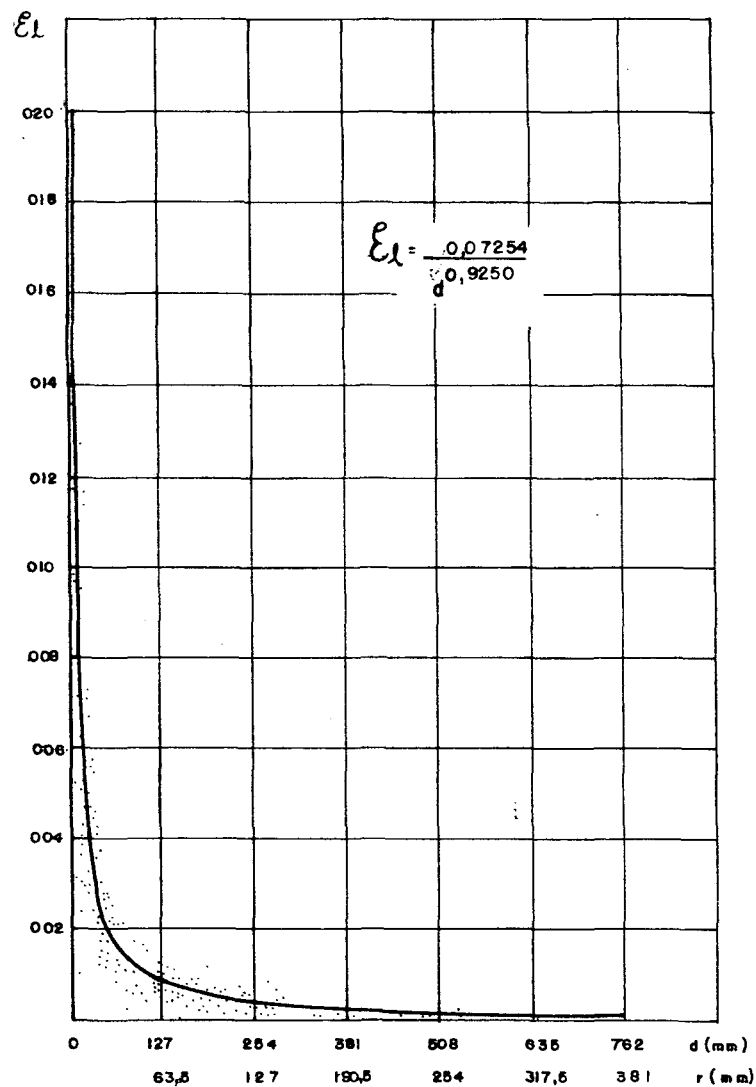


FIGURA 25. DEFORMAÇÃO LONGITUDINAL COMPRESSIVA (ϵ_l), EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO DA ÁRVORE OU DE QUALQUER PONTO DIAMETRAL (r) DE INTERESSE (JACOBS, 1945).

BOYD toma a equação equivalente:

$$d\varepsilon_l = \frac{0,07254}{(2r)^{0,9250}} \cdot \frac{dr}{25,4}$$

$$d\varepsilon_l = \frac{0,001504}{r^{0,9250}} \cdot dr$$

onde,

r = raio da árvore ou da camada de células de interesse (mm); e

$d\varepsilon_l$ = incremento longitudinal de deformação associado com o incremento dr acrescido ao raio exterior “ r ”.

A integração desta última equação concorda com a conclusão emanada por JACOBS (1945), segundo a qual, sendo a curva da Figura 25 ilustrativa da razão de compressão em função do diâmetro (ou do raio), a quantidade total de compressão entre quaisquer dois diâmetros ou raios é representada pela área sob a curva compreendida entre eles.

$$\varepsilon_l = \int_{r_1}^{r_a} \frac{0,00154}{r^{0,9250}} \cdot dr$$

$$\varepsilon_l = 0,00154 \int_{r_1}^{r_a} r^{-0,9250} \cdot dr$$

$$\varepsilon_l = 0,02005 (r_a^{0,075} - r_1^{0,075})$$

Entretanto, BOYD considerando ainda que cada camada de células inicialmente desenvolve uma deformação de tração “ ε_l^0 ”, os primeiros incrementos de deformação de compressão são contrabalançados e a deformação residual compressiva total, em qualquer camada, é aquela determinada através da última equação obtida, descontado deste valor “ ε_l^0 ”. Adotando ainda o sinal negativo para indicar a deformação de compressão, tem-se:

$$\varepsilon_l = \varepsilon_l^0 - 0,02005 (r_a^{0,075} - r_1^{0,075})$$

onde,

ε_l = deformação residual longitudinal compressiva total em qualquer camada de crescimento (valor adimensional);

ε_l^0 = deformação específica inicial de tração desenvolvida na periferia (valor adimensional);

r_a = raio da árvore (mm); e

r = raio correspondente ao ponto para o qual a avaliação da deformação é desejada (mm).

Através desta última equação é possível determinar a deformação residual longitudinal compressiva, imposta a qualquer raio “ r ”, pelas sucessivas camadas de células externas a ele, quando a madeira cresce deste raio “ r ”, até o raio “ r_a ” (Figura 26).

JACOBS (1939, 1945), examinando a contração média de sarrafos retirados na periferia de pranchas diametraais de árvores com consideráveis variações diamétricas, determina não haver correlação entre os diâmetros e as correspondentes contrações medidas. Baseado nesta observação ele conclui ser provável que cada nova camada de madeira desenvolva a mesma tensão de tração durante toda a vida da árvore.

Na opinião de KUBLER (1987), esta conclusão sobre a constância das deformações periféricas durante toda a vida da árvore, constitui uma das mais importantes descobertas nos estudos de tensões de crescimento, juntamente com a constatação de origem destas tensões na camada cambial. As incontestáveis conclusões de JACOBS baseiam-se em medições de deformações longitudinais em mais de 200 toras de *Eucalyptus gigantea* (*Eucalyptus delegatensis*) e nos troncos de muitas outras espécies.

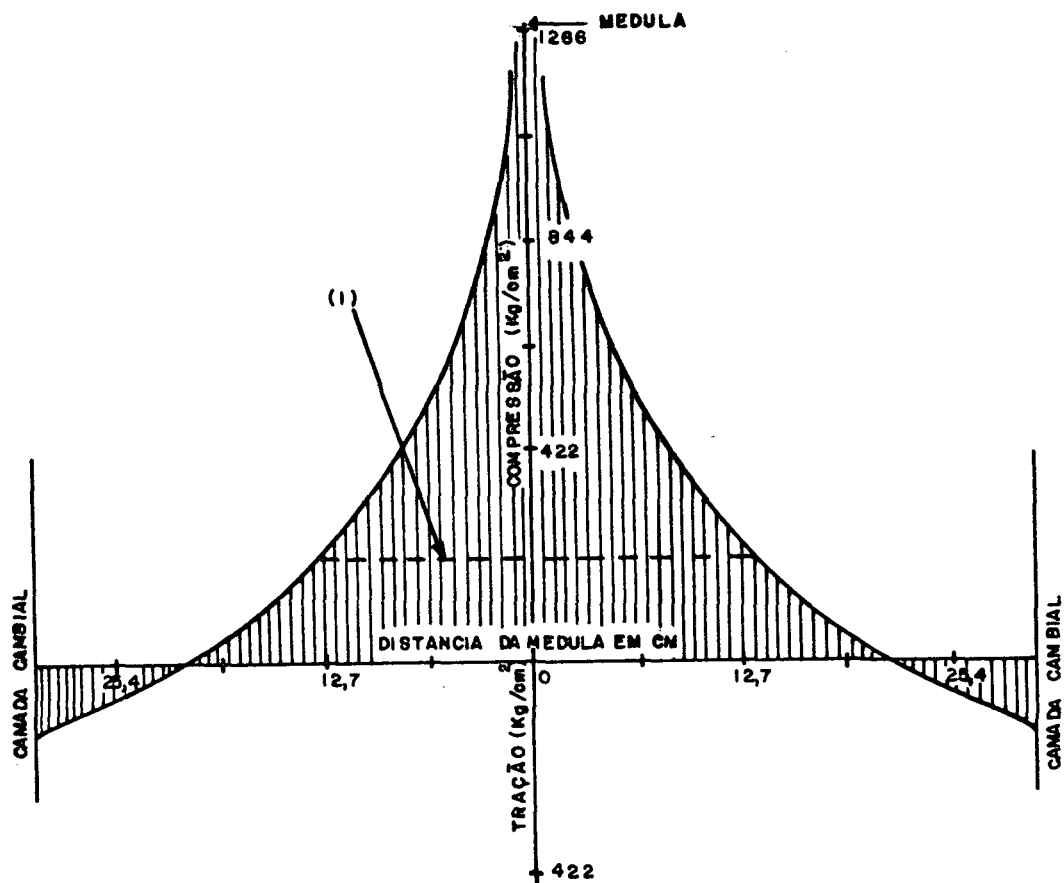
O valor médio da deformação específica inicial ($\varepsilon_i^0 = 0,0008$), correspondente a aproximadamente 84kg/cm^2 para a espécie de *Eucalyptus gigantea*, é utilizado por vários autores.

BOYD (1950b), por exemplo, representa a curva teórica de distribuição de tensões longitudinais de crescimento, de acordo com sua equação determinada em 1950a, utilizando o valor de $\varepsilon_i^0 = 0,0008$ determinado por JACOBS, conforme Figura 26.

POST (1979a) relata a derivação do modelo de KUBLER (1959b), baseado em considerações de equilíbrio.

Quando uma nova camada de células é incorporada a uma árvore de raio inicial igual a “ r_a ”, esta camada desenvolve uma força de tração longitudinal igual à sua tensão de

crescimento (σ_i^0) multiplicado por sua seção transversal (aproximadamente tomada como $2r_a\pi\Delta r$).



$$\sigma_i = \epsilon_i \cdot E_i$$

$$\epsilon_i = \epsilon_i^0 - 0,02005 (r_a^{0,075} - r^{0,075})$$

$$\sigma_i = 182.780 \text{ kg/cm}^2$$

$$\epsilon_i^0 = 0,0008$$

$$r_a = 30,48 \text{ cm.}$$

$$r = \text{valor variável entre zero e } 30,48 \text{ cm.}$$

(1) Valor atual aproximado da tensão de compressão = tensão teórica reduzida do efeito de longa duração de carga

FIGURA 26. DISTRIBUIÇÃO TEÓRICA DA TENSÃO DE CRESCIMENTO RESIDUAL LONGITUDINAL (σ_i) AO LONGO DO DIÂMETRO DE UMA ÁRVORE DE *Eucalyptus regnans*, DE ACORDO COM MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO POR BOYD (1950a) E APRESENTADO POR BOYD (1950b).

A soma das forças resultantes devem igualar-se para satisfazer a condição de equilíbrio estático:

$$\sigma_l^0 (2r_a \pi \Delta r) + \Delta \sigma_l (\pi r_a^2) = 0$$

ou

$$\Delta \sigma_l = - \frac{2\sigma_l^0 \Delta r}{r_a}$$

A tensão em qualquer camada de células (σ_l) situada a um raio “ r ” é igual à tensão de crescimento próprio quando do seu amadurecimento (σ_l^0), acrescida da soma das alterações em tensões que ocorrem quando cada camada subsequente de células é incorporada à árvore. Este estado de tensão pode ser expresso da seguinte forma:

$$\sigma_l = \sigma_l^0 + \sum_{r'=r}^{r_a} \Delta \sigma_l$$

onde, “ r ” corresponde a qualquer raio da árvore entre “ r ” e “ r_a ”.

Substituindo o valor de $\Delta \sigma_l$ obtido acima, nesta última equação, tem-se:

$$\sigma_l = \sigma_l^0 + \sum_{r'=r}^{r_a} \left[\frac{-2\sigma_l^0 \Delta r}{r'} \right] = \sigma_l^0 - 2\sigma_l^0 \sum_{r'=r}^{r_a} \frac{\Delta r}{r'}$$

Tomando-se o limite quando Δr tende a zero, tem-se:

$$\sigma_l = \lim_{\Delta r \rightarrow 0} \sigma_l^0 - 2\sigma_l^0 \sum_{r'=r}^{r_a} \frac{\Delta r}{r'} = \sigma_l^0 - 2\sigma_l^0 \lim_{\Delta r \rightarrow 0} \sum_{r'=r}^{r_a} \frac{\Delta r}{r'}$$

$$\sigma_l = \sigma_l^0 - 2\sigma_l^0 \int_{r'=r}^{r_a} \frac{dr}{r'} = \sigma_l^0 - 2\sigma_l^0 (\ln r_a - \ln r)$$

ou, de forma mais simples:

$$\sigma_l = \sigma_l^0 \left[1 + 2 \ln \frac{r}{r_a} \right]$$

Esta equação determina a magnitude da tensão longitudinal de crescimento (σ_l), em qualquer raio (r), e em função da tensão inicial de tração (σ_l^0), desenvolvida na periferia, e do raio externo (r_a) da árvore.

Pela Lei de HOOKE, ($\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$) obtém-se a correspondente equação de deformações específicas, mais amplamente divulgada na literatura (Figura 27):

$$\varepsilon_l = \varepsilon_l^0 \left[1 + 2 \ln \frac{r}{r_a} \right]$$

onde:

ε_l = deformação residual longitudinal (valor adimensional);

ε_l^0 = deformação específica inicial de tração desenvolvida na periferia (valor adimensional);

r = raio correspondente ao ponto para o qual a avaliação de deformação é desejada (mm); e

r_a = raio da árvore (mm).

ARCHER (1986a) reporta que, segundo KUBLER (1959b), para satisfazer a condição de equilíbrio, o valor de ε_l^0 deve ser tomado conforme indicado abaixo:

$$\varepsilon_l^0 = 0,092 \left[\frac{r_a}{25,4} \right]^{0,075}$$

$$\varepsilon_l^0 = 0,072 \cdot r_a^{0,075}$$

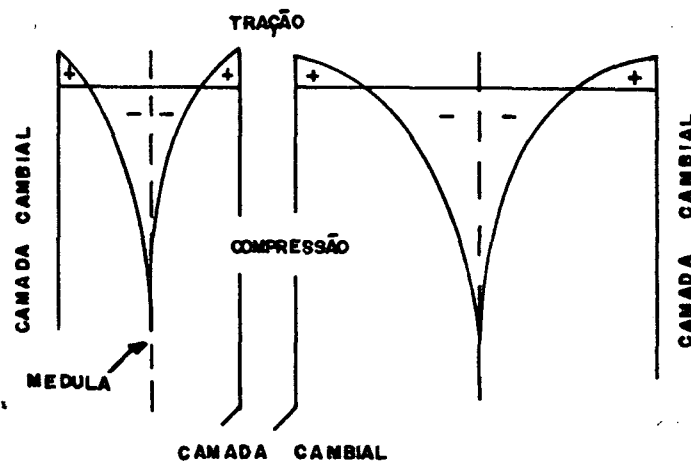


FIGURA 27. DISTRIBUIÇÃO TEÓRICA DA DEFORMAÇÃO DE CRESCIMENTO RESIDUAL LONGITUDINAL (ε_l), AO LONGO DO DIÂMETRO DO TRONCO DE UMA ÁRVORE, DE ACORDO COM MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO POR KUBLER (1959b). a. TRONCO DE MENOR DIÂMETRO. b. TRONCO DE MAIOR DIÂMETRO (ADAPTADA DE KUBLER, 1987).

A verificação desta última colocação de ARCHER não conduz a resultados similares para vários exemplos considerados em relação à Figura 26, deixando concluir que algum erro deve existir na apresentação da equação $\varepsilon_i^0 = 0,072 \cdot r_a^{0,75}$. Também a dependência entre a deformação específica inicial de tração e o raio externo da árvore não está de acordo com o próprio KUBLER (1987), que considera a constância de ε_i^0 em relação ao crescimento da árvore como uma das mais importantes conclusões nos estudos de tensões de crescimento, conforme comentado anteriormente.

É interessante comentar ainda as observações de KUBLER (1959b), conforme apresentado por ARCHER (1986a), a respeito do valor da deformação de tração inicial determinada por JACOBS (1945), a qual foi utilizada para o traçado do gráfico da Figura 26 com o valor de 0,0008.

Na realidade JACOBS apresenta este valor como $0,00077 \pm 0,000034$, determinado para *Eucalyptus gigantea*. Utilizando o módulo de elasticidade desta espécie (aproximadamente $105 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$), obtém-se uma tensão de tração periférica da ordem de 80 kg/cm^2 .

Segundo KUBLER, as tensões longitudinais, obtidas pela equação por ele derivada $\left[\sigma_l = \sigma_i^0 \left(1 + 2 \ln \frac{r}{r_a} \right) \right]$, apresentam um equilíbrio próprio em relação à forma cilíndrica completa de um tronco de árvore, mesmo no caso de remoção de pranchas diametraais, as quais sofrem uma expansão uniforme (Itens 2.2.1.2.1 e 2.3.1.1). Neste caso, utilizando novamente argumentos de equilíbrio, KUBLER considera que a tensão na prancha é aumentada de um valor igual à tensão de tração inicial (σ_i^0). Assim, as trações longitudinais determinadas por JACOBS para sarrafos periféricos (80 kg/cm^2), correspondem a uma tensão de tração na prancha igual à metade deste valor (40 kg/cm^2).

Raciocínio análogo deve ser desenvolvido para os resultados de MAYER-WEGELIN & MAMMEM (1954), citados por ARCHER, os quais determinando o valor de $\varepsilon_i^0 = 0,0007$ para *Fagus sylvatica*, apresentam um valor da tensão periférica da árvore de

35 kg/cm². Considerando-se o valor do MOE de aproximadamente 100 x 10³ kg/cm² desta espécie, obtém-se uma tensão de tração inicial igual a 70 kg/cm².

Os experimentos de MAYER-WEGELIN & MAMMEM, portanto, essencialmente confirmam os resultados de JACOBS.

Diferentes autores, como POST (1979a), limitam-se apenas a observar que os dois modelos, considerados com fins à representação da distribuição das deformações específicas longitudinais no interior de uma árvore, são similares. O próprio KUBLER (1987) considera os dados de BOYD (1950a) muito próximos aos determinados pela equação de KUBLER (1959b).

Em favor da precisão da equação proposta no seu modelo de 1959b, KUBLER (1987) cita as medições de deformações efetuadas por JACOBS (1939 e 1945) em 200 árvores de *Eucalyptus gigantea*. Pequenos desvios são esperados em função do método da prancha diametral conter maior proporção de madeira juvenil do que de madeira adulta, em relação ao tronco de uma árvore, ao que corresponde menores deformações de compressão. Também a possibilidade de ocorrência de deformações plásticas no centro de árvores de maiores diâmetros, provocando a ocorrência de “cerne quebradiço”, tem sua significância. Deve também ser considerado que as distribuições de deformações específicas, obtidas em poucas amostras por árvore, podem variar bastante para a devida confirmação da equação.

ARCHER (1986a) salienta a grande aceitação do modelo de KUBLER (1959b), considerando a madeira como um material de comportamento elástico isotrópico (GILLIS, 1973). Também representa uma boa aproximação dos resultados encontrados, utilizando modelos cilíndricos ortotrópicos (ARCHER & BYRNES, 1974).

A distribuição geral de tração próxima à periferia e de compressão no centro da árvore é comprovada para uma variedade de espécies estudadas por diferentes autores (WATANABE, 1944; JACOBS, 1945; NIKOLOV et al, 1967 e 1968; KIKATA, 1972; OKUYAMA & KIKATA, 1975c; SAURAT, 1977; POST, 1979a; etc., e naturalmente por BOYD, 1950a e KUBLER, 1959b), sendo alguns destes autores citados por KUBLER (1987).

A transição do estado de tração longitudinal periférica para compressão longitudinal

central, considerando a distância radial a partir da medula (r), em relação ao raio da árvore (r_a), ocorre à $0,6065r_a$ pela equação de KUBLER (1959b). Pelo gráfico de BOYD (1950a) para *Eucalyptus regnans*, à aproximadamente $0,7r_a$. WILHELMY & KUBLER (1973a) determinam o valor de $0,6r_a$ em experimentos realizados com *Quercus rubra*. SWACZNA (1979a e b), citados por KUBLER (1987), encontram $0,45r_a$ para *Fagus sylvatica*; e CHARDIN & SALES (1983a e b) determinam valores entre $0,67$ e $0,75$ para *Eperua falcata*, *E. grandifolia*, *E. rubiginosa* e “Beech”.

KUBLER (1987) cita alguns experimentos, ou parte deles, que não concordam com sua equação de 1959b, mas também relata sobre as condições especiais do material testado (WATANABE, 1944; SAURAT & GUÉNEAU, 1976 e SAURAT, 1977). Por outro lado, a distribuição radial de tensões computadas por GILLIS (1973), BECK (1974) e SASAKI et al. (1981a) são praticamente idênticas, particularmente com referência à transição do estado de tração para compressão.

Os modelos matemáticos de BOYD e KUBLER constituem apenas uma aproximação da distribuição real existente dentro de uma árvore, satisfazendo a objetivos gerais. Modelos mais rigorosos de precisões diversas, incluindo outras variáveis e/ou efeitos que interferem no processo, são analisados por diferentes autores: GIORDANO et al. (1969), ARCHER (1976, 1979, 1981, 1985 e 1986a), ARCHER & BYRNES (1974), OKUYAMA & KIKATA (1975a), POST (1979a e b), VENDHAN & ARCHER (1977), BANDYOPADHYAY & ARCHER (1979), GILLIS & HSU (1979) e SASAKI et al. (1981a e b), alguns destes citados por KUBLER (1987) e ARCHER (1986a). Este último autor merece destaque pela consideração da maioria dos modelos propostos em um único trabalho.

Entre as variáveis e/ou efeitos diversos, incluídos em outros modelos, podem ser citados: presença da medula, que não gera tensões nem resiste às mesmas; inclinação da grã, ou da árvore, que conduz a uma distribuição assimétrica de tensões; configuração geométrica e formação propriamente dita do tronco de uma árvore; peso próprio incluindo a copa; variação da tensão de tração periférica inicial e do módulo de elasticidade, com o diâmetro e a altura do tronco; influência dos efeitos das tensões de crescimento transversais (Razão de

Poisson); deformações visco-elásticas, plásticas e outros caracteres anisotrópicos, não homogêneos e inelásticos do material madeira.

2.3.1.1 Deformações de crescimento longitudinais parciais ocorrentes no desdobro de toras em pranchas

No item 2.2.1.2.1 foi observado que os métodos de determinação das deformações de crescimento longitudinais, que se iniciam com uma prancha, têm como resultado deformações de tração de magnitude maiores na periferia e de compressão menores próximo à medula, em comparação com aquelas realmente existentes, em função de um aumento uniforme do comprimento da prancha.

Este aumento é explicado pela maior proporção existente em uma prancha do que em uma tora de madeira em estado de compressão (madeira central que tende a expandir-se com a liberação das tensões quando do desdobro da tora) em relação à madeira em estado de tração (madeira periférica que tende a contrair-se).

As medições de POST (1979a), em uma única árvore de *Fraxinus americana*, ilustram bem este fato através do aumento do comprimento de toda a prancha, após o desdobro, em relação ao seu mesmo comprimento medido quando ainda dentro da tora. Apenas deformações específicas de compressão são observadas (Figura 28):

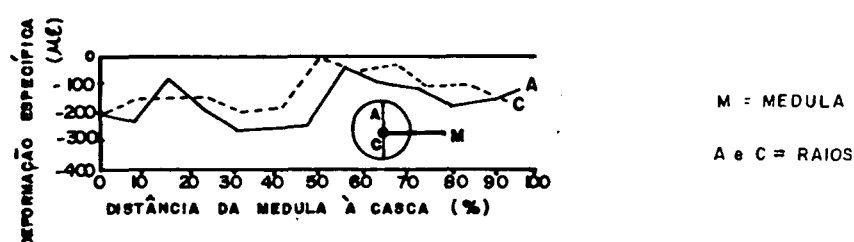


FIGURA 28. DISTRIBUIÇÃO DE DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO RESIDUAIS LONGITUDINAIS EM DIFERENTES POSIÇÕES RADIAIS DE UMA PRANCHA DIAMETRAL, PROVOCADA PELO DESDOBRAMENTO DE UMA TORA DE *Fraxinus americana* (POST, 1979a E APRESENTADA POR ARCHER, 1986a).

2.3.1.2 Variação das deformações de crescimento longitudinais ao longo do comprimento de um sarrafo

No item 2.2.1.2.5 foi mencionado sobre a possibilidade de observação das alterações que ocorrem nas deformações de crescimento longitudinais de um sarrafo, quando do processo de liberação de tensões, ou seja, durante o próprio processo de desdobro. Os valores obtidos são ilustrados na Figura 29, sob o comentário “posteriormente à BEGE (1982)”, conforme apresentado por ARCHER (1986a):

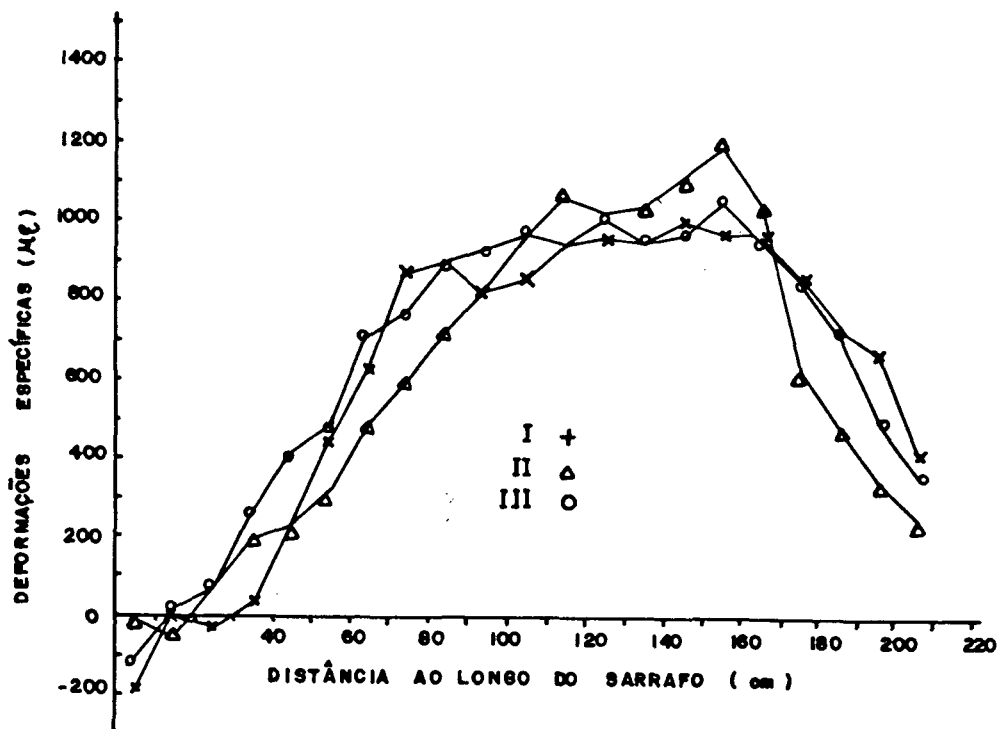


FIGURA 29. VARIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO RESIDUAIS ESPECÍFICAS AO LONGO DO COMPRIMENTO DE SARRAFOS CORTADOS NA PERIFERIA DE TORAS DE *Fagus sylvatica*. I, II E III INDICAM NÚMEROS DE TORAS SUCESSIVAS OBTIDAS AO LONGO DE UM MESMO TRONCO (ARCHER, 1986a).

As deformações registradas a cada 10cm de corte longitudinal refletem a influência da liberação parcelada das tensões de crescimento de forma bastante similar para os três sarrafos analisados.

Próximo aos extremos do sarrafo as deformações decrescem rapidamente, mostrando o efeito de liberação de tensões devido à serragem transversal quando da obtenção da tora. Na porção central, o nível de deformações é razoavelmente constante e da mesma ordem de grandeza das deformações longitudinais periféricas obtidas através de outras técnicas. No interior da árvore em pé estas deformações devem ser da ordem de $1.000\mu\epsilon$.

2.3.2 Deformações de crescimento transversais

As deformações de crescimento transversais originam-se na camada de células em maturação com as deformações tangenciais periféricas, as quais são continuamente renovadas de um mesmo valor durante toda a vida da árvore (JACOBS, 1945). Em função do seu estado de compressão original, as novas camadas tendem a expandir-se diametralmente e, em consequência, puxam as camadas mais antigas já existentes no interior do tronco, aumentando o diâmetro destas últimas e diminuindo suas tensões de compressão. A porção central da madeira passa a ser submetida a uma tração tangencial crescente, a partir da ação cumulativa de arraste exercida pelas sucessivas novas camadas de crescimento.

Esta teoria de aparecimento das deformações de crescimento tangenciais compressivas de magnitude decrescente em direção ao centro da árvore, que se transformam em deformações de crescimento tangenciais de trações crescentes nas proximidades da medula (Figura 30), é igual, em princípio, à exposta para as deformações longitudinais ilustradas na Figura 27 (KUBLER, 1987).

Para entender as deformações radiais, KUBLER (1987) deixa de considerar a pressão radial exercida pela casca na camada cambial (pressão esta da ordem de $1/10$ da componente radial de compressão tangencial, segundo KUBLER e variando de $0,15$ a $1,7\text{kg/cm}^2$, segundo KRABBE, 1885). Nesta situação de crescimento, sem encontrar nenhuma resistência, não é desenvolvida nenhuma tensão nesta direção e, em consequência, a deformação radial na superfície do tronco é zero. Entretanto, a tendência de expansão

diametral de cada nova camada em maturação, exercendo uma força de arraste nas camadas anteriormente formadas, dão também origem às tensões radiais de forma crescente em direção à medula.

Analisando e criticando as derivações de modelos matemáticos referentes às tensões transversais apresentadas por BOYD (1950a) e, novamente, fazendo uso de argumentos de equilíbrio, KUBLER (1959a) propõe as equações abaixo transcritas, conforme apresentadas por ARCHER (1986a):

$$\sigma_r = \sigma_i^0 \ln \frac{r}{r_a}; \text{ e}$$

$$\sigma_t = \sigma_i^0 \left[1 + \ln \frac{r}{r_a} \right]$$

onde,

σ_r = tensão de crescimento radial de tração;

σ_t = tensão de crescimento tangencial de compressão periférica ou de tração tangencial nas proximidades da medula;

σ_i^0 = tensão tangencial compressiva desenvolvida na periferia do tronco ($r = r_a$);

r = raio correspondente ao ponto para o qual a avaliação de deformação é desejada; e

r_a = raio da árvore.

Os resultados obtidos satisfazem completamente às equações elásticas, conforme comprovado por GILLIS (1973). Entretanto, devem ser corrigidos quando modelos ortotrópicos (com $E_r \neq E_t$, por exemplo) forem considerados (ARCHER & BYRNES, 1974).

Novamente, fazendo uso da Lei de HOOKE $\left[\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \right]$, obtém-se a correspondente equação de deformação de crescimento tangencial específica: $\varepsilon_t = \varepsilon_i^0 \left[1 + \ln \frac{r}{r_a} \right]$. E, considerando as diferenças entre os módulos de elasticidade transversais, comentados por ARCHER & BYRNES, como sendo o MOE radial duas vezes maior do que o tangencial para

a maioria das espécies de madeira, KUBLER (1987) apresenta a equação da distribuição diamétrica das deformações de crescimento radiais específicas da seguinte forma:

$$\varepsilon_r = 0,5 \varepsilon_t^0 \ln \frac{r}{r_a}$$

onde,

ε_t = deformação de crescimento tangencial compressiva na periferia e de tração nas proximidades da medula (valor adimensional);

ε_r = deformação de crescimento radial de tração em toda a seção transversal (valor adimensional);

ε_t^0 = deformação tangencial compressiva desenvolvida na periferia do tronco (valor adimensional);

r = raio correspondente ao ponto para o qual a avaliação de deformações específicas é desejada (mm); e

r_a = raio da árvore (mm).

A Figura 30 apresenta os gráficos da distribuição de deformações transversais de acordo com os modelos matemáticos recém-analisados. O ponto de transição entre as deformações tangenciais de compressão e tração ocorre a uma distância $r = 0,368 r_a$, a partir da medula.

As equações derivadas por KUBLER (1959a) referem-se apenas às deformações primárias, originárias das tensões periféricas tangenciais compressivas. Deformações transversais secundárias podem ocorrer sendo provenientes de outras origens. Uma delas deve-se às componentes das deformações longitudinais oriundas do Efeito de Poisson.

BOYD (1950a), considerando a complexidade dos problemas envolvidos na derivação da influência deste Efeito de Poisson, apenas relata sobre os limites da influência produzida, fazendo uso das máximas tensões longitudinais observadas e das relações entre as constantes elásticas da madeira em suas três direções anisotrópicas. A máxima tensão circunferencial obtida em decorrência, sendo de apenas 7% daquelas devido à tensão de compressão periférica primária, é considerada de menor importância.

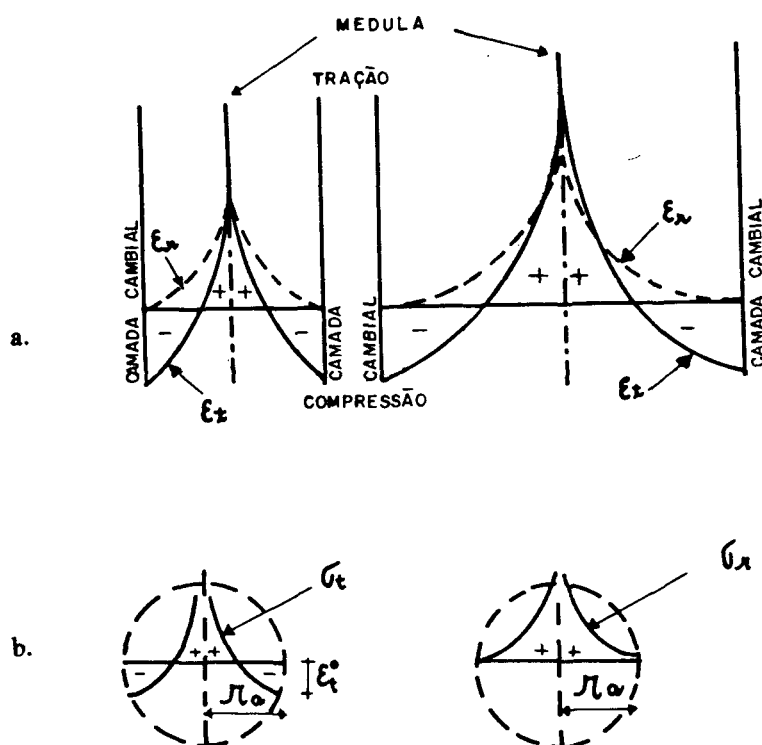


FIGURA 30. DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DAS DEFORMAÇÕES E TENSÕES DE CRESCIMENTO RESIDUAIS NA SEÇÃO TRANSVERSAL DO TRONCO DE UMA ÁRVORE. a. DEFORMAÇÃO RADIAL (ϵ_r ; - -) E TANGENCIAL (ϵ_t ; —) EM TRONCOS DE MENOR E MAIOR DIÂMETRO, RESPECTIVAMENTE (KUBLER, 1959a E APRESENTADA POR KUBLER, 1987). b. TENSÕES EQUIVALENTES: σ_r E σ_t , (APRESENTADA POR TANTICHAIBORIBOON & COOK, 1977a).

KUBLER (1987) apresenta uma boa revisão sobre o assunto. Os vários autores citados concordam com a existência de uma interação entre as tensões transversais primárias e aquelas produzidas pelo Efeito de Poisson em decorrência das tensões longitudinais também primárias. Esta interação diminui ou aumenta as tensões primárias transversais existentes em função de suas localizações periféricas ou centrais na seção transversal. BECK (1974) conclui que apenas árvores em pé, de grandes dimensões, podem sofrer conseqüências com o aparecimento de rachas radiais.

Uma terceira forma de ocorrência de tensões transversais secundárias tem origem

na liberação de tensões longitudinais pelos cortes transversais de derruba ou de obtenção de toras.

A Figura 12 ilustra as alterações que podem ocorrer no topo cortado de uma árvore ou tora em função da liberação das tensões longitudinais de compressão e de tração (Figura 27), provocando a expansão do seu centro e a contração de sua periferia, respectivamente. Em conseqüência, qualquer que seja a posição de uma peça de madeira na seção transversal de uma tora, existirá uma tendência de ocorrer uma maior expansão no seu lado mais próximo à medula do que naquele mais próximo à casca. Este último lado pode inclusive contrair se a peça estiver localizada na zona de tração periférica. Estes efeitos diferenciados de alterações de dimensões, provocados pelas tensões longitudinais, transformam estas últimas em tensões transversais, com conseqüente aparecimento de rachas radiais e empenamentos, conforme ilustrado na Figura 31:

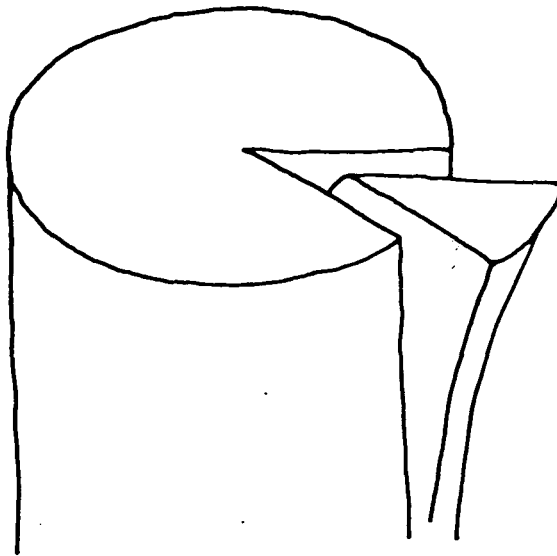


FIGURA 31. EFEITO DA TRANSFORMAÇÃO DE TENSÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS EM TRANSVERSAIS COM CONSEQÜENTE OCORRÊNCIA DE RACHAS RADIAIS E EMPENAMENTOS EM UMA PEÇA DE MADEIRA EM FORMA DE CUNHA (WILHELMY & KUBLER, 1973a).

As tensões primárias de compressões tangenciais na periferia com as suas transições em tensões tangenciais de tração, de magnitudes crescentes em uma área circular interna de

aproximadamente $1/3$ do raio (Figura 30), também podem provocar sozinhas o aparecimento de rachas radiais a partir da medula. De acordo com KUBLER & CHEN (1974), estas rachas ocorrem usualmente em árvores com cerca de 60cm de diâmetro, para madeiras mais densas, e entre aproximadamente 90 a 120cm, para as menos densas.

O efeito combinado das tensões primárias e secundárias agravam o problema (principalmente ao considerar-se o efeito cumulativo destas tensões quando, ambas, no centro de uma tora são de trações tangenciais), propiciando, quando do corte transversal, o desenvolvimento de rachas radiais em espécies de madeira mais densas, com 30cm de diâmetro, e a partir de 60cm nas madeiras menos densas.

Expansões ou contrações longitudinais em camadas cilíndricas, umas em relação às outras, provocam tensões de cisalhamento no plano tangencial-longitudinal. As camadas tendem a deslizar ao longo de outras (Figura 12) e esta tendência cria as tensões de cisalhamento. Em conjunto com as trações radiais de crescimento, estas tensões de cisalhamento poderiam dar origem às rachas anelares. Mas, afortunadamente, as tensões de cisalhamento máximas originárias de cortes transversais, que ocorrem nas zonas de transição entre as deformações de tração e de compressão (Figura 12), estão localizadas em zonas de menores trações radiais. Portanto, se rachas anelares são verificadas em toras, é muito provável que tenham sido provocadas apenas pelas tensões de tração primárias quando da árvore em pé, conforme freqüentemente indicado por descoloração de tecidos ou pelo impacto da árvore no solo quando de sua derruba. A única área onde o corte transversal pode provocar rachas anelares situa-se aproximadamente na metade do raio e próximo ao topo da tora, local onde as tensões de cisalhamento e as trações radiais ainda têm magnitudes consideráveis (WILHELMY & KUBLER, 1973a).

2.3.2.1 Obtenção de discos de madeira sem a formação de rachas

Considerando que o corte transversal alivia as tensões apenas sobre uma pequena

distância ao longo do comprimento de uma tora, a tensão transversal secundária gerada pelo processo diminui com esta distância e as rachas geralmente são restritas ao topo recém-cortado, KUBLER & CHEN (1974) exploram estes fatos com fins à obtenção de discos de madeira sem rachas.

Fazendo uso das tensões longitudinais de crescimento próximas à casca (70 kg/cm^2), valor que consideram apropriado para madeiras densas de angiospermas, dos módulos de elasticidade (longitudinal, radial e tangencial) de *Quercus rubra* e das devidas Razões de Poisson, KUBLER & CHEN determinam as tensões transversais secundárias e as correspondentes deformações, apresentando suas distribuições ao longo de comprimentos variados de seções do tronco de uma árvore, conforme Figura 32.

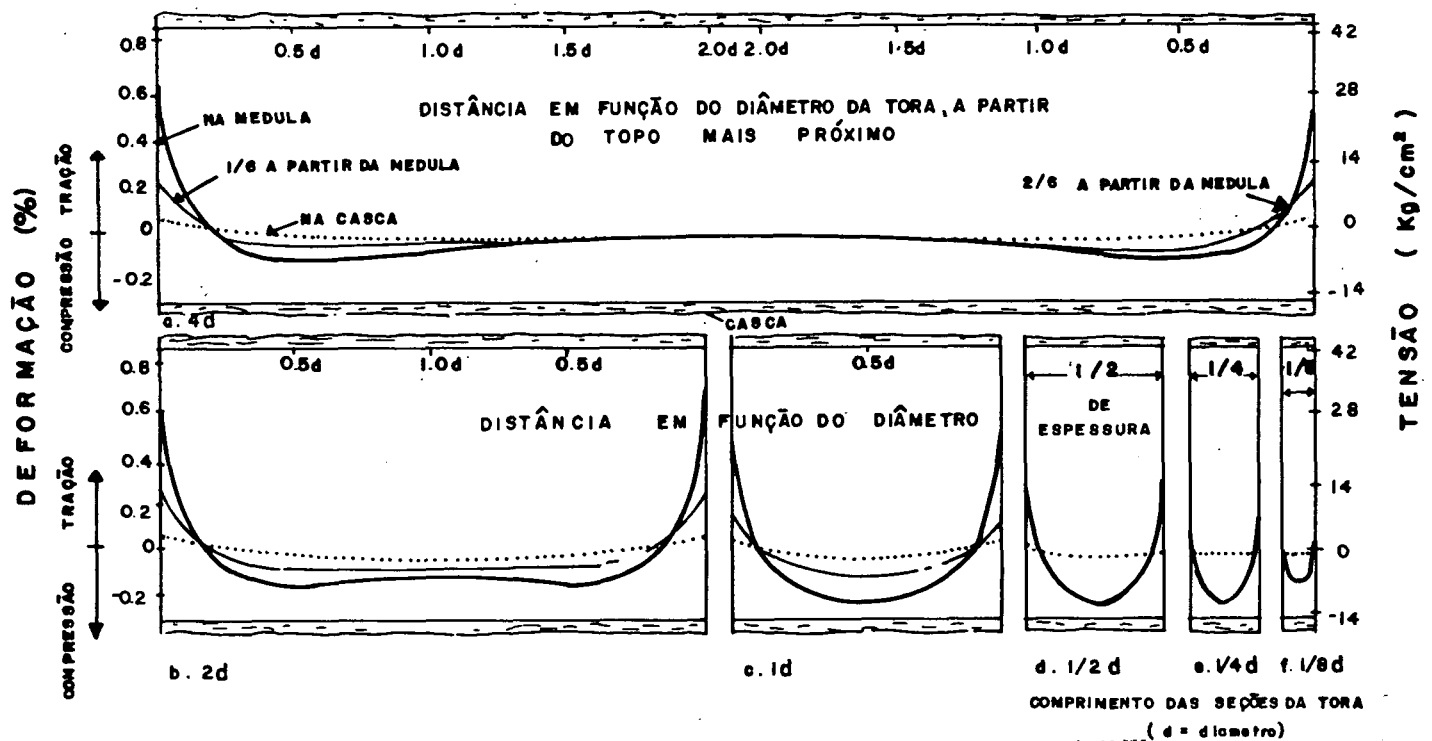


FIGURA 32. DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES TANGENCIAIS AO LONGO DE SEÇÕES LONGITUDINAIS DE TRONCOS DE DIVERSOS COMPRIMENTOS EM FUNÇÃO DO ALÍVIO DAS TENSÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS PELO CORTE TRANSVERSAL. a. TORA COM COMPRIMENTO IGUAL A 4 DIÂMETROS. b, c, d, e, f. SEÇÕES DE TORA COM COMPRIMENTOS VARIADOS EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO (KUBLER & CHEN, 1974).

As tensões secundárias e suas deformações associadas são maiores na seção de topo próximo à medula, onde as rachas iniciam-se, decrescendo rapidamente à medida que se distanciam desta posição. Na tora maior (*a*), a tração iguala a zero a uma distância de apenas 0,25d a partir do topo. Neste ponto inicia-se a compressão, a qual alcança seu valor máximo a aproximadamente 0,5d, para finalmente igualar-se a zero a aproximadamente 1,5d de distância do topo.

Nas seções menores (*b*, *c*, *d*, *e*, *f*), as deformações são menores e alteram-se mais rapidamente à medida que se afastam do topo em relação à tora (*a*). A tensão de tração crítica no topo de cada seção, próxima à medula, diminui ligeiramente para a seção de 2d de comprimento. Significantes decréscimos somente ocorrem para as seções da tora com comprimentos iguais ou menores do que 1d. A partir de comprimentos de seções iguais ou menores que 0,25d, as tensões são praticamente desprezíveis de tal forma que, para uma tora de 60cm de diâmetro, as deformações que ocorrem em seções de 15cm de comprimento podem ser desconsideradas.

BOYD (1950a) propõe um método aproximadamente similar ao analisado, com fins à eliminação de rachas em discos de madeira. Escolhida a seção da tora para estudo, normalmente centrada ao longo do seu comprimento, corta-se sucessivas pequenas seções, alternadas em relação aos dois topos e mantendo a seção de controle aproximadamente centrada.

À medida que as pequenas seções, também em forma de discos, são removidas a partir de cada topo, a energia de deformação remanescente tende a escoar para o novo topo, fazendo com que novas rachas ocorram. Ao aproximar-se da seção de controle, entretanto, as rachas diminuem de tamanho e, quando ela é isolada, virtualmente toda a energia de deformação é liberada e absorvida pelas rachas que ocorreram nos discos de rejeito. A seção é obtida quase sem nenhuma racha.

KUBLER & CHEN (1974), baseados em suas análises apresentadas nesta Revisão, consideram que o procedimento de corte de discos alternados em função dos dois topos de uma tora é de pouca validade, pois as rachas decrescem somente a partir de seções com dois

diâmetros de comprimento. Desta forma, é melhor primeiramente dividir a tora em várias seções de três diâmetros de comprimento cada uma e, a partir de então, cortar discos de forma alternada entre os dois topos de cada seção.

2.4 Magnitude e variabilidade das deformações específicas de crescimento

As deformações de crescimento são muito maiores nas madeiras de angiospermas do que nas de gimnospermas, sendo as espécies de *Eucalyptus* spp. uma das mais afetadas.

As deformações longitudinais periféricas médias para *Pinus resinosa* são da ordem de $105\mu\epsilon$ (HALL, 1967), $300\mu\epsilon$ para *Pinus silvestris* (KUBLER, 1959b) e $220\mu\epsilon$ para *Pinus* spp. (KIKATA, 1974a), citadas por KUBLER (1987), em comparação com a média de $710\mu\epsilon$ para *Eucalyptus* spp. (Tabela 1).

Embora as razões destas diferenças ainda não estejam bem esclarecidas, KUBLER (1987) acredita na possibilidade de que as espécies de gimnospermas tenham uma tendência própria de orientação, a fim de manter seus crescimentos verticais. Somente em casos de drásticas alterações de luminosidade ou quando forças externas puxam as árvores para uma posição inclinada, havendo a ocorrência de madeira de reação, é que suas deformações de crescimento são comparáveis às existentes nas madeiras de angiospermas.

As deformações longitudinais de crescimento no interior de uma árvore de *Chamaecyparis obtusa* (gimnosperma) variam aproximadamente entre os máximos de $400\mu\epsilon$ em tração e $400\mu\epsilon$ em compressão. Na presença de madeira de compressão, estes valores alteram-se para $500\mu\epsilon$ e $800\mu\epsilon$, respectivamente (WILSON & ARCHER, 1977).

ARCHER & WILSON (1982), estudando o controle de movimentos de galhos (ação da madeira de compressão) em *Pinus strobus* L., determinam o surpreendente valor de $8000\mu\epsilon$ como deformação longitudinal de compressão periférica.

Considerando as publicações existentes, as espécies de *Eucalyptus* spp. e *Fagus sylvatica*, seguidas de *Quercus* spp., são as mais estudadas. Suas deformações específicas são

relativamente altas, mas algumas outras espécies (*Bertholletia excelsa*, *Gilbertiodendron dewevrei* e *Piptadeniastrum africana*, citadas respectivamente por LUTZ & PANZER, 1969; KIKATA, 1974b e GUÉNEAU & KIKATA, 1973) são listadas por KUBLER (1987) como possuindo deformações maiores. A *Bertholletia excelsa*, de origem brasileira, é listada com uma deformação de crescimento longitudinal periférica média de $3.800\mu\epsilon$, obtida em duas árvores (LUTZ & PANZER, 1969). Este valor é muito mais elevado do que os obtidos para as três primeiras espécies mencionadas.

As deformações de crescimento variam bastante em uma mesma espécie de madeira e portanto, valores médios obtidos para poucas amostras, podem não indicar a verdadeira média para a espécie (KUBLER, 1987).

Para exemplificar o nível desta variabilidade, NICHOLSON (1973b), determinando as tensões de crescimento longitudinais periféricas em 41 árvores de *Eucalyptus regnans*, encontra uma variação de 50 a 167 kg/cm^2 entre as médias de 10 medições por árvore, correspondente a 234%. A variação por árvore, considerando as 10 medições realizadas em volta da periferia de cada uma, é muito maior: 43 até a surpreendente marca de 2.300%. Para *Eucalyptus obliqua*, NICHOLSON reporta valores similares.

O desvio padrão determinado para *Fagus sylvatica*, por TRENARD & GUÉNEAU (1975), baseado em 430 medições periféricas realizadas em 86 árvores de várias regiões da França, é da ordem de $833\mu\epsilon$, quase da mesma magnitude da deformação específica longitudinal periférica média determinada de $973\mu\epsilon$. Dentro de uma mesma árvore, o desvio padrão de $458\mu\epsilon$ calculado é ainda muito elevado. Entretanto, esta alta variação está relacionada com a presença da madeira de tração, cuja deformação específica chega a ser 28 vezes maior do que a da madeira normal, medida no lado contrário de sua ocorrência no tronco (KUBLER, 1987). Esta também poderia ser a explicação para as elevadas variações detectadas por NICHOLSON (1973b), mas relativas altas deformações em árvores de troncos verticais e, em contraste, relativas baixas deformações em árvores ligeiramente inclinadas, são determinadas pelo autor. Para NICHOLSON, a magnitude das tensões longitudinais

periféricas não parecem ser função da verticalidade da árvore, embora seja provável que árvores inclinadas tenham maiores valores.

Deve-se ressaltar neste ponto as observações de POST (1979a) sobre a impossibilidade de garantir-se que uma árvore hoje ereta tenha assim estado durante toda a sua vida.

KUBLER (1987) observa que não é possível distinguir claramente entre a madeira de tração e a madeira normal fortemente tensionada, embora exista concordância entre vários autores quanto à associação entre deformações de crescimento de magnitudes médias elevadas e às tensões desenvolvidas em apenas um lado do tronco ou galho (madeira de reação): NICHOLSON (1971b), TRENARD & GUÉNEAU (1975), SAURAT & GUÉNEAU (1976), FERRAND (1982a) e MARIAUX & VITALIS-BRUN (1983), conforme ilustrado na Figura 33.

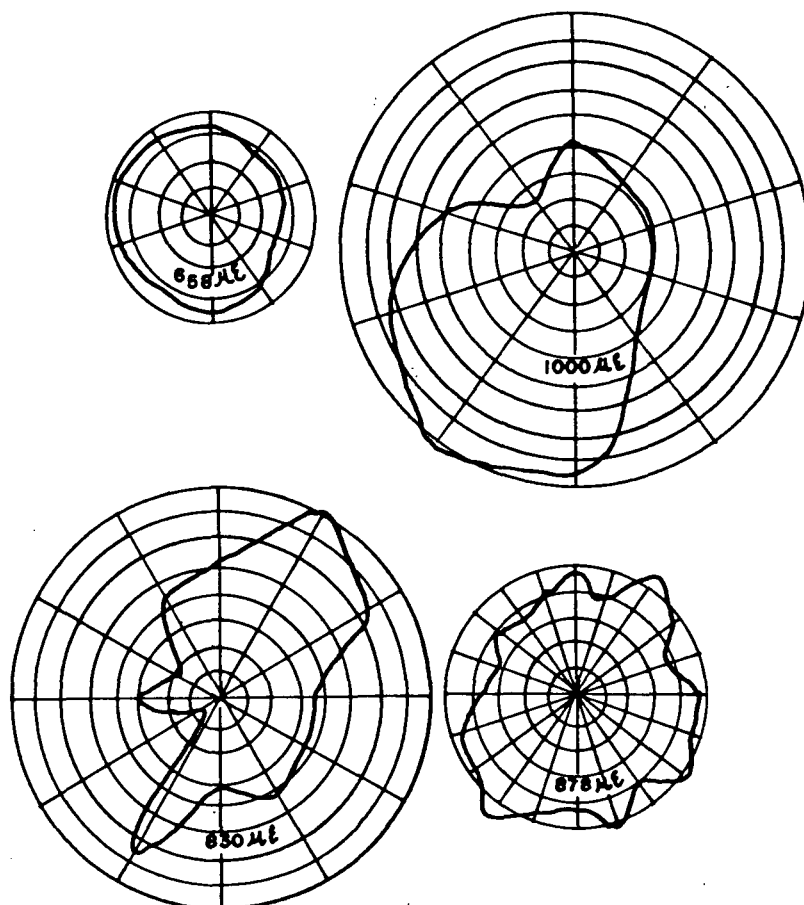


FIGURA 33. PADRÃO DAS DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS ESPECÍFICAS NA SUPERFÍCIE TRANSVERSAL DE TRONCOS DE *Eucalyptus regnans* COM 30 ANOS DE IDADE. A CADA ANEL DA FIGURA CORRESPONDE UMA DEFORMAÇÃO DE $200\mu\epsilon$, SENDO INDICADO O VALOR MÉDIO OBTIDO (NICHOLSON, 1971a E APRESENTADA POR KUBLER, 1987).

A variação das deformações de crescimento longitudinais periféricas com a altura da árvore ainda pode ser considerada incerta. Os resultados de YAO (1979) acusam um aumento até determinada altura da árvore (aproximadamente 7,6m), podendo ocorrer decréscimos posteriores, variações entre árvores e espécies testadas. CHAFE (1981) acusa um aumento de 2,5 a 5,0 e a 7,5m, respectivamente, nas suas medições em *Eucalyptus regnans* com 39 anos de idade. Em 1985, o mesmo autor estudando *Eucalyptus nitens* determina um decréscimo das deformações de 3 a 15m de altura.

Entretanto, diversos outros autores não confirmam a existência desta variação das deformações de crescimento periféricas com a altura da árvore: SASAKI et al. (1978) concluem pela quase constância de magnitudes a diferentes alturas de árvores normais de 12 espécies, inclusive em *Eucalyptus viminalis* Lab. OKUYAMA & SASAKI (1978) confirmam que as tensões residuais apresentam uma distribuição uniforme e aproximadamente igual, independentemente da altura, embora tenha sido observado diferenças entre lados opostos do tronco de três espécies, incluindo também o *Eucalyptus viminalis*. TRENARD & GUÉNEAU (1975), da mesma forma, determinam a constância das deformações a 1,3 e 3,3m do solo. SWACZNA (1979a) também não determina variação em *Fagus sylvatica*. Em estudos não publicados por NICHOLSON (s.d.), citado por KUBLER (1987), as deformações periféricas de *Eucalyptus regnans* são aproximadamente iguais em qualquer altura da árvore, contrariando as conclusões de CHAFE (1981).

Ao considerar-se alguns dos resultados acima comentados e de outros referentes a espécies de gimnospermas, KUBLER (1987) conclui que em um meio ambiente estável as deformações de crescimento periféricas são provavelmente independentes da altura da árvore.

Baseado em análises teóricas, ARCHER (1986a) sugere que as deformações de crescimento de gimnospermas devem iniciar seus desenvolvimentos com valores negativos negligenciáveis ou próximos de zero no início da estação de crescimento, alcançando valores máximos quando da formação do lenho tardio no final da mesma estação. Entretanto, nas angiospermas não deve ser esperado um aumento significativo na magnitude das deformações

em uma mesma estação, devido às pequenas variações dos ângulos microfibrilares dentro de um mesmo anel de crescimento de suas madeiras.

OKUYAMA et al. (1981) concluem que o aumento das tensões de crescimento na direção longitudinal é interrompido com a formação do lenho tardio, sendo a tensão mantida no tronco sem ocorrência de relaxamento. Da mesma forma, ocorre o aumento das tensões tangenciais, mas independentemente das longitudinais. SASAKI et al. (1978) observam alterações nas tensões periféricas durante as estações, mas também a constância de renovação das tensões iniciais durante cada período de crescimento. NICHOLSON et al. (1973) reportam sobre a possibilidade das tensões longitudinais variarem com o tempo, durante o período anual de crescimento, em suas medições em *Eucalyptus regnans* com 30 anos de idade.

CHAFE (1979b) considera a possibilidade de variação das tensões em função das estações do ano, fazendo ligações entre a maior tendência para a ocorrência de rachas com períodos de rápido crescimento ou de abundância de água. Em sua defesa, CHAFE cita as severas rachas que ocorrem em *Cryptocarya erythroxylon* durante as estações úmidas, em contraste com a boa qualidade da madeira desta espécie obtida em estações secas. Diferenças em níveis de tensões são avaliadas por HILLIS (s.d.) e WAUGH (s.d.) através de comunicações pessoais mencionadas pelo autor.

As pesquisas de NICHOLSON (1973b), ao contrário, indicam que o nível médio das tensões de crescimento longitudinais pode ser independente da razão de crescimento e de fatores ambientais, tais como: vento, densidade de parcelas e elevação de terrenos. MALAN (1984) comprova estes resultados ao constatar que a variação das tensões em *Eucalyptus grandis* são amplamente independentes de fatores ambientais. WAUGH (s.d.), em comunicação particular a CHAFE (1979), aceita a possibilidade da não existência de correlação entre altas tensões e rápido crescimento.

KUBLER (1987) conclui que na ausência de um novo estímulo reorientativo, as tensões de crescimento deveriam ser as mesmas na madeira do lenho primaveril e tardio em função da própria hipótese de suas origens. Não existe razão óbvia para que a contração das células em maturação (origem das tensões de crescimento) devam alterar-se de estação para

estação. Em caso de tensões uniformes, a madeira do lenho primaveril e tardio possuem a mesma resistência a deformações, alcançando a ruptura ao mesmo tempo, quando, por exemplo, sob a ação de fortes ventos.

Uma outra fonte de variabilidade das tensões de crescimento encontra-se nos diâmetros das árvores. Esta variação não se reflete na periferia desde que é comprovada a ausência de correlação neste sentido (Item 2.3). Entretanto, suas influências fazem-se sentir na magnitude das tensões no interior dos troncos das árvores. Maiores diâmetros significam maiores tensões de compressão longitudinais e de tração radiais próximos à medula, em função do efeito cumulativo de novas camadas. O aumento das tensões faz-se sentir mais rapidamente em árvores de menores diâmetros (CHAFE, 1979b), devido às menores seções existentes para redistribuições das tensões geradas na periferia.

Teoricamente, a principal diferença nas distribuições de tensões, encontradas entre troncos de diferentes diâmetros, está na declividade do gradiente de variação entre a periferia e a medula (Figuras 27 e 30).

A despeito das várias publicações existentes sobre o tema em pauta, conforme rapidamente ilustrado acima, as causas das enormes variações encontradas nos estudos das tensões de crescimento permanecem amplamente desconhecidas, principalmente ao considerar-se árvores perfeitamente eretas e normais.

2.4.1 Deformações longitudinais periféricas

Considerando que as tensões periféricas são renovadas de um mesmo valor em cada um de seus incrementos, conforme a hipótese mais aceita para suas origens, é mais fácil analisar suas magnitudes e variabilidades conforme tratado até o momento.

Neste caso, o discutido valor da deformação específica inicial de tração (ϵ_i^0), desenvolvida na periferia da árvore, postulado por JACOBS (1945) como da ordem de $0,00077 \pm 0,000034$ (Item 2.3), pode ser apreciado na Tabela 1 em unidades de microde-

formações ($770\mu\epsilon$), comparativamente com as determinações de outros autores para a espécie de *Eucalyptus* spp.

O valor de $\epsilon_i^0 = 770\mu\epsilon$ é obtido por JACOBS (1939 e 1945) como a média de contrações de sarrafos externos de inúmeras árvores testadas de *Eucalyptus gigantea*, após a verificação de que suas variações independem dos diâmetros ou das idades das árvores. Entretanto, esta variação, observada nos 12 exemplos apresentados por JACOBS, sendo da ordem de 330% (350 a $1.500\mu\epsilon$), é muito elevada, a exemplo de todos os dados referentes a deformações de crescimento apreciados pelo autor da presente tese.

Em confirmação à constância da renovação das tensões de tração na zona cambial, devem ser citadas as conclusões obtidas por SASAKI et al. (1978), quando do estudo de treze diferentes espécies de madeira, entre elas o *Eucalyptus vimnalis* Lab., incluído na Tabela 1.

TABELA 1. DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS PERIFÉRICAS DETERMINADAS POR DIFERENTES AUTORES PARA ALGUMAS ESPÉCIES DE *Eucalyptus* spp. (KUBLER, 1987).

Espécie de Madeira	Densidade TU: 12% (kg/m ³)	Idade da Árvore (anos)	Diâmetro (cm)	Quantidade de Medições		Método de Medição ⁽¹⁾	Deformação Específica (µε)				Autor	
				Árvores	por Árvore		Mínimo		Média	Máxima		
							Individual	Média		Individual		Média
<i>E. camaldulensis</i>	960	-	-	-	-	D	-	520	1.000	-	1.500	GIORDANO & CURRÓ (1972)
<i>E. citriodora</i>	960	-	-	2	5	K	-	-	820	-	-	GUÉNEAU & KIKATA (1973) ⁽²⁾
<i>E. gigantea</i> (= <i>E. delegatensis</i>)	680	-	0,3-71	≥ 200	-	D	-	-	770	-	-	JACOBS (1939)
<i>E. grandis</i>	610	≤ 8	≤ 25	-	-	D	-	-	200?	-	-	HARDIE (1974)
<i>E. obliqua</i>	680	75	40-70	12	10	N	-	530	730	-	1.160	NICHOLSON & DITCHBURNE (1973) ⁽³⁾
<i>E. obliqua</i>	680	70	41-71	12	≥ 10	N	280	500	810	2.750	1.250	NICHOLSON (1973b) ⁽³⁾
<i>E. regnans</i>	680	-	52	> 3	2?	E	> 500	-	> 810	> 1.000	-	BOYD (1950a)
<i>E. regnans</i>	680	39	-	5	12	N	-	500	600	-	757	CHAFE (1981)
<i>E. regnans</i>	680	31	33-51	41	≥ 10	N	135	355	760	3.245	1.185	NICHOLSON (1973b)
<i>E. regnans</i>	680	43	97-215	24	10?	N	-	-	645	-	-	WAUGH (1977)
<i>E. viminalis</i>	770	29	22	1	20?	K	290	-	668	1.308	-	SASAKI et al. (1978)

(1) Método de medição: D - Prancha diametral, K - KIKATA, N - NICHOLSON, E - Extensômetro.

(2) Outras fontes: GUÉNEAU & CHARDIN (1973), KIKATA & MIWA (1977) e KIKATA (1974a).

(3) Árvores dominantes, co-dominantes e intermediárias.

A Tabela 2 apresenta as tensões de crescimento iniciais de trações periféricas, correspondentes às deformações constantes na Tabela 1, a fim de fornecer uma idéia de suas magnitudes. Para tanto, utilizou-se a relação $\sigma = \epsilon E$, sendo o valor dos módulos de elasticidade obtidos de HILLIS & BROWN (1978):

TABELA 2. TENSÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS DE TRAÇÕES PERIFÉRICAS DETERMINADAS PARA ALGUMAS ESPÉCIES DE *Eucalyptus* spp.

Espécie de Madeira	MOE (10^3kg/cm^2)			Tensão de Tração Periférica Média (kg/cm^2)
	Mínimo	Máximo	Média	
<i>E. camaldulensis</i>	79,0	87,6	83,3	83
<i>E. citriodora</i>	127,4	140,6	134,0	110
<i>E. gigantea</i> (= <i>E. delegatensis</i>)	113,6	126,4	120,0	92
<i>E. grandis</i>	127,4	140,6	134,0	27?
<i>E. obliqua</i>	88,1	98,3	93,2	68
<i>E. obliqua</i>	88,1	98,3	93,2	75
<i>E. regnans</i>	127,4	140,6	134,0	109
<i>E. regnans</i>	127,4	140,6	134,0	80
<i>E. regnans</i>	127,4	140,6	134,0	102
<i>E. regnans</i>	127,4	140,6	134,0	86
<i>E. viminalis</i>	113,6	126,4	120,0	80

Os únicos valores de deformações e tensões de crescimento listados para *Eucalyptus grandis*, espécie de interesse desta tese, trazem o sinal de interrogação colocado pelo próprio KUBLER (1987), provavelmente devido a sua baixa magnitude em relação às demais espécies listadas de *Eucalyptus* spp.

Consultando a publicação de HARDIE (1974), autor responsável pela informação, verifica-se a citação de uma tensão compressiva de $2,55 \text{N/mm}^2$ (26kg/cm^2) e de uma tensão de tração igual a $3,04 \text{N/mm}^2$ (31kg/cm^2), determinadas através de medições de sarrafos obtidos de uma prancha diametral (método de JACOBS), em experimento realizado e não publicado por KORZENIOWSKI (1970).

Considerando o módulo de elasticidade de *Eucalyptus grandis* igual a

$134 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ (Tabela 2), as tensões acima correspondem a 194 e $231 \mu\epsilon$ de deformações longitudinais de compressão e de tração, respectivamente.

MALAN (1984) determina as deformações de crescimento longitudinais periféricas em duas árvores inclinadas de *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden, apresentando graficamente uma variação, em valores aproximados, entre 400 a $2.100 \mu\epsilon$, para os lados opostos dos troncos inclinados, sendo o menor destes valores situado no lado côncavo e o maior no convexo, ambos obtidos à altura do peito (aproximadamente 1,3m).

A partir da conclusão de que as tensões de crescimento periféricas estão relacionadas com as necessidades de suporte mecânico da árvore (NICHOLSON, 1973b citado por MALAN, 1984), pode-se explicar a variação de quase seis vezes entre os valores obtidos por MALAN.

Para *Eucalyptus regnans*, NICHOLSON (1973b) reporta valores de tensões de crescimento periféricas variando entre 19 kg/cm^2 para o lado inferior da inclinação da árvore e 460 kg/cm^2 para o lado superior. Em termos de deformação específica tem-se aproximadamente uma variação de 140 a $3.400 \mu\epsilon$.

2.4.2 Deformações longitudinais interiores ao tronco de uma árvore

JACOBS (1945) comenta que a estimativa da compressão total nas camadas mais internas da madeira exige uma interpretação cuidadosa. Em uma primeira aproximação, pode parecer que a compressão total liberada em um sarrafo, quando do seu corte de árvores de grandes diâmetros, fornece o valor desejado. Entretanto, é duvidoso assumir que esta liberação represente o encurtamento total a que a madeira interior tenha sido submetida, uma vez que não é conhecida a deformação permanente que possa ter ocorrido como resultado de um longo tempo de carregamento.

BOYD (1950a) confirma as expectativas de JACOBS ao submeter amostras de madeira obtidas em posições adjacentes aos locais de medição das deformações de cres-

cimento às mesmas deformações que foram recuperadas com a liberação de tensões, através de testes standards de curta duração de carga. As amostras, forçadas acima do limite elástico para alcançar as mesmas magnitudes das deformações de crescimento liberadas, comprovam que são submetidas a deformações plásticas quando no interior da árvore.

Na tentativa de dar uma solução ao problema, JACOBS propõe assumir que a expansão obtida na prancha, em decorrência da remoção dos dois sarrafos externos (método da “prancha diametral”), represente o encurtamento imposto ao tronco quando ele cresce a partir do correspondente diâmetro sem os dois sarrafos até o diâmetro incluindo os mesmos (diâmetro total da prancha).

Entretanto, como o próprio JACOBS cita não ter obtido provas conclusivas desta hipótese e não tendo sido a mesma explorada pelos demais autores consultados, deixa-se de apresentar maiores detalhes do procedimento, o qual envolverá inúmeras outras interferências ligadas às condições de crescimento da árvore.

Ao considerar a existência de pouquíssimas publicações referentes a medições de deformações de crescimento no interior de troncos de *Eucalyptus* spp., faz-se a opção por apresentar resultados característicos obtidos por diferentes autores como forma de comparação e avaliação de magnitudes e variabilidades encontradas.

Resultados típicos obtidos por JACOBS (1939) e comentados em todas suas publicações posteriores são apresentados na Tabela 3 para os diâmetros mínimo, médio e máximo das 12 árvores apresentadas como exemplo.

TABELA 3. DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS ESPECÍFICAS OBTIDAS PARA *Eucalyptus gigantea* (*Eucalyptus delegatensis*), PELO MÉTODO DA "PRANCHA DIAMETRAL" (RESULTADOS ILUSTRATIVOS DO EXPERIMENTO DE JACOBS, 1939).

Número do Sarrafo	Deformação Específica ($\mu\epsilon$) ⁽¹⁾				
	Diâmetro da Tora (cm) / Idade (anos)				
	1,7/2	7,7/7	14,4/28	24,1/28	27,8/28
1	+1.065	+1.200	+608	+516	+1.021
2	-1.063	-200	-203	+620	+714
3	+712	-1.200	-304	+310	+510
4	+2.141	-1.600	-1.113	0	+204
5		+200	-1.215 ⁽²⁾	-825	+102
6		+1.200	-1.113	-722	-306
7			-608	-1.134	-815
8			+304	-1.340 ⁽²⁾	-1.425
9			+405	-1.546 ⁽²⁾	-916 ⁽²⁾
10			+507	-1.237	-1.017
11				-824	-813
12				-515	-610
13				-103	-610
14				+103	-203
15				+1.237	-407
16				+1.651	+407
17					+509
18					+814
19					+1.221

(1) Cada incremento no comprimento do sarrafo após o seu corte da prancha é dividido pelo seu próprio comprimento para obtenção da deformação específica.

(2) Centro da prancha diametral (medula).

Os experimentos de BOYD (1950a) determinam as deformações de crescimento longitudinais de tração próximas da periferia e de compressão próximas à medula. Os dados publicados por este autor são sumariados na Tabela 4.

TABELA 4 DEFORMAÇÕES E TENSÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS DE TRAÇÃO PERIFÉRICA E DE COMPRESSÃO PRÓXIMAS À MEDULA, DETERMINADAS PARA *Eucalyptus regnans* F.V.M. (BOYD, 1950a).

Diâmetro (cm)	Quantidade de Árvores	Tração Periférica		Compressão Próxima à Medula	
		Deformação ($\mu\epsilon$)	Tensão (kg/cm^2)	Deformação ($\mu\epsilon$)	Tensão (kg/cm^2)
58,4	1	522	70	1.052	141
38/61	2	1.052	141	1.575	211

A Tabela 5 sumaria os resultados das variações máximas das deformações e tensões de crescimento longitudinais determinadas no interior de troncos de *Eucalyptus* spp.. Conforme pode ser observado, apenas 4 autores pesquisaram a variação das tensões de crescimento no interior desta espécie.

Em função da similaridade da metodologia de determinação das deformações de crescimento adotada por esta tese (Item 3), os resultados obtidos por ATHERTON (1978) e POST (1979) para espécies diversas são também incluídos na Tabela 5.

TABELA 5. VARIAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES E TENSÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS MÁXIMAS, DETERMINADAS NO INTERIOR DO TRONCO DE DIFERENTES ÁRVORES.

Espécie de Madeira	Diâmetro (cm)	Quantidade de Medições		Deformação Específica ($\mu\epsilon$)		Tensão (kg/cm^2)		Autor
		Árvore	Por Árvore	Tração	Compressão	Tração	Compressão	
<i>Eucalyptus gigantea</i> (= <i>E. delegatensis</i>)	1,7-27,8	12	4-19	608 a 2.141	599 a 1.982	73 ⁽¹⁾	257 ⁽¹⁾	JACOBS (1939)
<i>E. regnans</i>	38,0-58,4	3	2	1.052 ⁽¹⁾	1.575 ⁽¹⁾	141	211	BOYD (1950a)
<i>Eucalyptus</i> sp.	-	1	23	± 1.140 ⁽²⁾	± 750 ⁽²⁾	± 160	± 105	OKUYAMA & KIKATA (1975c)
<i>E. grandis</i>	-	10	-	(?) 231 ⁽¹⁾	(?) 194 ⁽¹⁾	(?) 31	(?) 26	KORZENIOWSKI (1970) ⁽³⁾
<i>Acer rubrum</i>	$\pm 15,2$	1	46	707	964	± 69	± 94	ATHERTON (1978) ⁽⁴⁾
<i>Fraxinus americana</i>	41,0	1	44	231	874	± 27	± 102 ⁽²⁾	POST (1979a)

Valores de MOE utilizados para obtenção das deformações ou tensões: (1) Tabela 2, (2) Publicado pelo autor e (3) BODIG & JANE (1982). (3) Citado por HARDIE (1974). (4) Citado por POST et al. (1980).

2.4.3 Deformações transversais

As magnitudes das tensões de crescimento transversais são em média da ordem de 10% das longitudinais, mas como a madeira é muito menos resistente transversalmente, as deformações nesta direção são muito maiores. Mesmo pequenas tensões transversais provocam rachas em troncos, toras e pranchas. Seus efeitos quanto a empenamentos da madeira são de menor importância, devido apenas às dimensões transversais serem relativamente pequenas em comparação com as longitudinais (KUBLER, 1987).

Existem maiores quantidades de dados experimentais obtidos para as deformações de crescimento tangenciais periféricas. Dentre as publicações consultadas, BOYD (1950a) apresenta mais claramente os resultados de suas pesquisas conforme consta na Tabela 6.

TABELA 6. DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO TANGENCIAIS COMPRESSIVAS DETERMINADAS NA PERIFERIA DE ÁRVORES DE *Eucalyptus* spp. (BOYD, 1950a).

Espécie de Madeira	Diâmetro (cm)	Quantidade de Medições		Deformações Específicas ($\mu\epsilon$)		
		Árvore	Discos	Mínimo	Médio	Máximo
<i>E. regnans</i>	14,0-33,7	3	8	300	1.000	1.600
<i>E. obliqua</i>	22,9-29,2	2	6	900	1.150	2.200
<i>E. siberiana</i>	21,0-25,4	1	3	900	1.500	2.300
<i>E. australiana</i>	18,4-20,3	1	3	800	1.200	1.600

As maiores variações observadas para a espécie de *Eucalyptus* spp. (300 a 2.300 $\mu\epsilon$) são da mesma ordem de grandeza daquelas obtidas para duas espécies de Acácia, também incluídas no experimento de BOYD (1950a) (200 a 2.100 $\mu\epsilon$), embora a média destas espécies seja inferior.

JACOBS (1939) reporta a existência de um estado de compressão tangencial em toda a seção transversal de discos de *Eucalyptus gigantea*, sendo a deformação periférica da ordem de 2.500 $\mu\epsilon$. Entretanto, conforme tratado no item 2.3.2, é reconhecida a existência do estado de tração tangencial próximo à medula. Em 1945, JACOBS determina a variação média de 800 a 4.000 $\mu\epsilon$ para 15 espécies de angiospermas e cinco de gimnospermas. Embora o valor máximo de 4.000 $\mu\epsilon$ tenha sido obtido em *Eucalyptus gigantea*, JACOBS observa que

os valores para as diferentes espécies aproximam-se dos dois limites citados, sendo portanto a variação independente da espécie de madeira. Nenhuma outra análise estatística é apresentada.

De fato, a variação encontrada para diferentes espécies de madeira é muito elevada. Assim, por exemplo, FERRAND (1982a) reporta variações de 700 a $9.000\mu\epsilon$ em "Beech" e OKUYAMA & KIKATA (1978) de 25 a $1.730\mu\epsilon$ em 15 espécies japonesas, conforme também comentado por KUBLER (1987). Este último autor resume que consistentemente todos os experimentos já realizados determinam a existência de compressão tangencial na periferia do tronco, com uma média próxima de $1.500\mu\epsilon$, correspondendo aproximadamente ao dobro das deformações longitudinais periféricas médias.

Deve ser citado ainda o resultado dos experimentos de OKUYAMA & KIKATA (1975c), os quais, apresentando apenas graficamente seus resultados (Figura 34), deixam concluir pela existência de uma tensão compressiva periférica da ordem de 12 kg/cm^2 para *Eucalyptus* sp., a que corresponde uma deformação de $1.500\mu\epsilon$, utilizando o módulo de elasticidade na direção tangencial de $8,03 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$, determinado pelos mesmos autores.

As magnitudes das deformações de crescimento tangenciais próximas à medula são deveras muito pouco pesquisadas.

Em adição às pesquisas de JACOBS (1939), as quais contrariam o estado de tração tangencial próximo à medula, apenas podem ser citados os experimentos de OKUYAMA & KIKATA (1975c), ilustrado na Figura 34, considerando as "Referências Bibliográficas" consultadas.

Pela Figura 34, comprova-se a distribuição de compressão tangencial periférica e sua gradativa transformação em compressão de tração em direção à medula, podendo-se estimar um valor para tração máxima de aproximadamente 10 kg/cm^2 , correspondendo uma deformação específica de $1.250\mu\epsilon$ para a espécie de *Eucalyptus* sp. estudada.

A distribuição das tensões radiais é também bem ilustrada na Figura 34 como sendo de tração em toda a extensão radial. Na periferia tem-se um valor igual a zero, conforme anteriormente tratado, alcançando um valor máximo de aproximadamente 20 kg/cm^2 próximo

à medula. Utilizando o valor do módulo de elasticidade na direção radial, determinado pelos autores ($10,5 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$), obtém-se uma deformação de crescimento radial máxima, de tração, da ordem de $2.000 \mu\epsilon$.

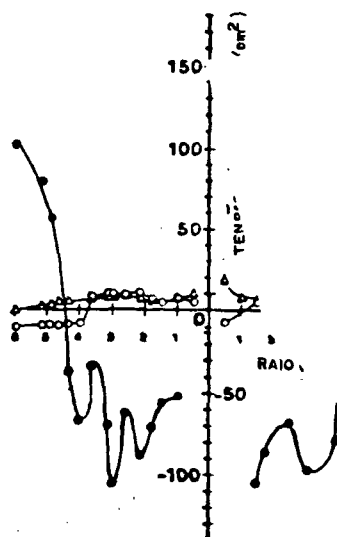


FIGURA 34. DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS (—●—), TANGENCIAIS (—○—) E RADIAIS (—△—) NO TRONCO DE *Eucalyptus* sp. (OKUYAMA & KIKATA, 1975c).

BOYD (1950a) apresenta resultados de deformações radiais de tração com valores aproximadamente constantes ao longo de todo o raio (1.200 a $1.400 \mu\epsilon$) com média de $1.280 \mu\epsilon$. O valor de $600 \mu\epsilon$, obtido mais próximo à periferia, não foi computado na média acima calculada. BOYD determina a média de $10,5 \text{ kg/cm}^2$ para a tensão de tração radial ao longo de todo o raio.

SWACZYNA (1979b), citado por KUBLER (1987), também reporta sobre uma deformação de tração da ordem de $2.000 \mu\epsilon$ ao longo de todo o diâmetro, exceto pela ocorrência de um pico de $4.500 \mu\epsilon$ próximo à medula.

A despeito desta aproximada constância de valores mencionados, vários outros experimentos comprovam o valor zero próximo à casca, seguido de um gradual aumento da

deformação radial em direção à medula, conforme obtido por OKUYAMA & KIKATA (1975c) e OKUYAMA & SASAKI (1978).

KUBLER (1987) considera que a distribuição de deformações transversais parece variar bastante de árvore para árvore, de tal forma que medições obtidas em poucos discos podem significar resultados erráticos. Um grande número de discos obtidos de várias árvores é necessário para verificar qualquer distribuição proposta.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Madeira e sua amostragem

Cinco árvores de *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden com 11 anos de idade foram obtidas no talhão nº 6 do Projeto Porto Itaperiú-Barra Velha - SC (Figura 35), em reflorestamento da COMFLORESTA - Cia. Catarinense de Empreendimentos Florestais, negociado para exploração e utilização pela WEG Motores S.A.

A escolha do talhão baseou-se na planicidade do terreno e na verificação da existência de quantidade significativa de árvores com circunferência à altura do peito (CAP) igual ou superior a 100cm, equivalendo a um diâmetro de 32cm a esta mesma altura (DAP).

Este diâmetro, considerado como necessário à obtenção de quantidade suficiente de sarrafos de teste para possibilitar a adequada representação da distribuição de tensões de crescimento no interior dos troncos, foi verificado através da medição de 41 árvores escolhidas aleatoriamente no talhão. Pelas medições efetuadas, pode-se observar que esta restrição diamétrica conduziu à escolha de árvores dominantes na floresta, uma vez que apenas 30% das árvores medidas satisfizeram esta exigência.

As cinco árvores para estudo foram selecionadas, de forma tanto aleatória quanto possível, a partir de um ponto situado a aproximadamente 10m do encontro de duas estradas existentes dentro do talhão.

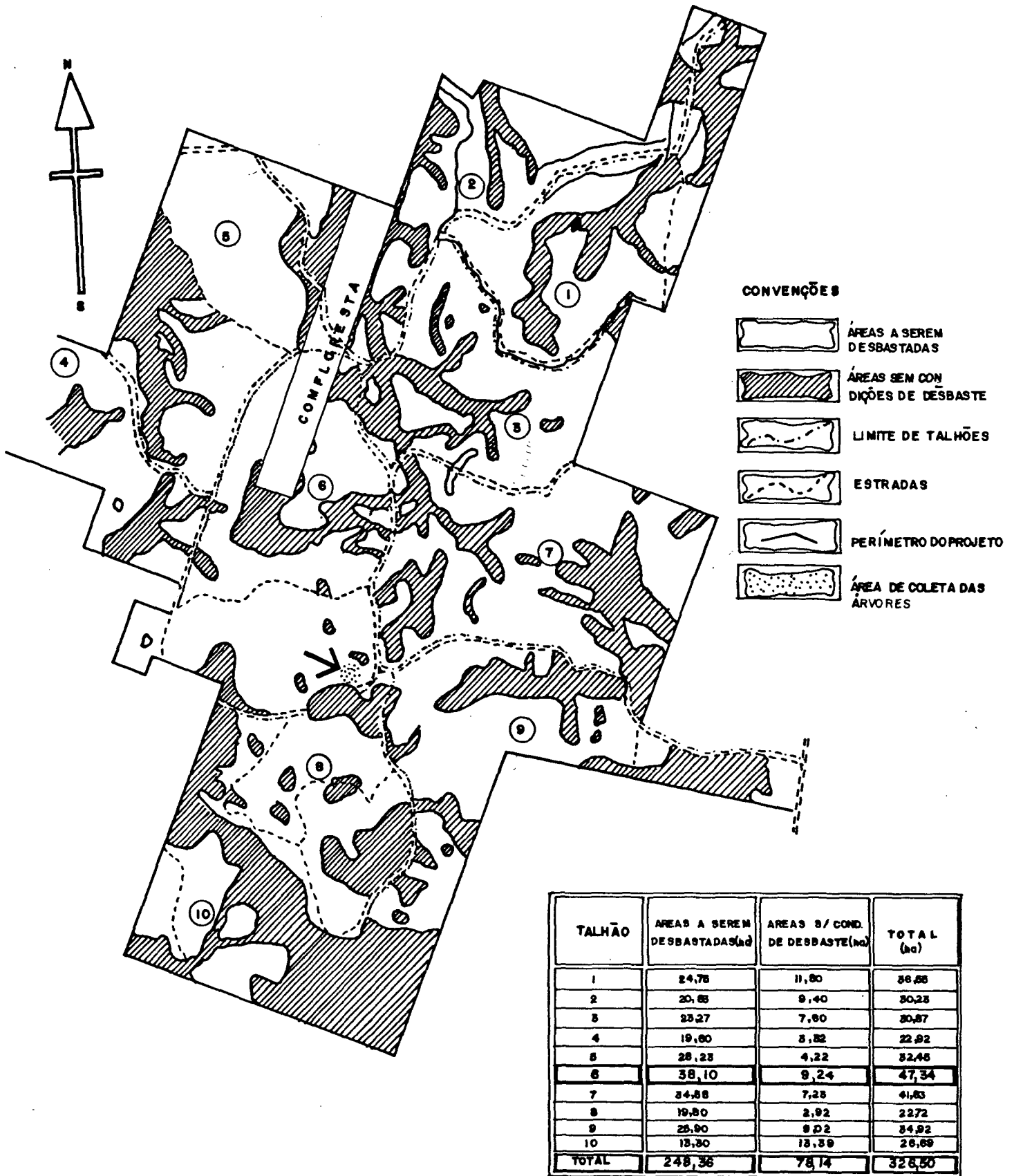


FIGURA 35. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE COLETA DAS ÁRVORES DE *Eucalyptus grandis* HILL. EX MAIDEN - TALHÃO Nº 6 - PROJETO PORTO ITAPERIÚ-BARRA VELHA - SC.

A partir deste ponto, utilizando o sistema empírico de cara ou coroa de uma moeda para escolha de direção de locomoção dentro da floresta (para frente, para trás, para a direita ou para a esquerda), percorreram-se distâncias variadas entre 20 a 30m para seleção da árvore a ser abatida, desde que obedecida as seguintes condições: distância não inferior a 10m de qualquer estrada ou clareira (se existente), a fim de eliminar o efeito denominado bordadura; diâmetro maior ou igual a 32cm; fuste vertical, retilíneo e cilíndrico; copa aproximadamente concêntrica e aspecto de perfeita sanidade exterior.

Uma sexta árvore foi também selecionada, obedecendo os mesmos critérios anteriores, para caso de necessidade de material sobressalente.

As árvores, inicialmente identificadas com os números de um a seis, preencheram os requisitos estabelecidos, podendo apenas ser observado que as de números 1, 5 e 6 possuíam suas copas ligeiramente deslocadas para um lado. A de número 1 também apresentava sua copa bifurcada e a 3 com marcas de calosidade de galhos mais acentuada que as demais.

Cada árvore selecionada situava-se a uma distância mínima entre 2 e 3m de suas vizinhas.

A derrubada das árvores de números 1 a 5 foi realizada em 17 de novembro de 1988 e a de nº 6 iniciada neste mesmo dia e completada no dia seguinte, conforme procedimento descrito a seguir.

As árvores 1, 2, 4 e 5 foram derrubadas através do método usual, pelo qual o tronco é chanfrado na direção desejada de sua queda e, a partir do lado contrário, faz-se o corte transversal de derruba perpendicularmente ao eixo longitudinal do fuste, a uma altura aproximada de 15cm do solo e um pouco acima da altura do chanfro. Um exemplo da seção transversal do tronco, obtida com este tipo de corte, é ilustrado na Figura 36.

A árvore nº 3 foi derrubada utilizando-se a técnica do anelamento superior e inferior à posição do corte transversal de abate, com uma profundidade aproximada de 30mm, controlado por uma marca colocada no sabre da motosserra. O topo do corte desta árvore está apresentado na Figura 37.



FIGURA 36. SEÇÃO TRANSVERSAL DO CORTE DE DERRUBA DE UMA ÁRVORE ATRAVÉS DO SISTEMA CONVENCIONAL DE CHANFRAMENTO E CORTE TRANSVERSAL.

Para o abate da árvore nº 6 utilizou-se um sistema especial indicado como adequado ao alívio das tensões de crescimento. Às 18:00h do dia anterior à derruba, o seu tronco foi traspasado com o sabre da motosserra, sendo o corte transversal realizado às 9:20h do dia seguinte. O topo de corte obtido é apresentado na Figura 38.

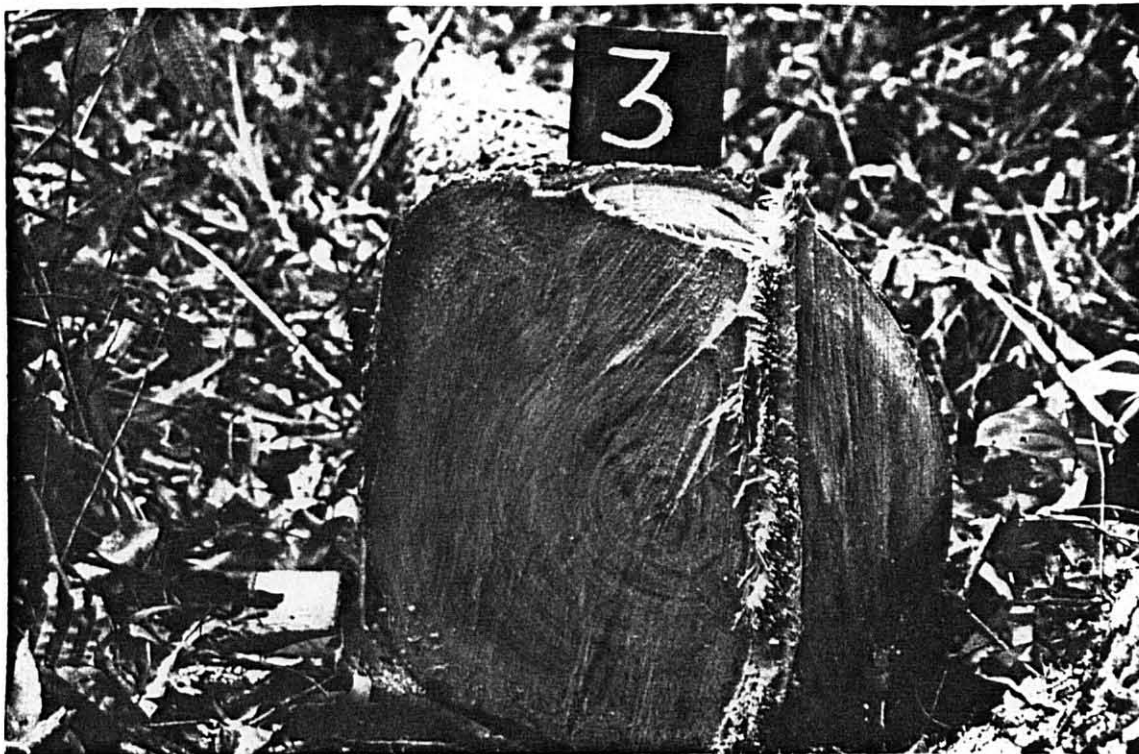


FIGURA 37. SEÇÃO TRANSVERSAL DO CORTE DE DERRUBA DE UMA ÁRVORE UTILIZANDO O SISTEMA DE ANELAMENTO.

A fim de minimizar o impacto das árvores no solo, as suas quedas foram previstas para ocorrerem do lado contrário às suas tendências normais, indicadas por pequenas inclinações do tronco ou pela posição da copa. Também foi observado o efeito do vento, aguardando-se o momento de ser efetuado o término do corte de derruba para quando não estivesse ventando ou, melhor ainda, para quando a sua direção estivesse contrária ao da queda.

Embora tenham sido tomadas todas estas precauções, a árvore nº 3 ficou presa em outra vizinha e seu tronco permaneceu encurvado até a derrubada desta última. A árvore nº 5 sofreu certa flexão dinâmica ao cair sobre outra existente no solo.

É interessante comentar que grande quantidade de água vazou pelas extremidades dos topos recém-cortados de árvores e toras.

A Tabela 7 resume as principais características das árvores abatidas para obtenção do material necessário aos estudos realizados.



FIGURA 38. SEÇÃO TRANSVERSAL DO CORTE DE UMA ÁRVORE UTILIZANDO-SE O PROCEDIMENTO ESPECIAL DE TRASPASSAMENTO DO TRONCO NO DIA ANTERIOR À DERRUBA.

TABELA 7. ALTURAS, DIÂMETROS E OUTRAS CARACTERÍSTICAS DAS ÁRVORES DE *Eucalyptus grandis* HILL. EX MAIDEN SELECIONADAS PARA ESTUDO.

Número de Identificação	Altura (m)			Diâmetro com Casca (cm)		Rachas Radiais de Topo			Sanidade/Defeitos ⁽³⁾	Sistema de Corte ⁽⁴⁾	
	Total da Árvore	Comercial (D = 20cm)	Ocorrência do 1º Galho	Base	DAP	Quantidade	Maior Comprimento (cm)				Espessura (mm)
							Longitudinal ⁽¹⁾	Transversal ⁽²⁾			
1	42,0	27,0	27,0	52,0	40,2	2	-	20,0	1	R ₁ , C, N ₁ , S	C
2	41,0	26,0	29,0	50,0	41,5	2	-	10,0	1	R, C, N, S	C
3	38,0	27,0	24,0	49,0	40,7	1	-	20,0	1	R ₁ , C, N ₁	C, A
4	39,0	20,0	20,0	42,0	38,2	2	-	16,0	1	R, C, N	C
5	41,0	29,0	29,0	52,0	40,2	2	-	20,0	1	R, C, N	C
6	44,0	27,0	26,0	52,0	39,0	2	27,0	26,0	1	R, C, N ₁ , S	C, T

(1) Comprimento lateral ao tronco (a racha alcança a periferia da árvore); (2) comprimento diametral total medido na seção transversal; (3) R = Bem retilínea, R₁ = Retilínea, C = Cilíndrica, N = Pouca calosidade de galhos, N₁ = Calosidade de galhos mais acentuada, S = Sapopema; (4) C = Corte transversal direto, com chanfro, A = Anelamento, T = Traspasseamento.

Para obtenção das amostras de madeira, o tronco da árvore nº 1 foi dividido em três partes principais. A partir da base retirou-se uma tora de 5,0m de comprimento destinada à determinação das propriedades físicas e mecânicas, às observações anatômicas macroscópicas e aos estudos das deformações de crescimento longitudinais. A tora seguinte, com 4,0m, foi retirada para os estudos das deformações de crescimento transversais e o restante do tronco, até a altura do diâmetro igual a 30cm, coletado como material de reserva.

Para as demais árvores, foi retirada apenas a tora da base com 5,0m de comprimento, considerando-se o restante também como material de reserva.

Para facilitar o transporte, as partes consideradas como material de reserva foram subdivididas em duas ou três, dependendo dos seus comprimentos.

Os topos de todas as toras foram vedados com “cascola”, para evitar a secagem, e identificados através de dois algarismos pintados com tinta a óleo. O primeiro algarismo sendo indicativo do número da árvore (1 a 6) e o segundo da posição da tora no tronco (1 a 4), uma vez que de cada árvore obteve-se, no máximo, quatro toras, numeradas seqüencialmente da base para o topo.

Para exemplificar, da árvore nº 1 foram obtidas quatro toras assim identificadas:

- 1.1 - tora da base (propriedades físicas, mecânicas, anatômicas e estudos de deformações de crescimento longitudinais);
- 1.2 - tora seguinte à da base destinada a estudos de tensões de crescimento transversais;
- 1.3 e 1.4 - material de reserva.

Embora não tenham sido tiradas fotos dos topos das toras obtidas, quase todas apresentaram-se com rachas radiais (Figura 39), em quantidade muito mais significativa do que aquelas ocorrentes quando da derruba (Figuras 36, 37 e 38), principalmente as toras 2.3, 3.4, 4.4, 5.2 e 5.4, onde as rachas alcançaram a periferia do tronco (casca). Felizmente, quase todas estas toras se constituíram em material de reserva, conforme planejamento prévio.

As toras da base, mais importantes para o experimento proposto, apresentaram no topo maior (topo de derruba) as rachas ilustradas nas Figuras 36, 37 e 38. No topo menor,

quase todas elas, exceto a 5.1, também apresentaram rachas sem alcançarem a casca, conforme ilustrado na Figura 39.

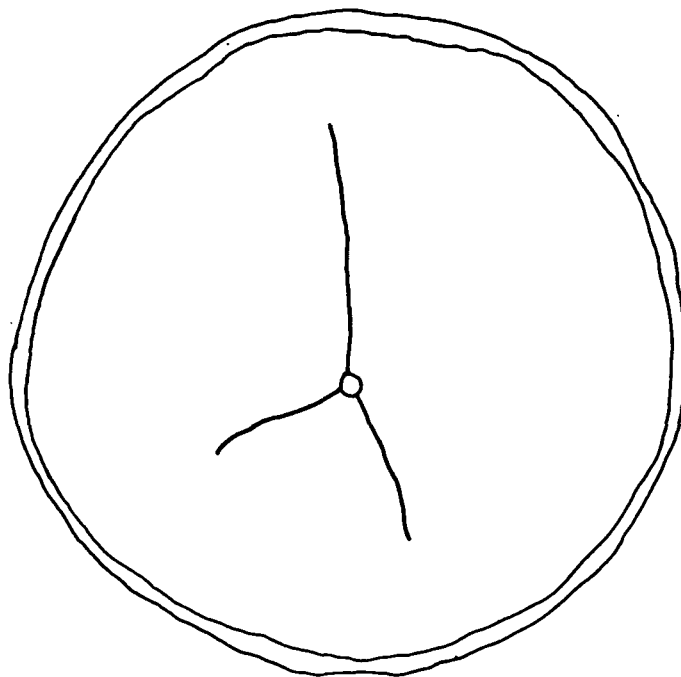


FIGURA 39. RACHAS RADIAIS OCORRENTES QUANDO DA OBTENÇÃO DAS TORAS DE TESTE NA FLORESTA.

Para fins de identificação da espécie de madeira, foram coletados por cada árvore:

- Um disco, de aproximadamente 5,0cm de espessura, retirado à altura do diâmetro igual a 30cm, o qual foi colocado dentro de um saco plástico, perfurado com vários orifícios, a fim de permitir a ventilação e sua proteção.
- Duas amostras da casca, uma retirada na base da árvore (casca grossa em placas) e outra próxima à posição de retirada do disco acima mencionado (casca fina e lisa). A mesma proteção com saco plástico foi dada a cada conjunto de duas cascas por árvore.
- Amostras de folhas (novas e velhas), galhos e sementes foram devidamente

acondicionadas em jornal, sendo o conjunto também colocado dentro de um saco plástico, conforme acima descrito.

Todo este material recebeu o correspondente número da árvore da qual foi obtido para seu reconhecimento posterior.

Durante a amostragem na floresta a temperatura variou de 22,2 a 31°C e a umidade relativa de 60 a 81%.

A Figura 40, obtida quando do carregamento do caminhão para transporte do material, permite visualizar a seção longitudinal das toras obtidas.



FIGURA 40. ASPECTO DAS SEÇÕES LONGITUDINAIS DAS TORAS DE TESTE E DA BORDADURA DA FLORESTA DE ONDE FORAM OBTIDAS.

Toda a madeira foi armazenada sob cobertura, em um galpão sem paredes, a partir de 18 de novembro de 1988 até a data de sua utilização.

Em função do arraste na floresta e do carregamento e descarregamento, as cascas das toras necessárias às suas proteções, principalmente quanto à secagem, foram bastante danificadas.

O material destinado à identificação botânica foi convenientemente engradado em um caixote de madeira e encaminhado ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT.

Várias toras, consideradas como sendo da espécie de *Eucalyptus grandis*, existentes no pátio da WEG Motores S.A., foram também utilizadas em fases metodológicas experimentais, conforme será tratado em itens subseqüentes.

3.2 Preparação do material de teste

Na serraria da WEG Motores S.A., cada uma das toras de base com 5,0m de comprimento foi subdividida para obtenção das amostras destinadas à determinação das propriedades físicas e mecânicas, às observações anatômicas macroscópicas e aos estudos das deformações de crescimento longitudinais.

3.2.1 Amostras para determinação das propriedades mecânicas e das observações anatômicas macroscópicas

Inicialmente, serrou-se o topo de cada tora de 5,0m de comprimento para obtenção de uma seção transversal plana e perpendicular ao seu eixo longitudinal. Nesta operação, cortaram-se tocos de no máximo 0,06m, inclusive para eliminação do anelamento na tora nº 3. A partir deste ponto, obteve-se uma tora de 1,3m de comprimento para retirada das amostras destinadas à determinação das propriedades físicas e mecânicas e um disco de 5,0cm

de espessura para os estudos anatômicos. Este disco situou-se, portanto, a uma altura de aproximadamente 1,45m em relação ao tronco da árvore, ao considerarem-se os 0,15m do toco deixado no solo, quando do abate.

Da tora de 1,3m de comprimento, retiraram-se quatro amostras de 8,0x8,0cm de seção transversal, duas delas próximas à casca (madeira adulta) e duas mais próximas à medula (madeira juvenil), identificadas com tinta a óleo, através de dois algarismos e uma letra. O primeiro algarismo referiu-se ao número da árvore de origem, o segundo à amostra e a letra ao tipo de lenho: adulto (A) ou juvenil (J). Assim, exemplificando, a amostra 2.1.A indicou a primeira amostra retirada do lenho adulto da árvore nº 2.

O disco de cada árvore foi apenas identificado com o número da árvore de sua origem e colocado dentro de um saco plástico perfurado, conforme procedimento adotado para o material de identificação da espécie de madeira.

Durante a obtenção das amostras e mesmo pela observação do restante das toras, decidiu-se pela utilização da árvore nº 6 (árvore reserva) em lugar daquela de nº 5, devido a menor ocorrência de rachas. As suas numerações foram invertidas e o experimento conduzido com cinco árvores identificadas pelos números de 1 a 5, sem nenhum comprometimento.

O procedimento acima descrito foi adotado para cada uma das toras de 5,0m de comprimento em dias distintos, em função do processamento de cada uma delas ter-se iniciado com a obtenção das amostras e somente haver terminado após a determinação das deformações de crescimento longitudinais, conforme tratado a seguir. A tora nº 1 foi totalmente processada em 23 de novembro de 1988 e as demais, em ordem crescente de suas numerações de identificação, nos dias 6, 8, 12 e 14 de dezembro de 1988.

Desta forma, um total de cinco discos e 20 amostras de 8,0x8,0cm de seção transversal e 1,30m de comprimento foram obtidos.

As amostras (quatro para cada uma das cinco árvores, duas do lenho juvenil e duas do adulto) foram submersas em um tanque d'água, imediatamente após o término do desdobro de cada uma, a fim de se preservarem suas condições "verde" ou "saturada". Ao final,

procedeu-se à embalagem destas em plástico e com o devido encaixotamento para envio ao Laboratório de Produtos Florestais do IBAMA, onde foram testadas.

3.2.2 Amostras para determinação das deformações de crescimento longitudinais

A partir da seção transversal do disco destinado às observações anatômicas, obteve-se uma tora de 2,32m de comprimento para determinação das deformações de crescimento longitudinais, sendo o restante da tora de 5,0m considerado como sobra.

Este comprimento de 2,32m variou de 2,315 a 2,330m em uma mesma tora e entre elas, ao considerarem-se diferentes pontos de medições.

Após cada corte transversal ter sido efetuado para obtenção das toras, inclusive daquelas destinadas à determinação das propriedades mecânicas, seus topos foram imediatamente vedados com “cascola” para dificultar a secagem.

Sempre que necessário, como para fins fotográficos, cada topo recebeu uma identificação composta de três algarismos: o primeiro indicativo da árvore de origem (1 a 5); o segundo da posição da tora no tronco, sendo sempre igual a 1, pois apenas utilizou-se a tora de base; e, finalmente, o terceiro indicativo do topo maior (1) ou do menor (2) da tora em questão.

Todos os novos topos obtidos desenvolveram diversas rachas radiais ou apenas uma diametral, mas nenhuma delas alcançou a casca, conforme ilustrado na Figura 41 para os topos maior e menor da tora nº 1, uma das mais danificadas.

A Tabela 8 apresenta as dimensões dos diâmetros e raios (medidos de acordo com a Figura 42), bem como as dimensões das maiores rachas (medidas diametralmente), para cada um dos topos das cinco toras incluídas.

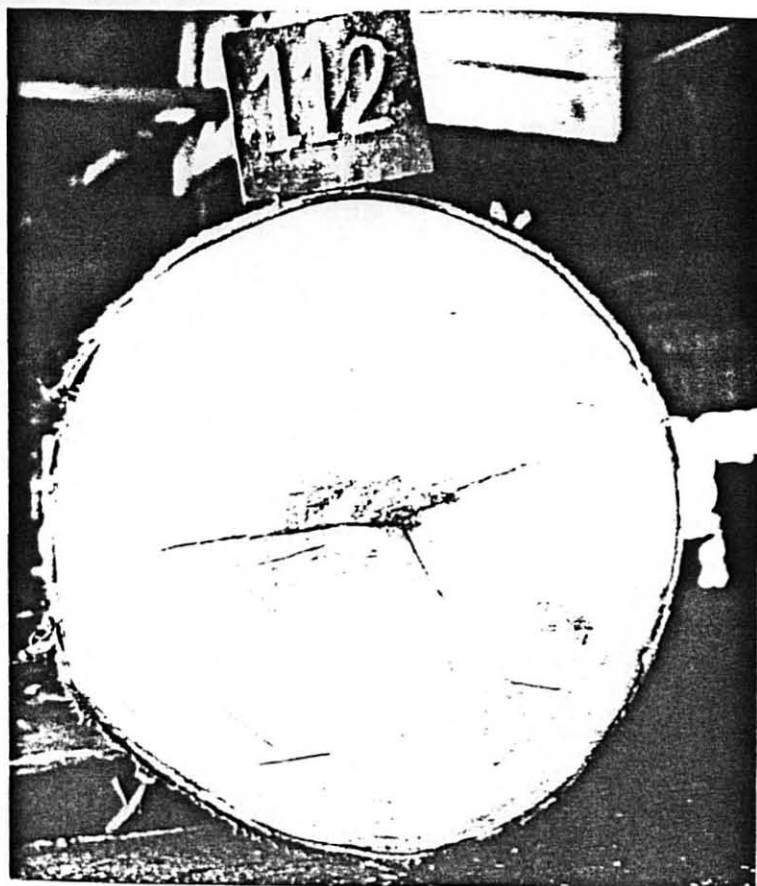
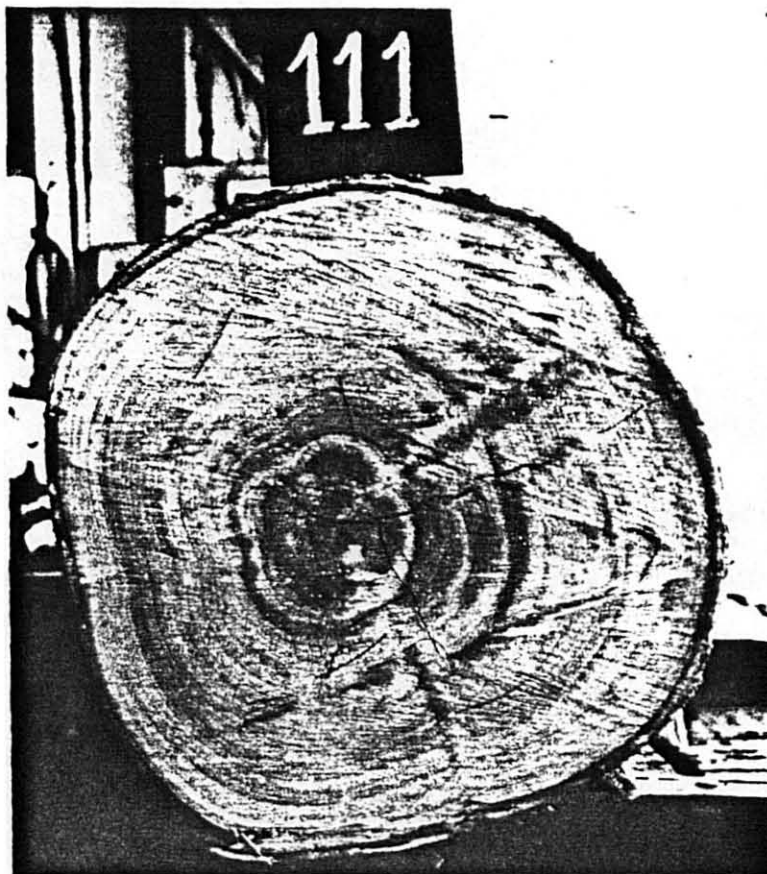


FIGURA 41. RACHAS NO TOPO MAIOR (1.1.1) E NO MENOR (1.1.2) DA TORA DE BASE DA ÁRVORE Nº 1 UTILIZADA PARA DETERMINAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS.

TABELA 8. DIÂMETROS, RAIOS E DIMENSÕES DE MAIORES RACHAS OCORRENTES NOS TOPOS DAS TORAS UTILIZADAS PARA DETERMINAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS.

Tora Nº	Diâmetro do Topo (mm)		Raios do Topo (mm) ⁽¹⁾								Rachas Radiais de Topo (mm) ⁽²⁾			
			Topo Menor				Topo Maior				Diversas		Diametral	
	Topo Menor	Topo Maior	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₁ '	R ₂ '	R ₃ '	R ₄ '	Topo Menor	Topo Maior	Topo Menor	Topo Maior
1	353/354	367/367	153	182	200	172	157	184	210	183	190	195	-	-
2	361/330	389/360	169	151	192	179	203	204	186	156	-	24	15	-
3	334/343	354/372	169	166	165	177	173	192	181	180	-	-	21	21
4	320/346	330/359	156	176	164	170	158	180	172	179	153	-	-	13
5	348/338	366/365	185	156	163	182	189	173	177	192	240	195	-	-

(1) Ver Figura 42.

(2) Maiores rachas medidas diametralmente.

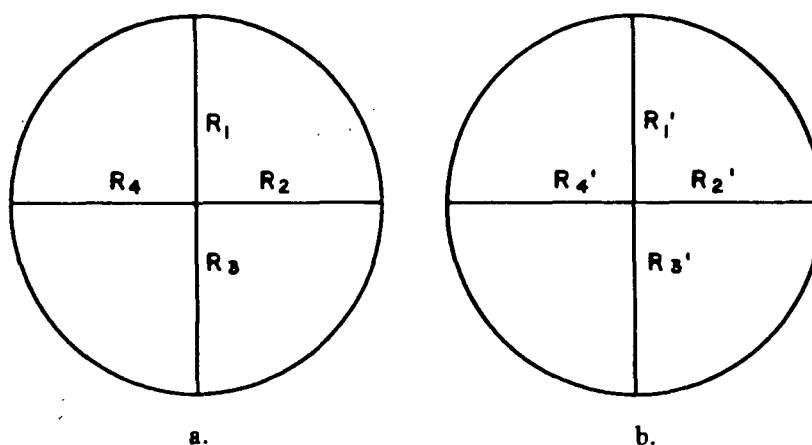


FIGURA 42. POSIÇÃO DE MEDIÇÃO DE DIÂMETROS E RAIOS DE CADA TOPO DAS TORAS UTILIZADAS PARA A DETERMINAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS, CONFORME CONSTA NA TABELA 8. a. TOPO MENOR b. TOPO MAIOR.

Na obtenção de pranchas e sarrafos para medições das deformações de crescimento longitudinais, seções transversais de sarrafos de 20,0x20,0mm foram marcadas nos dois topos de cada tora, deixando-se entre elas o intervalo de 4,0mm do corte da serra de desdobro de forma similar à adotada por AHERTON (1978) e apresentada na Figura 16. Vários cuidados

foram tomados anteriormente ao início desta marcação (esquema de distribuição das seções transversais dos sarrafos nos topos da tora), baseando-se em fases experimentais de cada procedimento adotado, utilizando-se toras extras de madeira fornecidas pela WEG Motores S.A.

Em função da grande precisão de corte exigida para a obtenção de pranchas de espessuras tão reduzidas, somente foi possível realizar o desdobro com o carro porta-toras sempre bem limpo, alinhado e nivelado e as serras-de-fitas convenientemente laminadas, tensionadas e ajustadas nos volantes.

Outra condição verificada, através dos pré-experimentos realizados, constituiu-se na exigência de marcação do referido esquema de distribuição dos sarrafos com as toras posicionadas sobre o carro porta-toras, descascadas e presas pelos “gatos” na exata posição de desdobro.

Assim, as toras foram colocadas sobre o carro, procurando-se a melhor posição de seu assentamento na “mesa” e encosto na “varanda”, utilizando-se calços (cunhas de madeira) sempre que necessário.

As principais rachas, ocorrentes nos dois topos, foram posicionadas perpendicularmente à serra-de-fita, contribuindo para a menor progressão das mesmas, quando do desdobro, conforme comprovado anteriormente a esta tomada de decisão.

Finalmente, cumprida todas estas condições, procedeu-se à marcação do esquema de distribuição das seções transversais dos sarrafos nos dois topos da tora, conforme exposto a seguir.

Iniciando pelo topo menor de cada tora (topo este que define a quantidade de sarrafos possíveis de serem obtidos), marcou-se uma linha vertical passando pela medula e paralelamente à serra-de-fita, sendo anotada a distância horizontal entre ambas. A seguir, demarcou-se uma segunda linha perpendicularmente à primeira e também passando pela medula, sendo assinalada na serra-de-fita a sua correspondente altura. Estas duas linhas definiram os dois diâmetros principais do topo menor da tora, cujos comprimentos, bem como de seus correspondentes raios, são apresentados na Tabela 8.

Na seqüência, as duas linhas foram transportadas para o topo maior, fazendo uso dos parâmetros anotados acima: distância horizontal à serra-de-fita e altura assinalada na mesma.

Este procedimento não conduziu necessariamente à obtenção dos diâmetros e raios, passando pela medula do topo maior. De qualquer forma, estas linhas transportadas, consideradas como diametrais neste topo, juntamente com suas correspondentes no topo menor, definiram as distribuições radiais das deformações de crescimento longitudinais no interior do tronco da árvore neste experimento.

Paralelamente às linhas acima definidas nos dois topos, foram traçadas diversas outras, paralelas e distantes entre si de 12,0mm, obtendo-se um diagrama similar ao apresentado na Figura 43.

Ao serrar a tora nas duas primeiras linhas paralelas às diametrais e alternadamente nas demais marcadas e indicadas pelo nº 2 na Figura 43, obtiveram-se pranchas de 20,0mm de espessura, considerando-se que o corte da serra consome aproximadamente 4,0mm. As linhas que permaneceram marcadas ao longo da espessura do topo de cada prancha são indicativas dos seus centros (linhas assinaladas pelo nº 3 na Figura 43). Os segmentos de linhas, perpendiculares a estas últimas, os quais também permaneceram impressos nos topos das pranchas, indicaram, alternadamente, a posição de corte dos sarrafos (linhas nº 2 na Figura 43) e o centro dos mesmos ao interceptarem aquelas referentes aos centros da prancha.

Embora o esquema de distribuição de sarrafos tenha sido realizado em todo o topo de cada tora, somente as três pranchas centrais foram utilizadas no experimento em função de todo o processo ser bastante demorado.

Conforme também ilustrado na Figura 43, na posição correspondente ao centro da seção transversal de cada sarrafo demarcado em cada um dos dois topos das três pranchas centrais, fixaram-se pregos galvanizados anteriormente a qualquer procedimento de desdobro. Estes serviram como pontos de medição dos seus comprimentos, ou seja, pontos de contacto dos fusos dos relógios comparadores (Item 3.3.2).

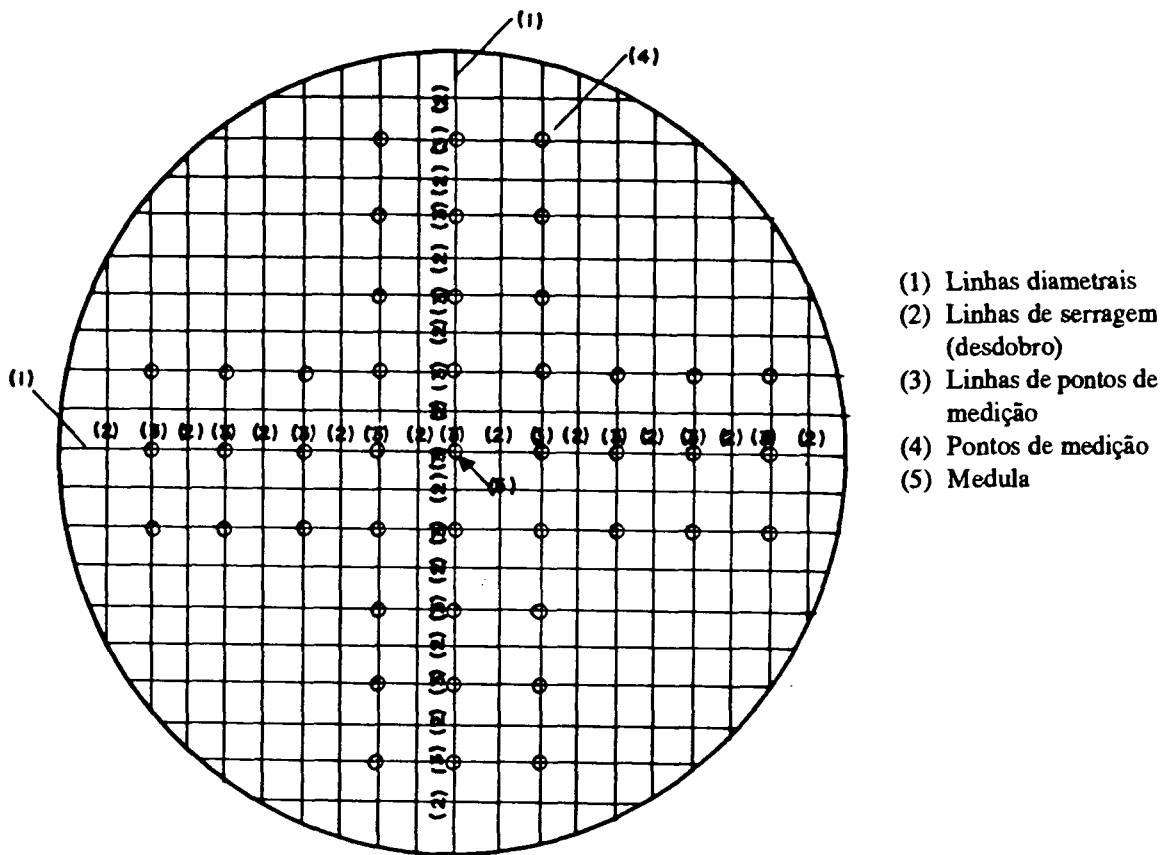


FIGURA 43. TOPO MENOR DE UMA TORA ILUSTRANDO A POSIÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS E AS LINHAS DE SERRAGEM DE SARRAFOS DE 20,0 X 20,0mm DE SEÇÃO TRANSVERSAL.

Os pregos utilizados, comercializados sob a denominação de "PREGMAR P 6x6", possuíam comprimentos variáveis de 14,52 a 15,68mm e diâmetros de 1,20 a 1,28mm.

A fim de assegurar um perfeito contacto com os fusos dos relógios comparadores, suas cabeças arredondadas e com estrias foram esmeriladas até apresentarem-se completamente lisas. Com a mesma finalidade, os pregos foram fixados na madeira perpendicularmente à superfície transversal do topo, deixando-se suas cabeças completamente salientes.

Os pontos de medição em um dos topos de cada tora foram identificados por números seqüenciais ao longo de cada prancha, iniciando pelo nº 1 e terminando pelo número correspondente à quantidade máxima de sarrafos possíveis de serem obtidos nas três pranchas de cada tora, conforme ilustrado na Figura 44. Este procedimento, sendo duplicado de forma

exatamente análoga no outro topo da tora, permitiu a obtenção de cada sarrafo após o término de seu desdobro, contendo um prego em cada um dos seus extremos, marcados com o mesmo número de identificação. Sendo cada tora processada independentemente das demais, não houve riscos de mistura de sarrafos entre toras.

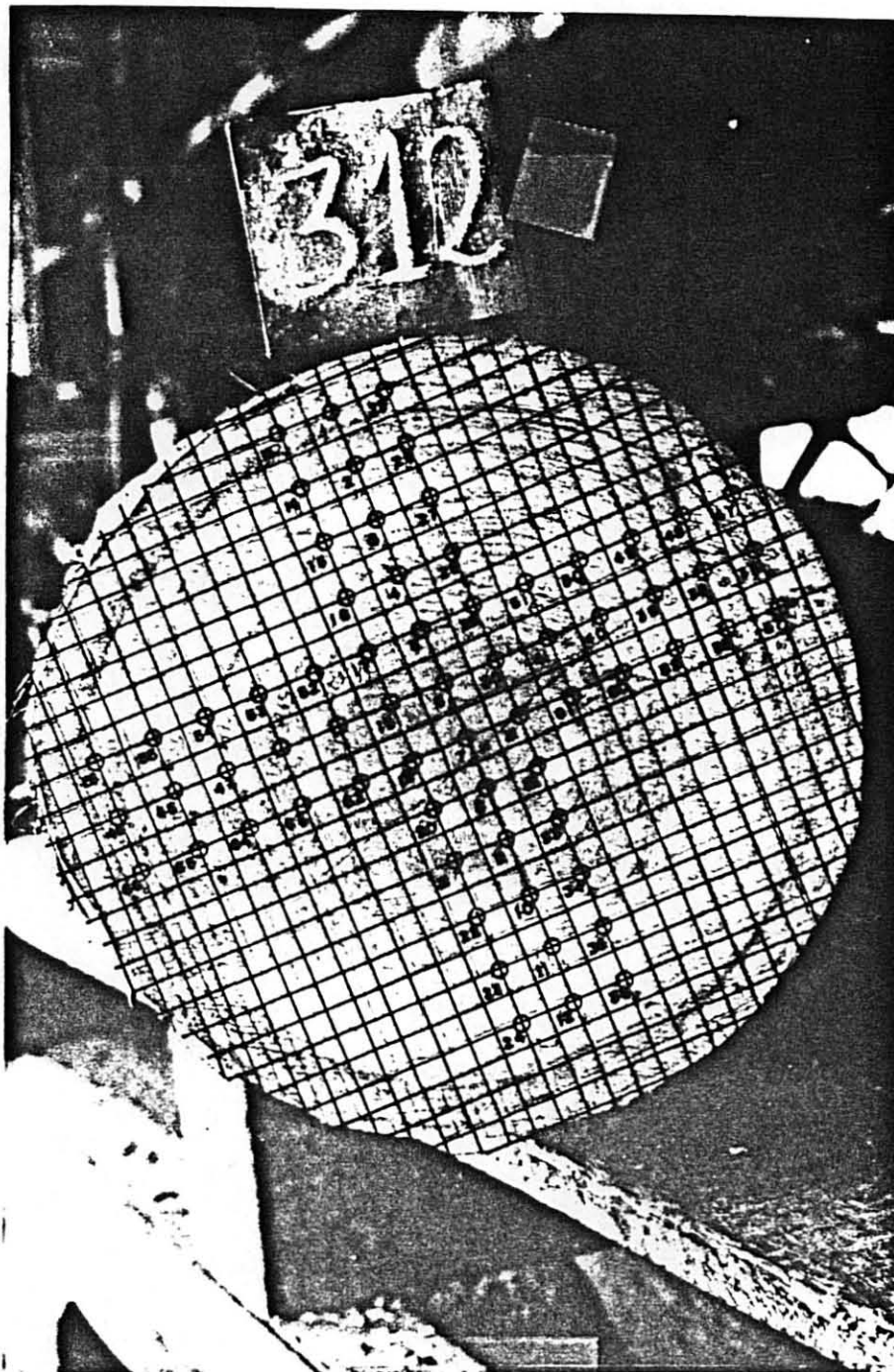


FIGURA 44. TOPO MENOR DA TORA DE BASE OBTIDA DA ÁRVORE Nº 3 ILUSTRANDO O ESQUEMA DE DISTRIBUIÇÃO DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS DOS SARRAFOS E OS PONTOS DE MEDIÇÕES DAS DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS COM SEUS CORRESPONDENTES NÚMEROS DE IDENTIFICAÇÃO.

A grande necessidade da tora permanecer na sua exata posição de desdobro no carro porta-toras (presa pelos "gatos") fez-se necessária até conseguir a marcação das linhas diametrais nos seus dois topos. As distâncias vertical (altura) e horizontal marcadas entre estas linhas e a serra-de-fita, bem como a marcação de posições dos calços utilizados e de outros pontos de referência entre a tora, a "mesa" e a "varanda", permitiram sua retirada e recolocação na exata posição anterior. Desta forma, foram facilitadas as operações de delineamento do esquema de distribuição de sarrafos nos topos, de fixação de pregos e, principalmente, de medições intermediárias realizadas primeiramente na tora, em seguida nas pranchas e finalmente nos sarrafos, conforme será tratado em seções subseqüentes.

O desdobro da tora em pranchas foi realizado através do esquadrejamento de duas faces, sendo o bloco restante serrado em cortes paralelos, conforme apresentado na Figura 45.

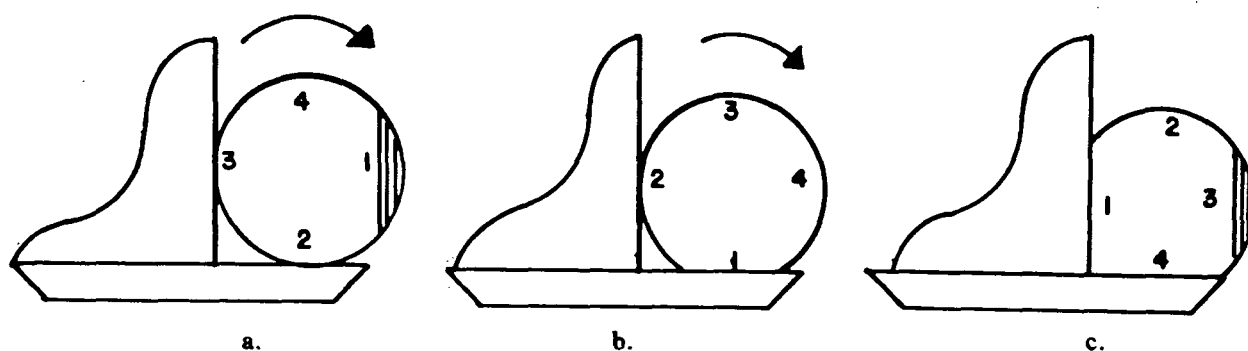


FIGURA 45. SISTEMA UTILIZADO PARA O DESDOBRO DA TORA EM PRANCHAS, ONDE ESTA É ESQUADREJADA EM DUAS FACES (a e b) E O BLOCO RESTANTE DESDOBRADO EM CORTES PARALELOS (c).

No esquadrejamento inicial (a) serraram-se a costaneira e duas a três pranchas de 20,0mm de espessura para cada uma das cinco toras incluídas no experimento, de tal forma a obter-se uma superfície plana que possibilitasse o perfeito apoio na mesa, quando do volteamento para iniciar o desdobro na posição "b". Nesta posição, foram serradas a costaneira e nove a treze pranchas. Finalmente, com as duas superfícies planas obtidas,

apoiadas na “mesa” e na “varanda” do carro porta-toras, completou-se o procedimento de desdobro obedecendo o esquema anteriormente traçado (Figura 43).

As linhas de serragem (nº 2 da Figura 43) foram posicionadas no centro do corte, de tal forma a serem retirados 2,0mm de cada um dos seus lados, conseguindo-se a obtenção das pranchas com 20,0mm de espessura, de acordo com o previsto.

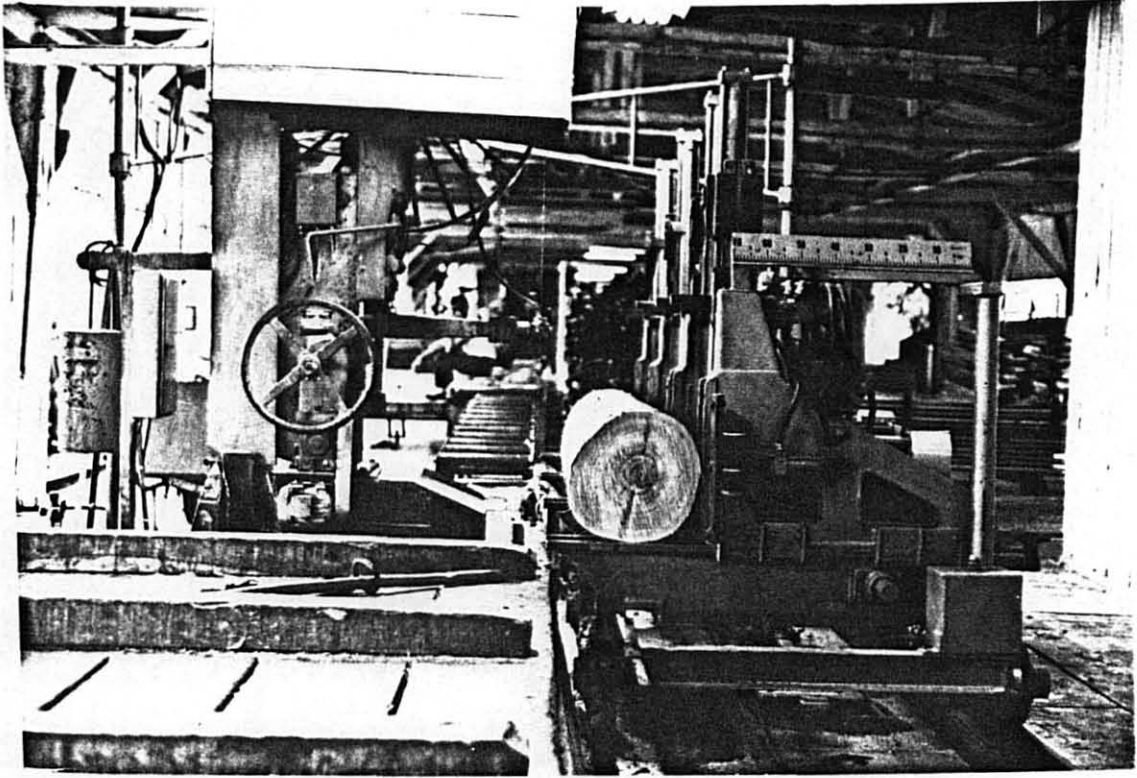
Conforme comentado anteriormente, posicionou-se a tora quando do esquadreamento inicial com sua principal racha paralela à “mesa”, a fim de diminuir a progressão das já existentes. Desta forma, quando do seu volteamento para efetuar-se o esquadreamento, a racha, passando para a posição perpendicular à “mesa” e paralela à serra-de-fita (Figura 46b), foi eliminada em apenas uma prancha.

A Figura 46 ilustra o desdobro de uma das toras utilizadas nas três posições referidas.

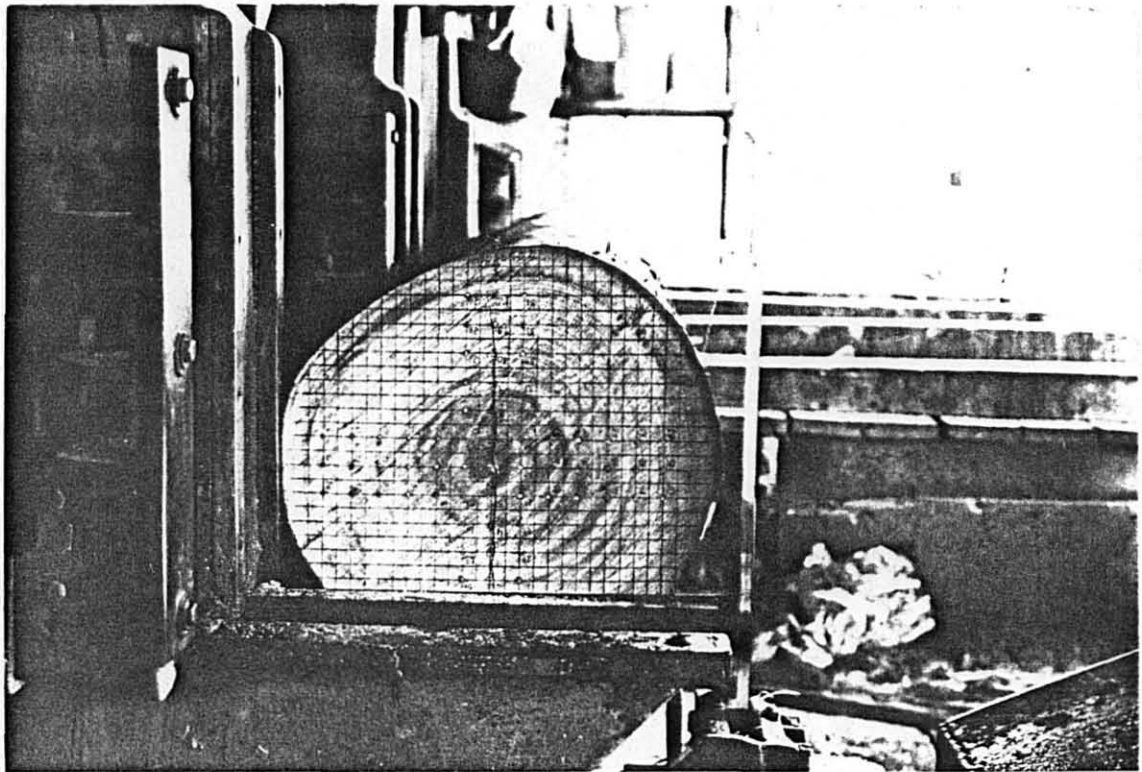
O equipamento principal utilizado incluiu uma serra-de-fita SCHIFFER, fabricada em 1975, modelo DT-125, 50 HP, 640 RPM, 1,30mm e 12,5cm de comprimento e largura do volante, respectivamente; um carro porta-toras SCHIFFER, modelo 01.M.C.L.P., com 3,68m de comprimento e quatro “gatos”; e o equipamento normal de laminação e afiação de serras-de-fita.

Os sarrafos identificados em cada uma das pranchas foram obtidos utilizando uma serra circular de fabricação própria com mesa de madeira e motor WEG-195, de 5 CV e 3.520 RPM. As serras circulares utilizadas possuíam dentes travados ou com pontas de “wídia”.

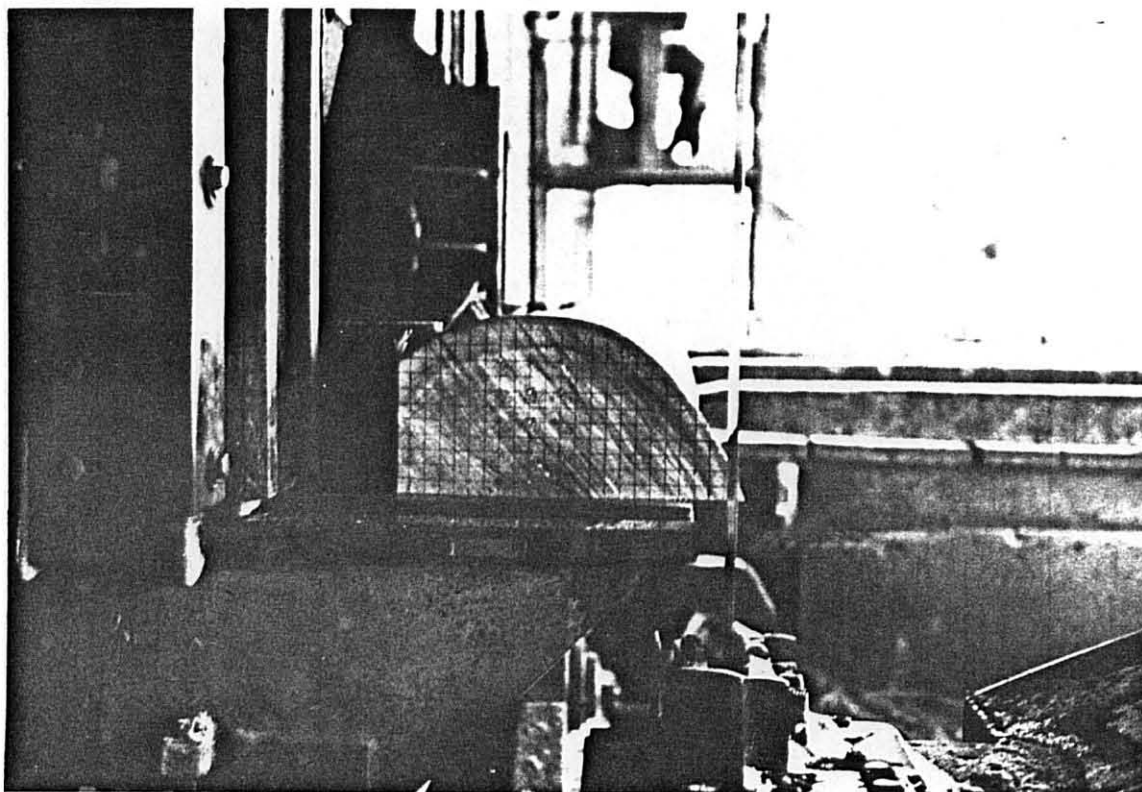
Todas as pranchas e sarrafos, estes devidamente limpos com uma escova, foram mantidos enrolados em uma lona plástica, a fim de dificultar a secagem, desde o momento do término do desdobro de cada um deles até a utilização na fase seguinte do processamento previsto no experimento.



a.



b.



c.

FIGURA 46. DESDOBRO DE UMA TORA UTILIZADA NO EXPERIMENTO, SEGUINDO O SISTEMA DE ESQUADREJAMENTO EM DUAS FACES (a e b) E O DESDOBRO DIRETO DO RESTANTE DA TORA (c).

Tempo de desdobro, temperatura e umidade relativa foram registrados e os sarrafos analisados quanto à ocorrência de defeitos e suas dimensões (nós, rachas, inclinação da grã, canais resiníferos, etc), excentricidade dos pontos de medição em relação às suas seções e variabilidade de suas próprias dimensões transversais. Estes dois últimos quesitos foram medidos em dez sarrafos escolhidos aleatoriamente para cada tora desdobrada. Estas análises foram conduzidas no dia seguinte ao término das medições das deformações longitudinais de crescimento.

3.2.3 Amostras para determinação das deformações de crescimento transversais

Para obtenção de discos de madeira sem rachas, foi adotado procedimento similar ao utilizado por KUBLER & CHEN (1974) conforme item 2.3.2.1. Por este procedimento a tora é dividida em seções de três diâmetros (3d) de comprimento e em seguida são cortados discos alternados nos seus dois extremos.

Conduziu-se o experimento apenas na tora selecionada da árvore nº 1, em função da grande quantidade de rachas ocorrentes nas demais.

A tora experimental com 4,17m de comprimento e diâmetros iguais a 32,0 e 28,0cm para os seus topos maior e menor, respectivamente, foi dividida em cinco seções, tendo as quatro primeiras 0,90m de comprimento (aproximadamente 3d) e a última 0,57m (seção considerada como sobra).

Cada seção, sendo demarcada em discos com aproximadamente 5,0cm de espessura (d/6), possibilitou a obtenção de 15 deles, os quais foram identificados com os números de 1 a 15, a partir do topo maior.

Modificou-se ligeiramente a metodologia proposta por KLUBER & CHEN (1974) através da adoção do sistema de corte de dois discos simultaneamente, a partir dos dois topos da tora, para o que utilizaram-se duas motosserras ao mesmo tempo. Por razões de segurança operacional, apenas os discos centrais foram serrados um a um.

Esta metodologia permitiu a obtenção dos discos de números 7, 8 e 9 sem rachas, correspondentes àqueles posicionados centralmente em relação ao comprimento total da seção.

Os discos 7 e 8, com espessuras variáveis de 5,0 a 5,7cm, foram destinados à determinação das deformações tangenciais e radiais de crescimento sob os números de identificação 1-7-CD e 1-8-RD, respectivamente.

Deixa-se de apresentar aqui a preparação dos discos para o experimento, devido ao fato de que esta preparação faz parte da própria determinação das deformações que será tratada no item 3.3.3.

Os discos foram colocados dentro de sacos plásticos, contendo papel-toalha umedecido em água, tendo suas bocas convenientemente vedadas com fitas adesivas durante o período máximo de três horas, quando se prosseguiu o experimento.

O disco 9 foi utilizado para determinação das propriedades físicas (Itens 3.2.4 e 3.3.1).

3.2.4 Amostras para determinação das propriedades físicas

As propriedades físicas incluídas no experimento foram a densidade e o teor de umidade.

Para a madeira destinada às medições das deformações de crescimento longitudinais, determinaram-se os valores destas propriedades nos dois últimos sarrafos manuseados, quando do término desta fase do experimento em cada tora (Item 3.3.2), assumindo, conseqüentemente, que o valor do teor de umidade obtido correspondeu ao mínimo para todos os sarrafos existentes.

Os dois sarrafos selecionados corresponderam: um deles à madeira do lenho juvenil e o outro à adulta. Exceção foi feita para a tora originária da árvore nº 1, onde somente testou-se a madeira adulta.

De cada um dos sarrafos foram obtidas três amostras de 10,0cm de comprimento, sendo duas de seus extremos e uma do meio do seu comprimento longitudinal, perfazendo um total de 27 amostras: três para o lenho da madeira adulta da árvore nº 1 e três para cada um dos dois tipos de lenhos (seis amostras) para as outras quatro árvores.

As amostras foram lixadas para eliminação de toda e qualquer farpa de serragem e identificadas por meio de três algarismos e uma letra. Os algarismos indicando, respectivamente, o número da árvore (1 a 5), o número do próprio sarrafo e a posição da amostra ao longo do mesmo, ao que correspondeu também a altura de sua posição no tronco: o nº 1 indicativo da posição inferior (mais próximo da base da árvore ou, aproximadamente, a 1,50m

de altura do solo), o nº 2 da posição mediana no sarrafo (a 2,61m) e o nº 3 de sua extremidade superior (a 3,62m). Finalmente, a letra sendo indicativa da madeira adulta (A) ou juvenil (J). Assim, exemplificando, a amostra 2-60-3A correspondeu àquela retirada da extremidade superior (nº 3), do sarrafo nº 60 de madeira adulta (A) e obtida da árvore nº 2.

Todas as amostras obtidas foram acondicionadas dentro de sacos plásticos, sendo suas bocas vedadas com fitas adesivas e assim conservadas em local fresco até a determinação de suas massas verdes, em 29 de novembro de 1988, para as amostras da árvore nº 1 e em 20 de dezembro para as demais, ou seja, de seis a quatorze dias após suas obtenções.

Amostras do lenho adulto e do lenho juvenil, sem dimensões determinadas, de um disco de madeira retirado próximo aos utilizados para a determinação das deformações de crescimento transversais (Item 3.2.3) foram conservadas, da mesma forma já mencionada, até a determinação das propriedades referidas.

3.3 Procedimento experimental

3.3.1 Determinação das propriedades físicas, mecânicas e observações anatômicas macroscópicas

As propriedades mecânicas, usualmente presentes em estudos de caracterização de espécies de madeira e determinadas neste trabalho, foram: flexão estática (módulo de ruptura e elasticidade), compressões e durezas paralelas e perpendiculares às fibras, e máximas resistências ao cisalhamento, ao fendilhamento e à tração perpendicular às fibras.

Duas amostras (uma proveniente do lenho juvenil e outra do lenho adulto) para cada uma das cinco árvores utilizadas no experimento (Item 3.2.1), perfazendo um total de dez amostras para cada propriedade, foram ensaiadas em condição verde, seguindo as instruções da “Comisión Panamericana de Normas Técnicas - COPANT”.

Além do instrumental próprio de medições de dimensões, foram utilizadas duas

máquinas universais INSTRON, modelos 1115 e 1127, com capacidade de carregamento iguais a 10.000 e 25.000kg, respectivamente, bem como os equipamentos específicos a cada tipo de ensaio.

Nas observações anatômicas macroscópicas, também realizadas de acordo com as normas “COPANT”, utilizaram-se cinco discos de madeira obtidos a aproximadamente 1,45m de altura da árvore (Item 3.2.1).

Igualmente, as normas COPANT orientaram a determinação das propriedades físicas, utilizando-se as amostras obtidas nas dimensões e condições especificadas no item 3.2.4. O teor de umidade referiu-se às condições destas amostras, quando da determinação das deformações de crescimento longitudinais e transversais, até o estado de completamente secas em estufa a uma temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$.

Os valores das densidades determinados pelo processo de imersão em água incluíram: densidade básica, verde (considerando o teor de umidade determinado de acordo com o parágrafo acima), seca (em estufa, à temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$, até a obtenção de massa constante) e saturada em água.

Na determinação das massas (verde, saturada e seca), utilizou-se uma balança HELMAQ HM 1.000 com 1.000 g de capacidade e 0,01g de precisão, enquanto os correspondentes volumes foram obtidos em outra balança HELMAQ HM 5.000 com 5.000g de capacidade e 0,1g de precisão.

As análises estatísticas realizadas incluíram a determinação da média, desvio padrão, coeficiente de variação e o cálculo do intervalo de confiança da média - este último realizado conforme apresentado por NATRELLA (1966), KRAHMER & SNODGRASS (1967) e BODIG & JAYME (1982), através da fórmula:

$$\pm P = \frac{t \cdot s}{\bar{x} \sqrt{n}} \quad \text{ou} \quad n = \frac{t^2 \cdot s^2}{(p \cdot \bar{x})^2}$$

onde,

n = número de amostras;

t = valor da distribuição de t (t de “Student”);

s = desvio padrão estimado para a população;

$\pm p$ = porcentagem de \bar{x} que define seu intervalo de confiança; e
 \bar{x} = valor médio estimado para uma determinada propriedade.

Estas análises incluíram tão-somente os resultados obtidos nos ensaios das amostras provenientes dos sarrafos utilizados nas medições das deformações de crescimento longitudinais, uma vez que aqueles referentes às transversais foram obtidos em apenas uma amostra de cada tipo de lenho (juvenil e adulto), para fins comparativos com os primeiros e, principalmente, para verificar o teor de umidade quando das medições efetuadas.

3.3.2 Determinação das deformações de crescimento longitudinais

3.3.2.1 Aparelho de medição

Para se efetuar as medições dos comprimentos dos sarrafos dentro das toras, das pranchas e isoladamente foi necessário fabricar um aparelho especial de medição, conforme ilustrado na Figura 47.

Na fabricação deste aparelho utilizou-se o seguinte material:

- Três vigas “I” de 3”, 2ª alma, com 2,424m de comprimento, servindo como estrutura longitudinal: uma colocada no centro do aparelho e as outras duas nas suas bordas;
- Duas vigas “I” de 3”, 2ª alma, seccionadas em dois pedaços, servindo como estrutura transversal ao serem soldados entre os extremos das três vigas “I” longitudinais;
- Quatro tubos galvanizados com 3/4” de diâmetro, colocados transversalmente, igualmente espaçados ao longo do comprimento das vigas “I” longitudinais, traspassando a viga central através de um orifício e alcançando as almas das duas vigas de borda pelo lado interno;
- Quatro ferros mecânicos redondos, com diâmetro de 5/8”, rosqueados nas

extremidades, os quais, atravessando os tubos galvanizados e tracionados por porcas apertadas em seus extremos pelo lado externo das almas das vigas "I" de borda, completaram a rigidez necessária à estrutura da mesa de apoio do aparelho;

- Dois ferros chatos de 5/8 x 4", aço 1020, utilizados como hastes verticais de apoio de relógios comparadores e paquímetros. Em cada um destes ferros foram abertas uma canaleta e uma abertura arredondada, destinadas à movimentação do relógio preso a uma peça de fixação (Figura 48) e à colocação/retirada desta última, respectivamente;
- Uma cantoneira "L" de 1,5 x 3/16", aço 1020, soldada sobre as hastes verticais, conferiu alinhamento e estabilidade às mesmas;
- Uma lâmina de compensado de 20mm de espessura com 0,400 x 2,404m de dimensões superficiais, apoiada e parafusada em suas bordas às vigas "I" e a 0,01m de distância das hastes verticais, servindo como plataforma (mesa) de apoio para as peças de madeira a serem medidas.

Em função da altura delimitada pela cantoneira soldada sobre as hastes verticais, o aparelho permitiu a medição de toras com até 40,0cm de diâmetro.

A Figura 48 apresenta em detalhe uma das peças utilizadas para fixação e movimentação dos relógios comparadores ao longo das hastes verticais do aparelho de medição. A peça, sendo provida de duas saliências laterais (que funcionam como "machos"), pode deslizar dentro de dois sulcos (que funcionam como "fêmeas") abertos dentro da canaleta da haste vertical. Um orifício perfurado na parte superior da mesma peça possibilitou a introdução do fuso do relógio, que é fixo pelo seu canhão, através de um parafuso com cabeça em borboleta, visto em posição vertical na Figura 48. Todo o sistema (peça de fixação e relógio comparador) teve então possibilidade de ser deslocado ao longo da haste vertical, sendo fixado na altura de medição desejada através de outro parafuso com cabeça em borboleta, visto de frente na Figura 48.

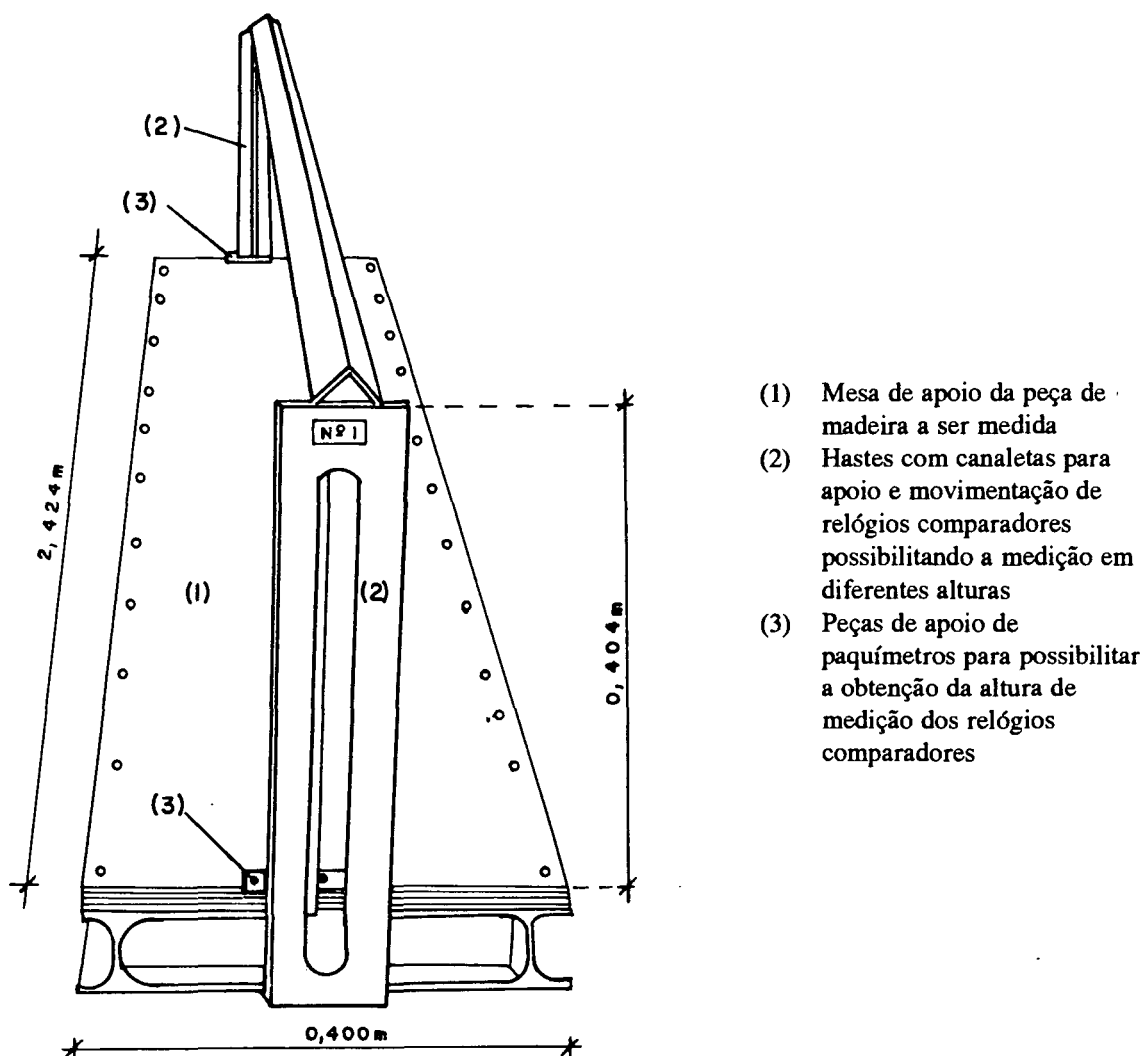


FIGURA 47. APARELHO DE MEDIÇÃO DO COMPRIMENTO DE PEÇAS DE MADEIRA OU APARELHO DE MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS.

Com fins de evitar erros de assentamento e ajustes, os dois relógios comparadores utilizados foram identificados pelos números 1 e 2, sendo sempre mantidos nas correspondentes hastes verticais, também identificadas pelos mesmos números durante toda a fase experimental.

A altura de medição foi determinada através de um paquímetro, cujos bicos apoiaram-se na extremidade da peça de fixação que se salienta lateralmente na haste vertical e na peça metálica parafusada no compensado da mesa do aparelho, conforme vista na Figura 48 e indicada pelo nº 3 na Figura 47.

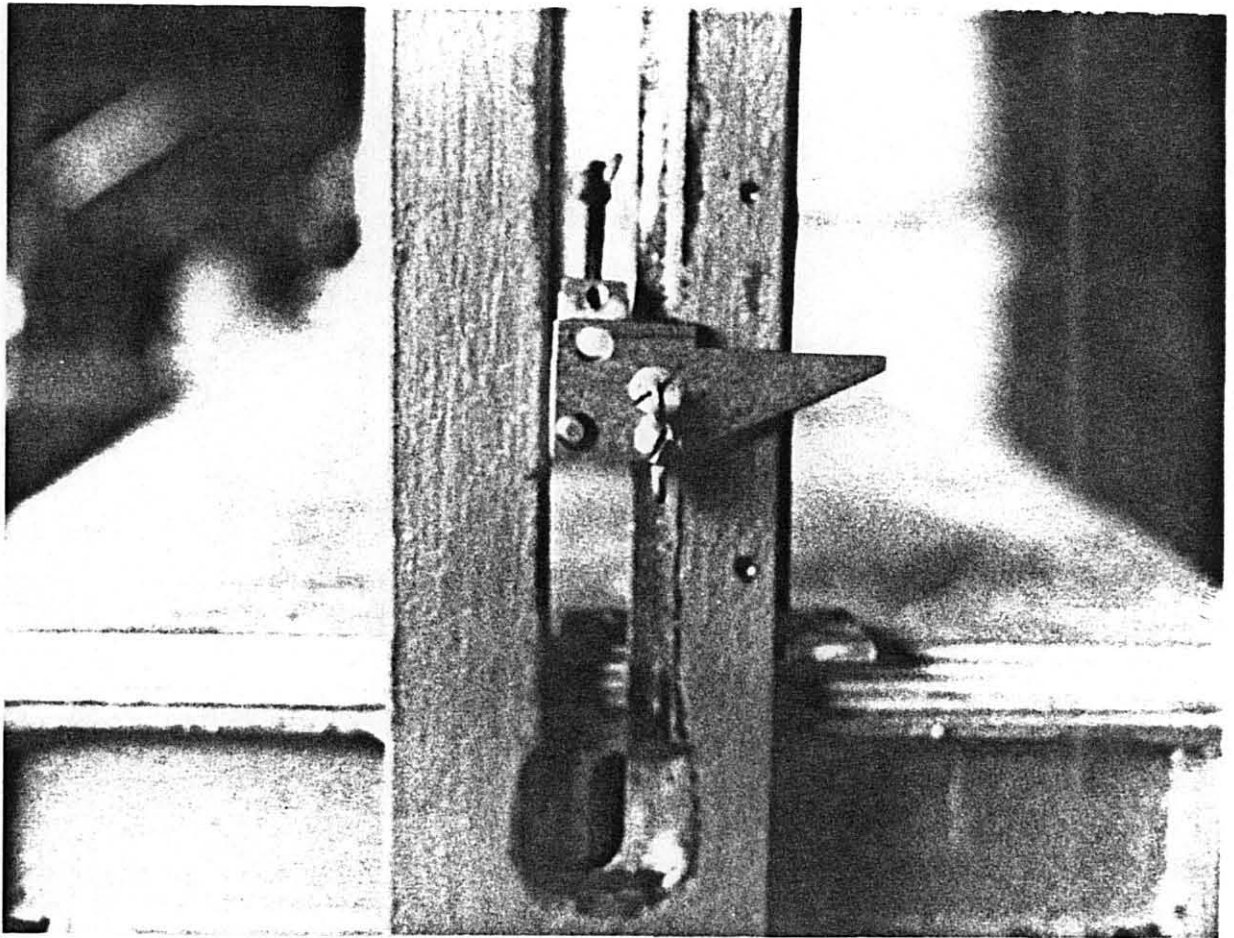


FIGURA 48. PEÇA DE FIXAÇÃO DE RELÓGIOS COMPARADORES NO APARELHO DE MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS.

Todo o sistema acima descrito funcionou igualmente nas duas hastes verticais do aparelho, podendo ser mais bem apreciado nas diversas ilustrações apresentadas, quando da exposição sobre a medição de comprimentos de peças de madeira.

Para avaliação da precisão das medições ao longo da altura das hastes verticais do aparelho, várias leituras foram realizadas com os fusos dos relógios comparadores comprimidos por uma “coluna de aferição” de utilização similar pela WEG Motores S.A., conforme ilustrado na Figura 49.

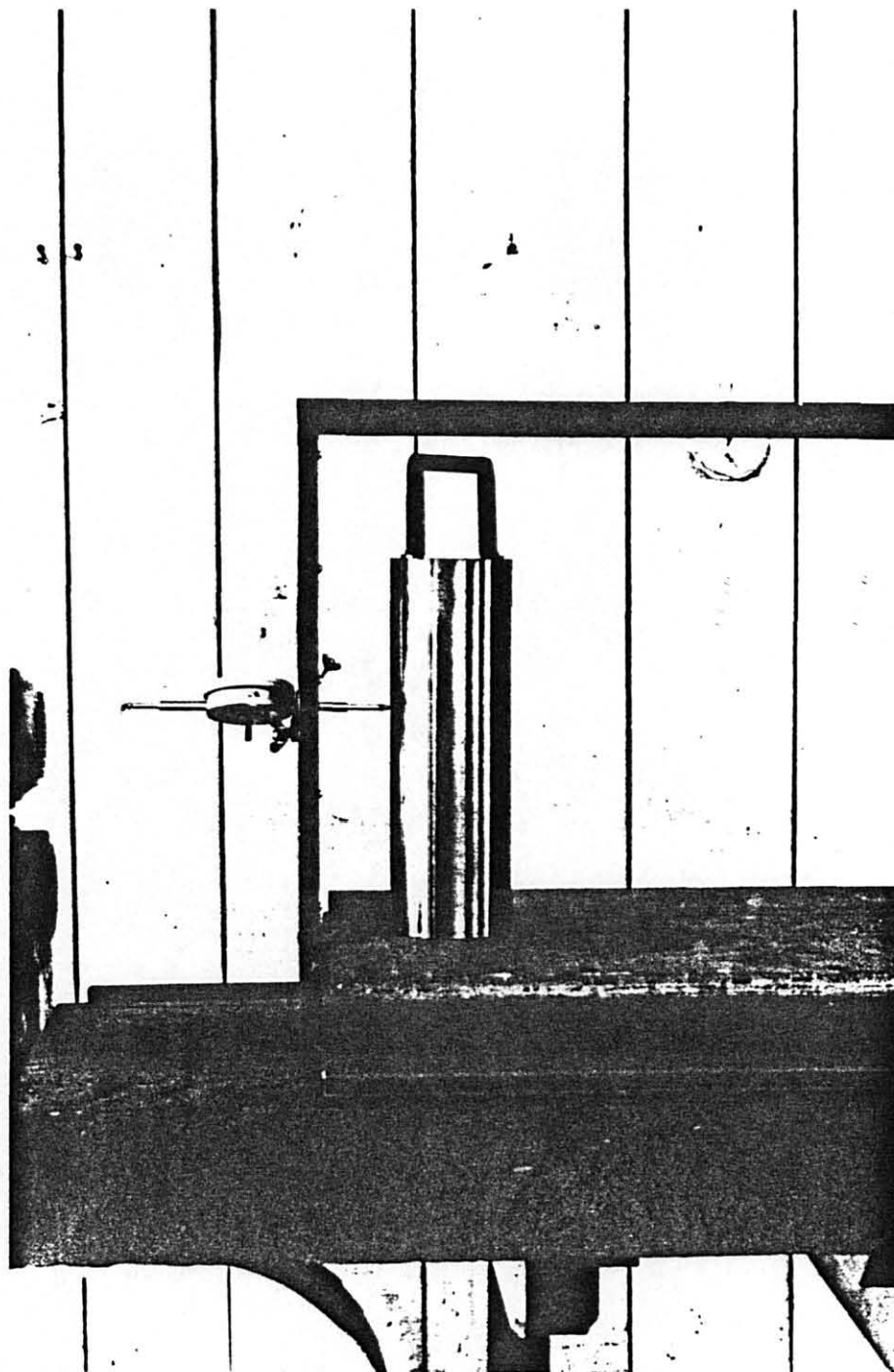


FIGURA 49. COLUNA DE AFERIÇÃO COM DIÂMETRO DE 100,70mm E ALTURA DE 303,54mm.

3.3.2.2 Medições das deformações de crescimento

No aparelho de medição determinaram-se os comprimentos de cada sarrafo definido na tora e na prancha e, após o término do desdobro, de cada um deles isoladamente.

Para medição do comprimento de cada sarrafo isolado (Figura 50), o mesmo foi colocado dentro de uma cantoneira de aço 1020, com 2,304m de comprimento (1/4" de espessura e 2" de aba), sendo comprimido por uma régua do mesmo material, espessura e comprimento, apertada por três sargentos posicionados no centro e próximo de suas extremidades. Os comprimentos da cantoneira e da régua, sendo cerca de 20,0mm inferiores ao do sarrafo, conservaram livres as suas extremidades para a tomada das medidas necessárias. O ajustamento do sargento central, em primeiro lugar, possibilitou sua acomodação para posterior aperto dos outros dois situados nos seus extremos. Todo este procedimento teve por finalidade eliminar os empenamentos ocorrentes no sarrafo, em consequência da liberação das tensões de crescimento longitudinais de tração e de compressão (Item 2.2.1.2.1).

O conjunto (sarrafo, cantoneira, régua e sargentos), quando colocado horizontalmente sobre a mesa do aparelho, tendo os pontos dos fusos dos relógios comparadores em contacto com cada prego existente nos extremos do sarrafo (Figura 50 e 51), possibilitou a obtenção do comprimento deste último, através da fórmula:

$$S_s = A + G - D$$

onde,

S_s = comprimento do sarrafo isoladamente (em mm);

A = 2.320mm (comprimento padrão de deformação preestabelecido - Item 3.2.2);

G = Soma das leituras E e F obtidas nos dois relógios comparadores identificados pelos n^{os} 1 e 2, respectivamente, quando da medição dos comprimentos dos sarrafos (em mm); e

D = 61,388mm para medição dos comprimentos dos sarrafos da tora 1.1, ou

D = 64,757mm para medição dos comprimentos dos sarrafos das toras 2.1, 3.1, 4.1 e 5.1.

Os valores de "D" (soma das leituras nos relógios comparadores de n^{os} 1 e 2) foram obtidos ao efetuar-se diversas medições do comprimento de uma régua de aço 1020, com 2.320mm (valor de "A"), apoiada sobre a mesa do aparelho, sendo a existência de dois valores explicada pela colocação diferenciada dos relógios em suas peças de fixação. No primeiro caso ($D = 61,388\text{mm}$), os relógios colocados um pouco mais afastados nas peças

de fixação propiciaram menor compressão dos seus fusos e, portanto, menor valor. No segundo ($D = 64,757\text{mm}$), decidiu-se por prender cada um dos relógios com o aro maior do mostrador completamente apoiado na peça.

A fórmula utilizada tem a função de detectar (em centésimos de milímetro), as diferenças que ocorreram, a maior ou a menor, nos comprimentos das peças de madeira medidas, em relação ao padrão preestabelecido de 2.320mm , ou seja, de determinar o comprimento real destas peças.

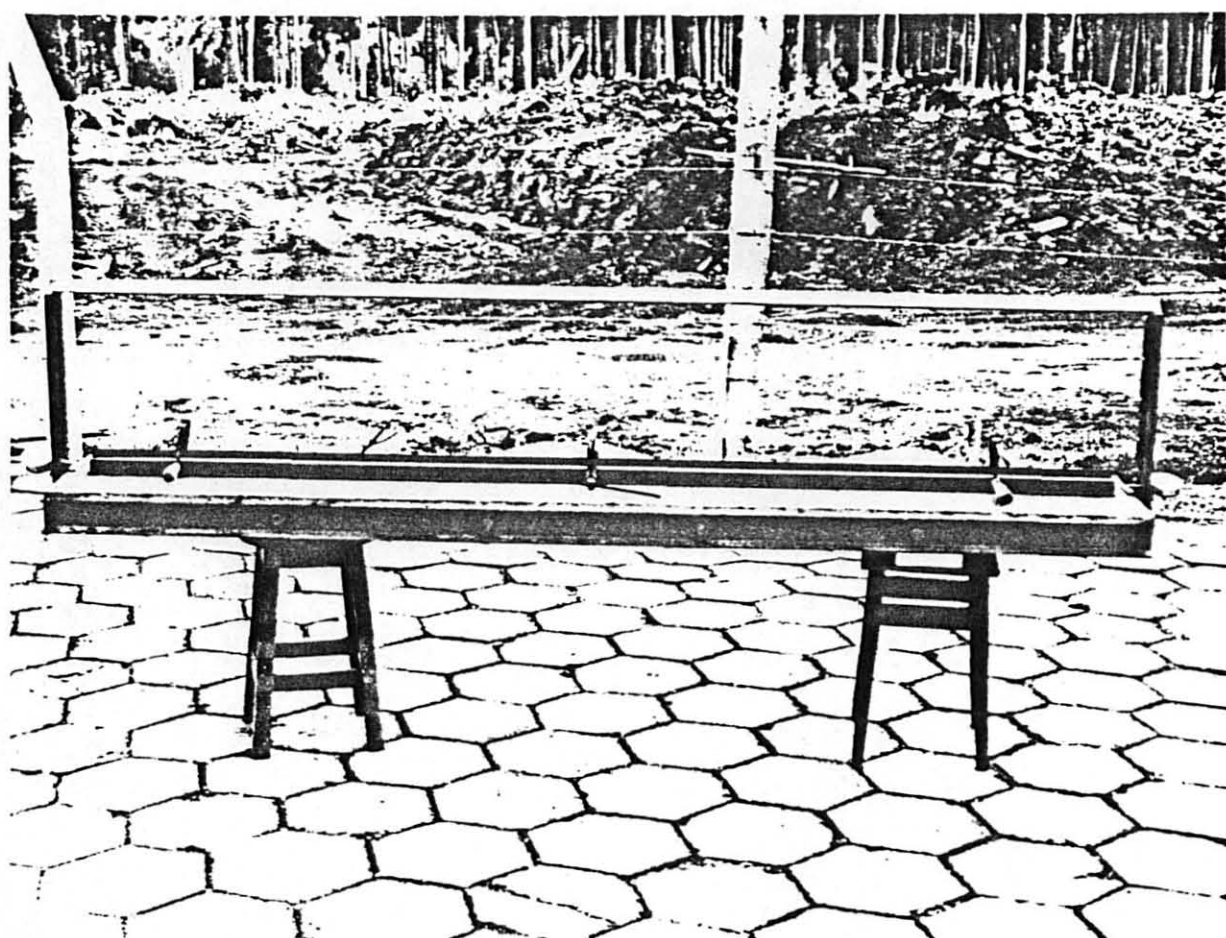


FIGURA 50. MEDIÇÃO DO COMPRIMENTO DE UM SARRAFO UTILIZANDO O APARELHO FABRICADO.

Estas diferenças são explicadas em função dos cortes transversais terem sido efetuados com uma motosserra, sem nenhuma precisão, e da liberação das tensões de

crescimento que aumentam ou diminuem o comprimento das peças, conforme sua localização em zonas de compressão ou tração, respectivamente.

Assim, três situações podem ocorrer quando da aplicação da fórmula em questão.

Considerando o valor de $D = 64,757\text{mm}$ tem-se:

$$G > 64,757\text{mm} \text{ ou } G = 64,757 + x \text{ (mm):}$$

$$S_s = A + G - D$$

$$S_s = 2.320 + (64,757 + x) - 64,757$$

$$S_s = 2.320 + x \text{ (mm)}, \text{ obtendo-se um valor de } S_s \text{ maior do que o comprimento padrão de } x \text{ (mm);}$$

$$G = 64,757\text{mm:}$$

$$S_s = A + G - D$$

$$S_s = 2.320 + 64,757 - 64,757$$

$$S_s = 2.320\text{mm}, \text{ que é igual ao comprimento padrão preestabelecido; e}$$

$$G < 64,757\text{mm} \text{ ou } G = 64,757 - x \text{ (mm):}$$

$$S_s = A + G - D$$

$$S_s = 2.320 + (64,757 - x) - 64,757$$

$$S_s = 2.320 - x \text{ (mm)}, \text{ sendo o valor de } S_s \text{ menor do que o comprimento padrão de } x \text{ (mm).}$$

Para o valor de $D = 61,388\text{mm}$ o mesmo raciocínio é aplicado.

A Figura 51 ilustra, com detalhe, a forma de medição empregada em um dos extremos do aparelho.

Na determinação dos comprimentos dos sarrafos dentro das pranchas, utilizou-se um procedimento bastante similar ao recém-descrito, em função das medições terem sido realizadas diretamente sobre a mesa do aparelho.

As pranchas foram simplesmente apoiadas na mesa, tomando-se os devidos cuidados para posicionar as pontas dos fusos dos relógios comparadores sobre os pregos indicativos de um mesmo sarrafo no seu interior, procedimento bastante simplificado ao considerar-se que correspondentes pregos receberam o mesmo número de identificação em cada um dos extremos de um mesmo sarrafo.

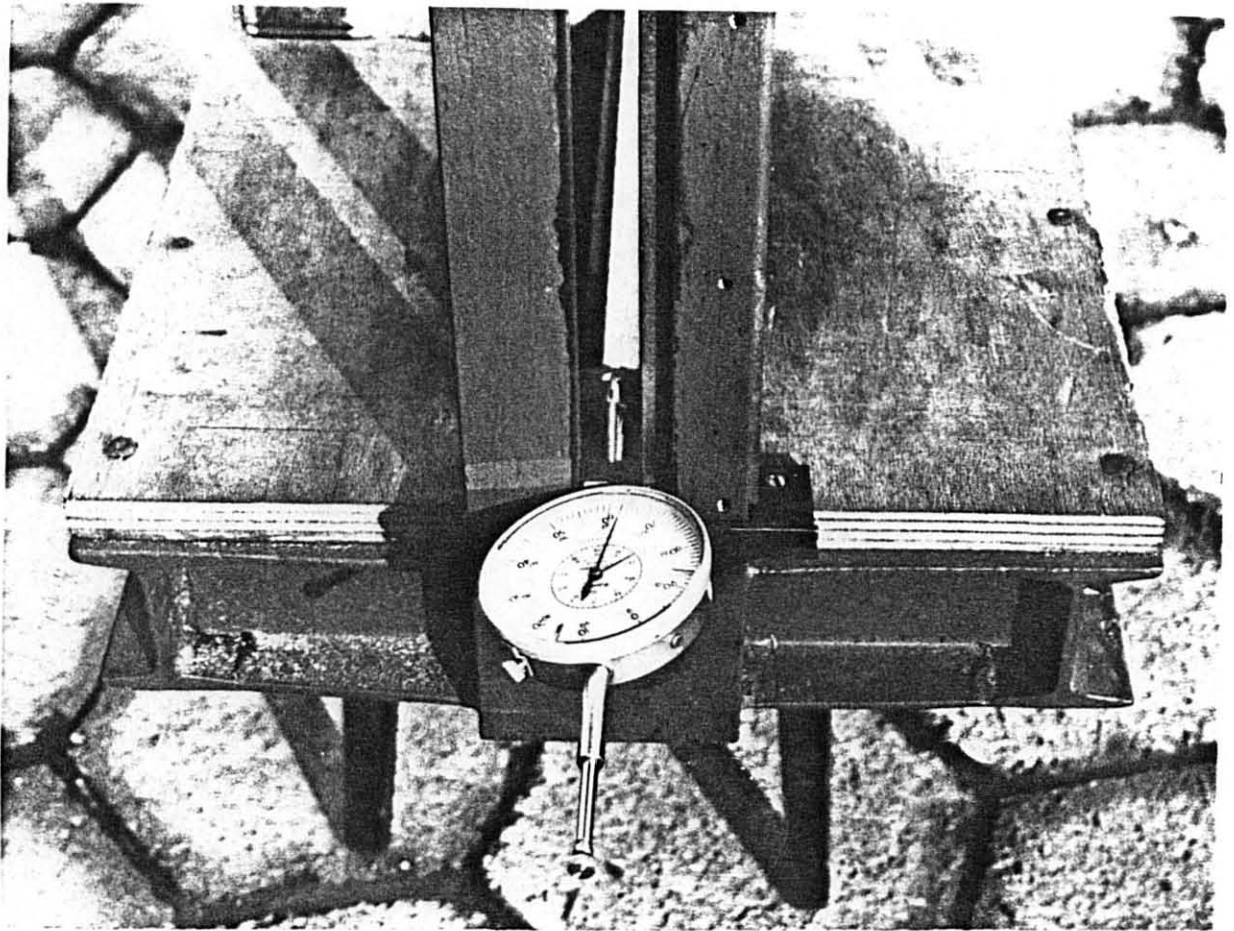


FIGURA 51. DETALHE DA DETERMINAÇÃO DO COMPRIMENTO DE UM SARRAFO, ILUSTRANDO A COLOCAÇÃO DO RELÓGIO COMPARADOR EM UM DOS EXTREMOS DO APARELHO DE MEDIÇÃO.

Eliminaram-se os empenamentos ocorrentes nas pranchas, em função da liberação de tensões, colocando-se suas faces côncavas voltadas para a mesa e utilizando-se pesos diversos sobre as partes convexas, forçando-as para baixo, até se conseguir o endireitamento necessário.

Em decorrência da similaridade dos dois métodos, a fórmula utilizada para determinação dos comprimentos dos sarrafos dentro das pranchas é também análoga à anterior:

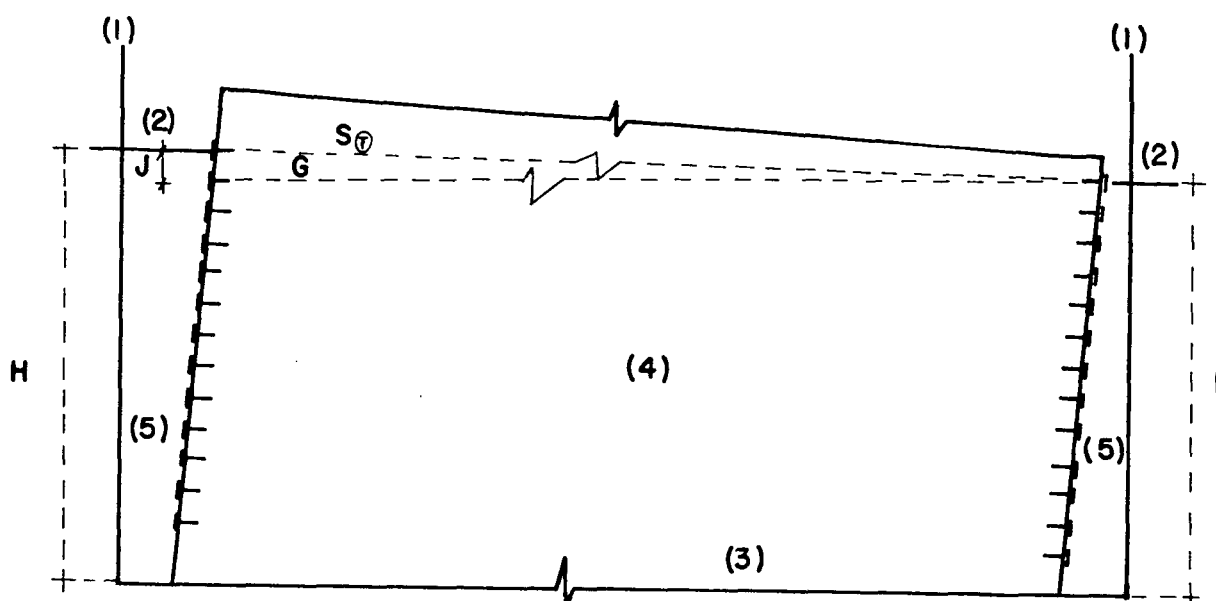
$$S_p = A + G - D$$

onde,

S_p = comprimento do sarrafo dentro da prancha (em mm), com A, G e D possuindo os mesmos significados já mencionados.

A determinação dos comprimentos dos sarrafos no interior da tora introduziu uma nova variável, em relação aos casos anteriores, em função da leitura nos relógios comparadores ser realizada a diferentes alturas em cada uma das hastes verticais do aparelho e não paralelamente à sua mesa.

A conicidade da tora e a existência de irregularidades ao longo do seu comprimento colocaram o sarrafo na posição de hipotenusa de um triângulo retângulo, tendo como catetos a leitura indicada pelos relógios comparadores e a diferença de alturas das suas posições nas hastes do aparelho (Figura 52).



G = Soma das leituras nos dois relógios comparadores
 $J = H - I$ = Diferença entre as alturas de colocação dos dois relógios comparadores

- (1) Haste vertical do aparelho de medição
- (2) Fusos dos relógios comparadores
- (3) Mesa do aparelho de medição
- (4) Tora
- (5) Pregos ou pontos de contacto de medições

FIGURA 52. MEDIÇÃO DO COMPRIMENTO DE UM SARRAFO DENTRO DE UMA TORA (S_p) UTILIZANDO O APARELHO FABRICADO.

Desta forma, os comprimentos dos sarrafos dentro da tora (S_i) foram determinados em milímetros, segundo a fórmula:

$S_i = \sqrt{(A + G - D)^2 + J^2}$, possuindo cada símbolo os mesmos significados anteriores, complementados pela Figura 52.

Pelo traçado do diagrama de corte (Figura 43), as alturas H e I são iguais quando a tora é mantida na exata posição da marcação das linhas delineativas das seções dos sarrafos, em função de tal procedimento ter se baseado nas distâncias horizontais e verticais à serra-de-fita nos seus dois topos (Item 3.2.2). Entretanto, os comprimentos dos sarrafos foram medidos em qualquer ordem em relação às suas distribuições dentro da tora, e esta colocada na melhor posição de alinhamento dos dois pregos indicativos de cada um deles. Assim, o valor de H, sempre referente às medições realizadas no topo maior (Figura 52), deveria ser maior do que o de I, fato este nem sempre observado devido às irregularidades existentes ao longo do comprimento da tora. Neste caso, o valor de $J = |H - I|$, que deveria ser utilizado na fórmula, somente é dispensado em função do mesmo ser elevado ao quadrado.

Na Figura 53 pode-se observar a utilização dos relógios comparadores na medição do comprimento de sarrafos dentro da tora, de forma similar à medição isolada dos mesmos (Figuras 50 e 51).

A Figura 54 apresenta a medição da altura correspondente à obtenção da leitura no relógio em uma das hastes do aparelho, utilizando-se um paquímetro com seus bicos apoiados nas duas peças referenciais de apoio, mencionadas no item 3.3.2 (Figuras 47 e 48).

Obtidos os comprimentos dos sarrafos nas três situações apresentadas: comprimentos dentro da tora (S_t), dentro da prancha (S_p) e isoladamente (S_s), determinaram-se as deformações de crescimento longitudinais em unidades de microdeformações ($1\mu\varepsilon = 10^{-6}$ mm/mm), segundo o procedimento usual tratado na Revisão de Literatura (Item 2.2):

$$\varepsilon_{tp} = \frac{S_t - S_p}{S_p} \cdot 10^6,$$

$$\varepsilon_{ps} = \frac{S_p - S_s}{S_s} \cdot 10^6, \text{ e}$$

$$\varepsilon_{ts} = \frac{S_t - S_s}{S_s} \cdot 10^6$$

onde,

ε_{ip} = deformação de crescimento longitudinal quando da liberação das tensões pelo desdobro da tora em pranchas, em unidades de microdeformações ($\mu\varepsilon$);

ε_{ps} = deformação de crescimento longitudinal quando da liberação das tensões pelo desdobro de pranchas em sarrafos ($\mu\varepsilon$);

ε_{ts} = deformação de crescimento longitudinal quando da liberação das tensões pelo desdobro de toras em sarrafos ($\mu\varepsilon$); e

S_t , S_p e S_s = comprimentos dos sarrafos dentro da tora, da prancha e isolados (em mm), respectivamente, conforme definidos anteriormente.

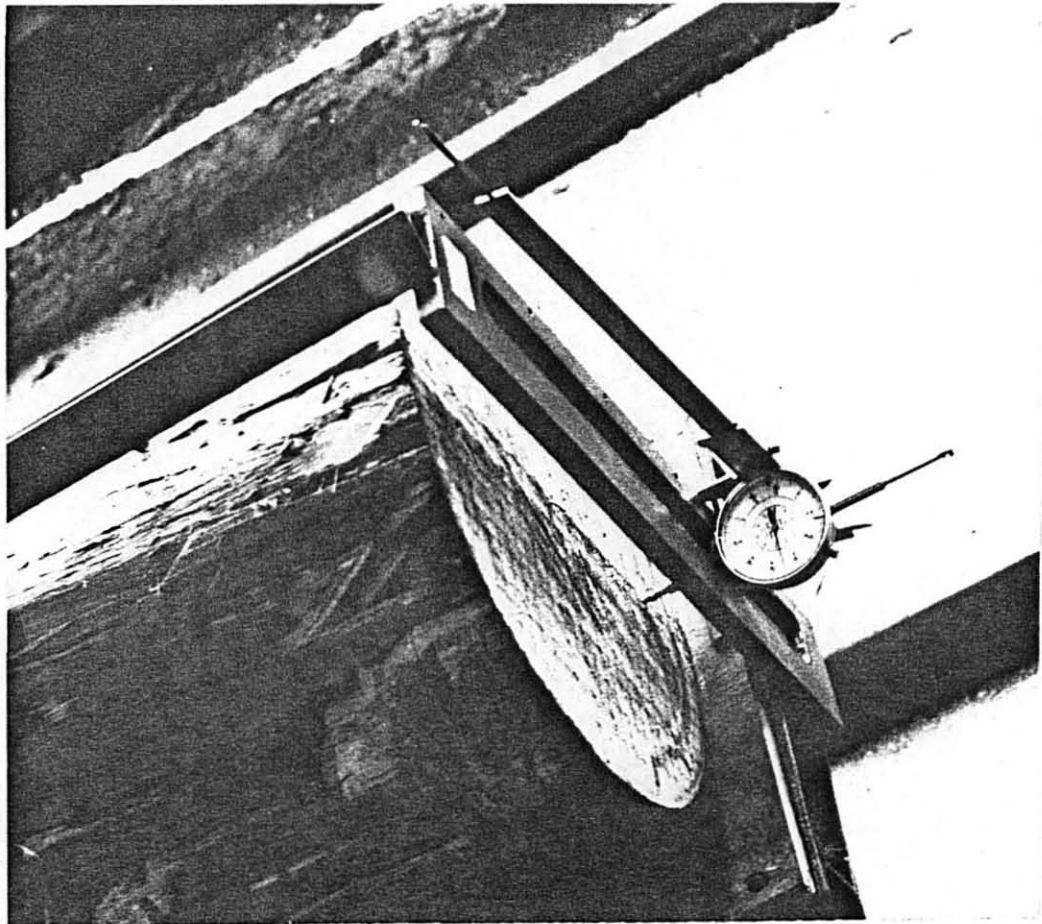


FIGURA 53. DETALHE DO POSICIONAMENTO DO RELÓGIO COMPARADOR QUANDO DA MEDIÇÃO DO COMPRIMENTO DE UM SARRAFO DENTRO DA TORA.

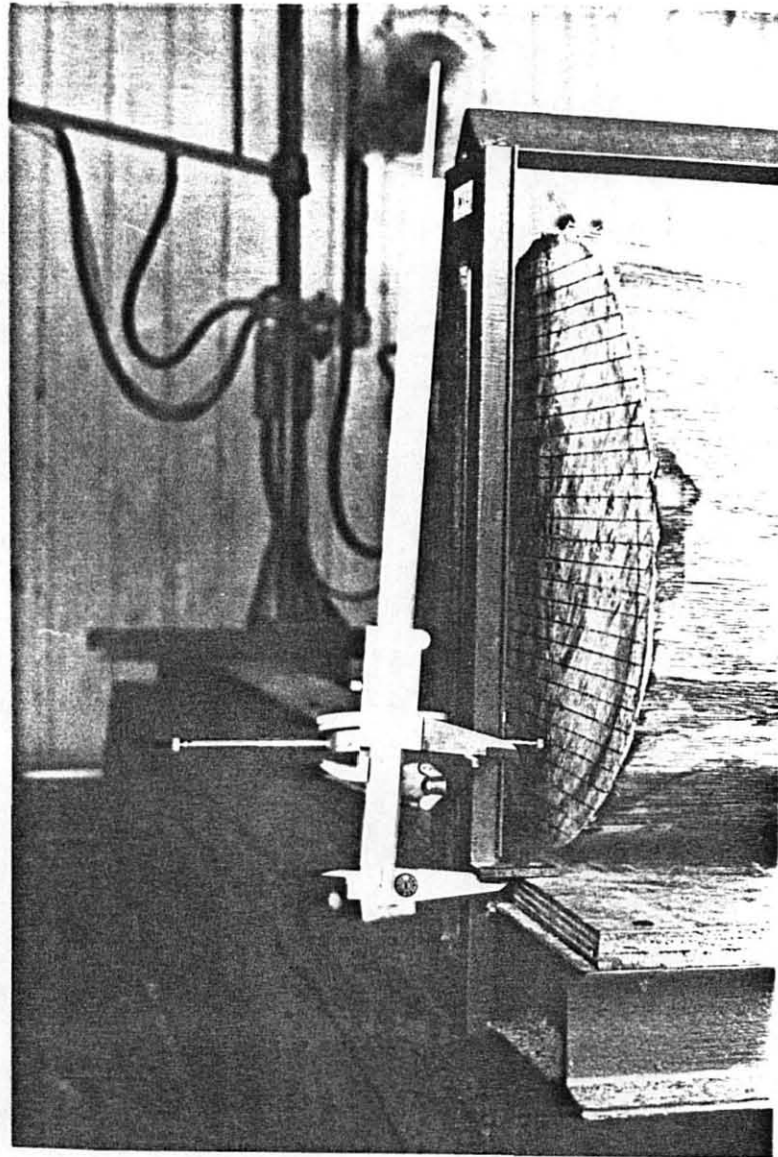


FIGURA 54. DETALHE DA MEDIÇÃO DA ALTURA CORRESPONDENTE À LEITURA EM UM RELÓGIO COMPARADOR (FIGURA 53) EM UMA DAS HASTES VERTICAIS DO APARELHO FABRICADO.

As correspondentes tensões de crescimento foram calculadas somente com a finalidade de obter-se uma idéia de suas ordens de grandezas, para o que utilizou-se o módulo de ruptura médio na flexão estática, determinado de acordo com as normas COPANT (Item 3.3.1) e utilizando a Lei de Hooke ($\sigma = E\varepsilon$ - Item 2.2).

A fase experimental referente à determinação dos comprimentos dos sarrafos dentro

da tora, da prancha e isoladamente foi conduzida nesta ordem, embora as correspondentes fórmulas utilizadas tenham sido apresentadas na ordem inversa para facilidade de exposição.

Imediatamente, terminada a marcação do diagrama de corte no topo de cada tora, procedeu-se à medição do comprimento dos sarrafos no seu interior.

A medição dos correspondentes comprimentos dentro das pranchas somente foi realizada em algumas delas, obtidas das toras 1.1, 2.1 e 6.1, paralelamente às suas obtenções através do desdobro.

Da mesma forma, paralelamente ao desdobro das pranchas em sarrafos, procedeu-se à medição dos comprimentos isolados destes últimos.

Conforme já mencionado, cada peça desdobrada foi convenientemente limpa com escova e enrolada em lona plástica, onde foi mantida até a tomada das medidas necessárias, dificultando o processo de secagem.

A temperatura, umidade relativa e horas de realização de todas as fases experimentais (desdobros e medições) foram devidamente anotadas.

Tanto nesta fase experimental como em outras que se fizeram necessárias, utilizaram-se os instrumentos abaixo especificados:

- Trena STANLEY com 3,00m de comprimento e precisão de 1mm;
- Relógio comparador MITUTOYO, com intervalo de medição variando de 0,01 a 50,00mm e precisão de 0,01mm.

Os relógios foram aferidos anteriormente ao início dos experimentos, utilizando um metroscópio de aferição ULM-CARL ZEISS JENA (método abe), acusando diferenças máximas de -0,007 a + 0,005mm, portanto, muito inferiores à precisão dos mesmos.

- Paquímetro MITUTOYO, com intervalo de medição variando de 0,02 a 350mm e precisão de 0,02mm.
- Termohigrômetro SUNDO, com intervalo de medição variando de 0 a 100%.
- Medidor de teor de umidade de madeira DIGISYSTEM, modelo DL-822, com precisão de 0,1%.

3.3.3 Determinação das deformações de crescimento transversais

3.3.3.1. Deformações tangenciais

A metodologia utilizada por JACOBS (1945) e BOYD (1950a), descrita no item 2.2.2.1, foi adotada nesta fase experimental.

Em uma das seções transversais do disco identificado pelo nº 1-7-CD (com espessura variando de 50 a 57mm), obtido conforme descrito no item 3.2.3, marcaram-se dois diâmetros perpendiculares entre si e passando pela medula. Nesta mesma seção, com centro na medula, traçou-se uma circunferência de raio igual ao menor raio do disco menos 3,0cm. A 1,12cm, no interior desta circunferência e sobre cada diâmetro, fixou-se um prego "PREGMAR P 6 x 6", com haste de 15,0mm de comprimento e diâmetro de 1,20mm. Os pregos tiveram suas pontas ligeiramente amassadas dificultando, deste modo, a separação de fibras e o aparecimento de rachas. Foram deixados 7mm de suas hastes, sobressaindo perpendicularmente da superfície transversal do disco, para servirem como apoio ao instrumento de medição.

Prolongando-se as extremidades das linhas diametrais, a partir da borda do disco e ao longo de suas espessuras, obtiveram-se, no meio destas últimas, quatro outros pontos de medição, onde se fixaram pregos da mesma forma acima descrita.

Os oito pregos, assim fixados, definiram as distâncias diametrais a serem medidas, as quais foram identificadas pelos números de 1 a 8. As distâncias 1-2 (D_1) e 5-6 (M_1) referindo-se a um dos diâmetros e as 3-4 (D_2) e 7-8 (M_2) ao outro, pelos seus pontos de medição situados na espessura e na seção transversal, respectivamente.

Obtidas as medidas entre estes pares de pregos (D_1 , M_1 , D_2 e M_2), cortou-se o anel circular pelo lado interno da linha da circunferência traçada, para novamente tomarem-se as correspondentes medidas (D_1' , M_1' , D_2' , M_2'), através das quais foi possível determinar a deformação de crescimento tangencial em unidades de microdeformações ($1\mu\epsilon = 10^{-6}$ mm/mm), utilizando-se as fórmulas:

$$\varepsilon_{c_1} = \frac{D_1 - D_1'}{D_1'} \cdot 10^6$$

$$\varepsilon_{c_2} = \frac{D_2 - D_2'}{D_2'} \cdot 10^6$$

A média entre estes dois valores é normalmente utilizada a fim de eliminar erros, devido às distorções nos anéis circulares cortados.

Os valores M_1, M_1', M_2, M_2' serão considerados, posteriormente, nas discussões dos resultados sobre o estado de tensão transversal no interior do tronco de uma árvore.

Todas as medidas foram obtidas com um paquímetro de precisão igual a 0,02mm e a temperatura e umidade relativa, anotadas durante o experimento, com os instrumentos especificados no item anterior.

As Figuras 55 e 56 ilustram toda a descrição do experimento realizado.

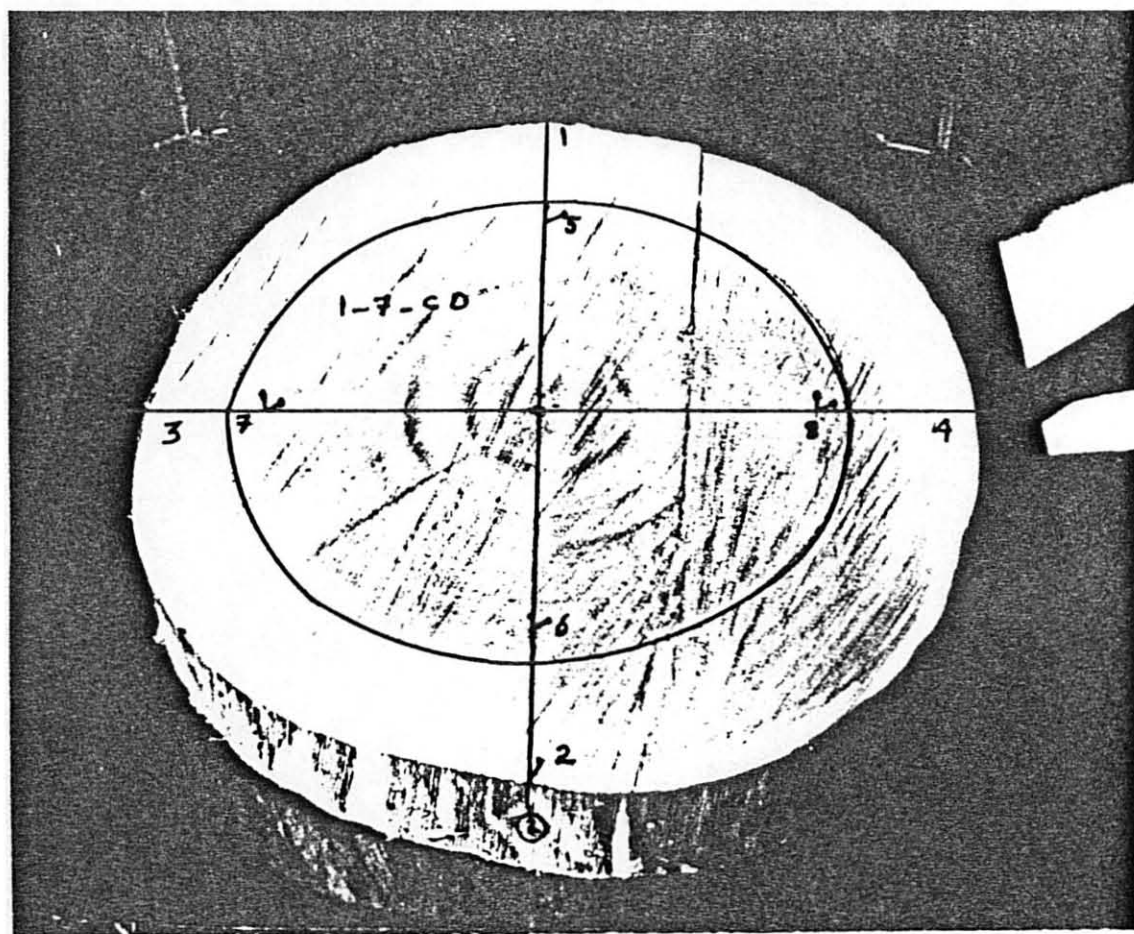


FIGURA 55. MARCAÇÃO DE UM DISCO DE MADEIRA PARA DETERMINAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO TANGENCIAIS.

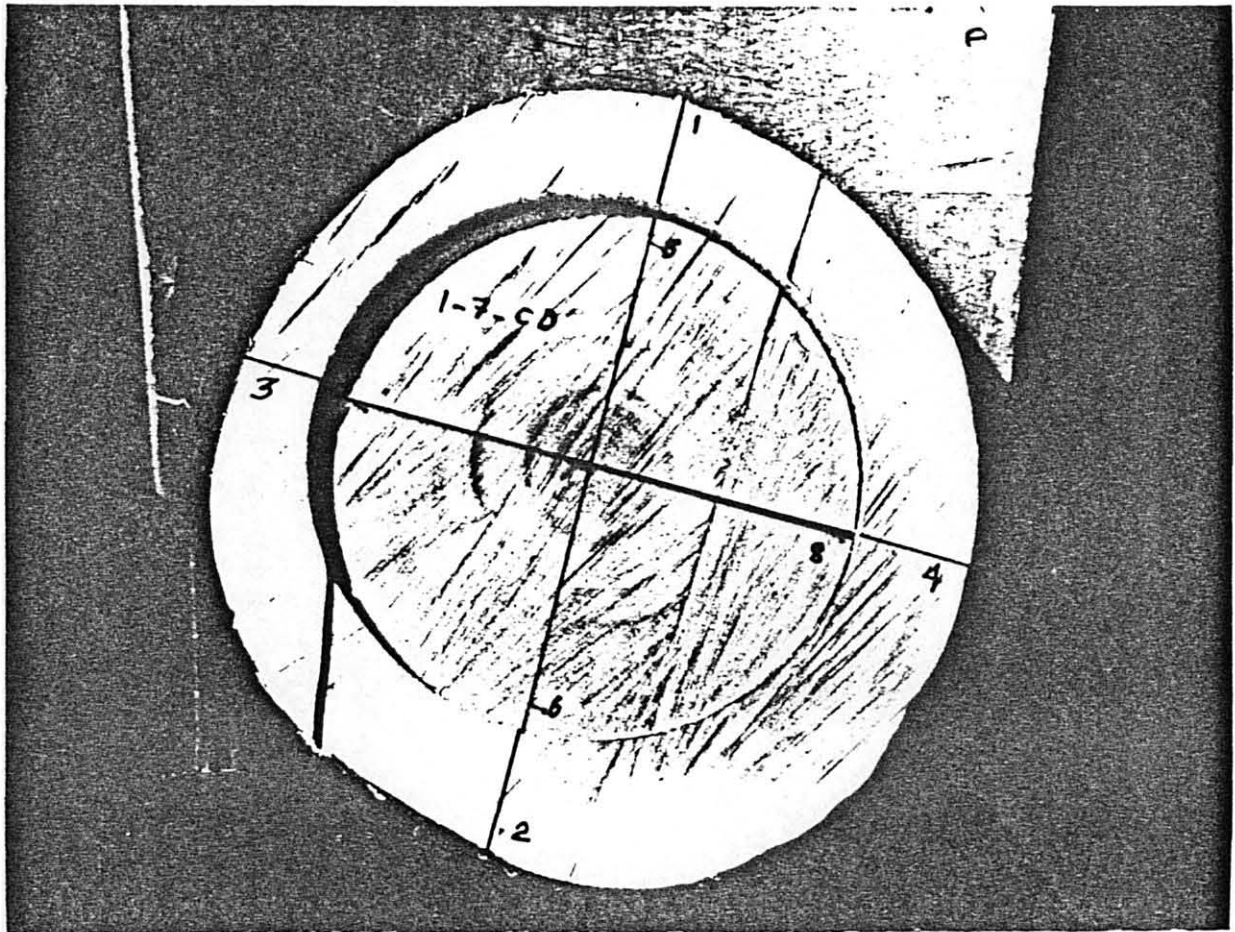


FIGURA 56. CORTE DO ANEL EXTERNO DE UM DISCO DE MADEIRA PARA LIBERAÇÃO DE TENSÕES E MEDIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO TANGENCIAIS.

3.3.3.2 Deformações radiais

Nesta fase experimental adotou-se a metodologia proposta por BOYD (1950a), conforme descrita no item 2.2.2.2, utilizando-se o disco identificado pelo nº 1-8-RD com espessura aproximada de 4,5cm, obtido de acordo com o procedimento apresentado no item 3.2.3.

Em uma das seções transversais do disco, traçou-se uma figura em forma de “V” (forma de cunha) com vértice na medula e abertura de 10,0cm na periferia. Na medula e em

cada uma das extremidades deste “V”, a uma distância de 1,0cm da periferia, fixaram-se três pregos. Entre os dois pregos existentes em cada lado deste “V” foram colocados outros dois, mantendo eqüidistância entre todos eles (aproximadamente 5,0cm).

Os pregos, da mesma marca daqueles utilizados no item anterior, também foram fixados da mesma forma, mantendo-se 7,0mm de suas hastes livres para apoio de instrumentos de medição.

Um segundo “V”, traçado exteriormente ao primeiro e com seus lados distanciados de 1,0cm, definiu a linha de corte com uma abertura na periferia igual a 12,0cm.

Os pregos numerados de 1 a 7 a partir da medula, a qual recebeu o nº 1, 2 a 4 em um dos lados do “V” e 5 a 7 no outro, definiram as distâncias radiais de medições entre cada um dos seus pares: 1-2 (A), 2-3 (B), 3-4(C), 1-5 (D), 5-6 (E), 6-7(F). Após o corte da figura, estas mesmas distâncias foram denominadas de A’ a F’.

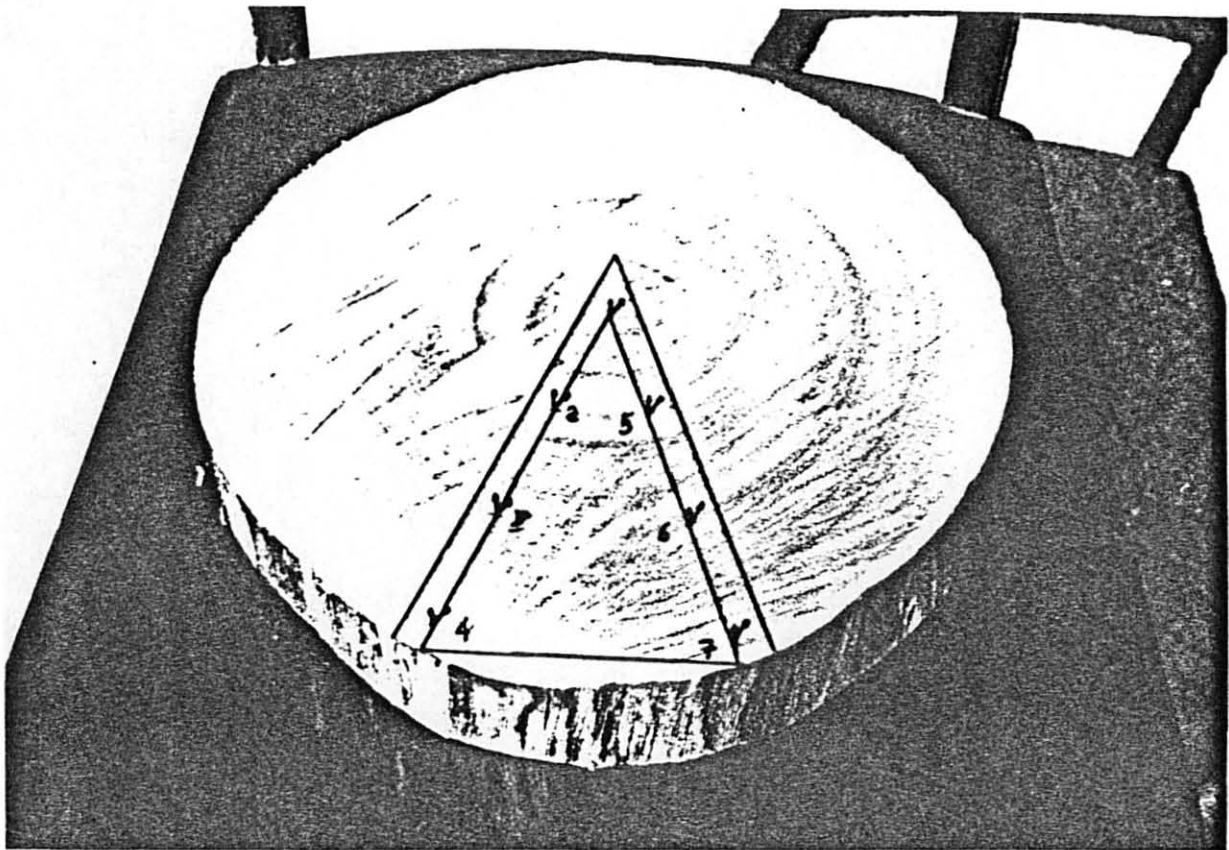
Obtidas todas as medidas mencionadas, utilizando-se um paquímetro com precisão de 0,02mm (Item 3.3.2.2), as deformações de crescimento radiais foram determinadas através da diferença entre leituras efetuadas antes e após o corte e em relação a esta última. Assim, exemplificando-se: para o par de pregos 1-2 a deformação específica radial ($\epsilon_{r(1-2)}$) foi calculada em unidades de microdeformações ($1\mu\epsilon = 10^{-6}\text{mm/mm}$), utilizando-se a fórmula:

$$\epsilon_{r(1-2)} = \frac{A - A'}{A'} \cdot 10^6$$

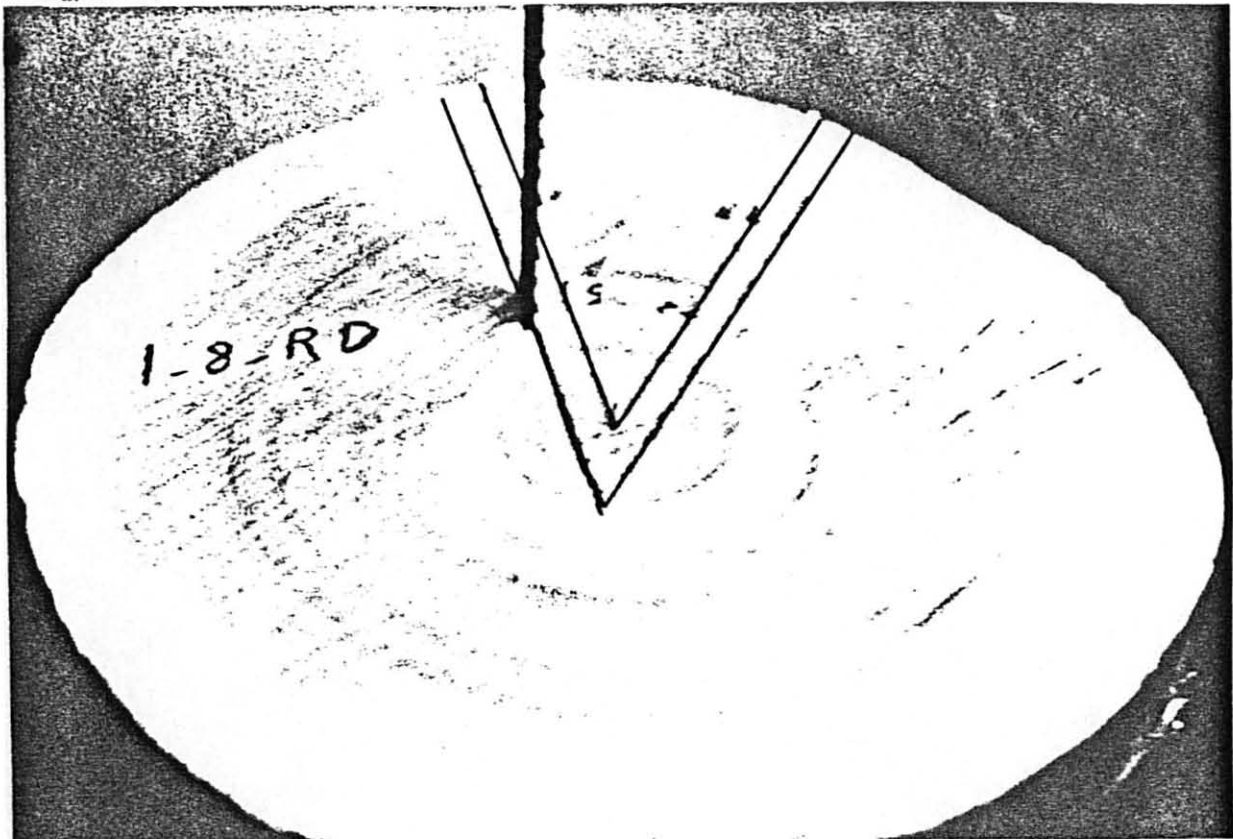
Similarmente ao procedimento adotado por BOYD (1950a), após terem sido realizadas todas as medições referidas, dividiu-se a figura em “V”, cortada do disco, entre os pares de pregos 2-3 e 5-6, a fim de se verificar se todas as tensões foram liberadas.

A temperatura e a umidade relativa, como em todo o experimento, foram devidamente anotadas.

As Figuras 57 e 58 ilustram o experimento descrito.



a.



b.

FIGURA 57. DETERMINAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO RADIAIS. a. MARCAÇÃO DE UM DISCO. b. CORTE DE UMA FIGURA EM FORMA DE "V", NO DISCO DE MADEIRA, PARA LIBERAÇÃO DE TENSÕES.

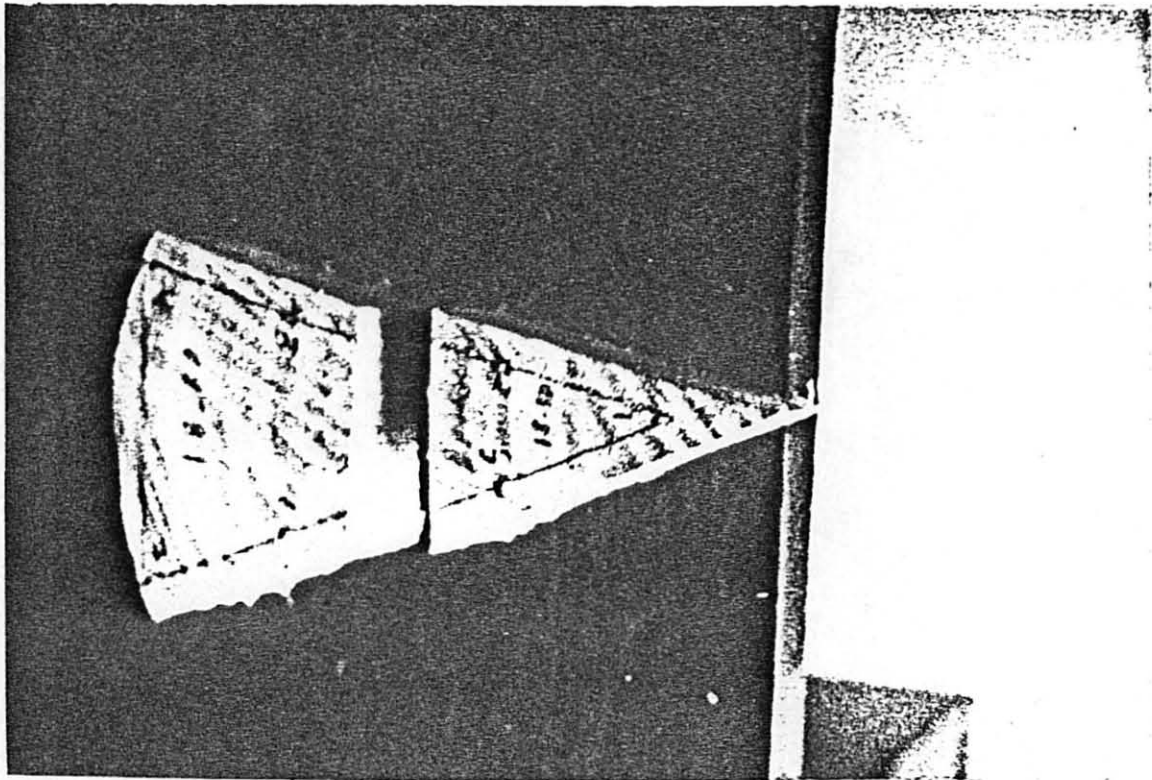


FIGURA 58. SUBDIVISÃO DE UMA FIGURA EM FORMA DE "V" (FIGURA 57) EM SEÇÕES MENORES PARA COMPROVAÇÃO DA TOTAL LIBERAÇÃO DE TENSÕES, NA DETERMINAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO RADIAIS.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização da madeira

4.1.1 Identificação da espécie

Toda a madeira utilizada no experimento foi obtida de cinco árvores selecionadas ao acaso no talhão nº 6 do Projeto Porto Itaperiú - Barra Velha - SC (Item 3.1).

A sua identificação, conforme análises de ALFONSO (1989), correspondeu à espécie de *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden, da família das Myrtaceae.

4.1.2 Caracteres gerais das árvores e da madeira

A descrição das cinco árvores selecionadas, incluindo alturas, diâmetros e aspectos de sanidade, encontra-se apresentada na Tabela 7 do item 3.1. Em resumo, possuíam fustes, verticais retilíneos, copas aproximadamente centradas, marcas de calosidade de galhos normais para os reflorestamentos da espécie e aspecto de perfeita sanidade. As suas alturas comerciais, até um diâmetro de 20,0cm, variaram de 20,0 a 29,0m e as alturas totais de 38,0 a 44,0m. Os diâmetros à altura do peito (DAP), com casca, apresentaram uma variação entre 38,2 a 41,5cm (Tabela 7).

Em função da exigência de um DAP mínimo de 32,0 cm, as árvores selecionadas tiveram caráter dominante na área do reflorestamento considerada para a amostragem. Apenas

30% das 41 árvores medidas em uma fase preliminar satisfizeram tal condição.

As características das toras utilizadas para a determinação das deformações de crescimento longitudinais estão apresentadas na Tabela 8, satisfazendo, a princípio, todas as condições de madeira normal da espécie.

Influenciando os resultados obtidos, entretanto, devem ser citadas a ocorrência de rachas e a excentricidade mais acentuada da medula em algumas toras (Tabela 8).

Através de observações anatômicas macroscópicas e da análise dos caracteres gerais da madeira, utilizando-se os cinco discos retirados a aproximadamente 1,45m de altura do solo, obtiveram-se os seguintes resultados:

- Cerne/alburno: pouco distintos;
- Cor do cerne: rosa (5YR 8/3);
- Cor do alburno: branco rosado (7,5YR 8/2);
- Grã: direita com tendência à revessa;
- Textura: média;
- Raios: finos, baixos, não estratificados e visíveis somente sob lente de 10X, com dificuldade;
- Canal secretor axial: não observado;
- Poros: médios e vazios com tendência para arranjos diagonais;
- Anéis de crescimento: pouco distintos, sendo de três a quatro vezes mais largos na madeira juvenil do que na madeira adulta;
- Espessura da casca: 6,0 a 10,0mm.

Os anéis de crescimento, sendo pouco distintos, não permitiram a determinação da idade correta das árvores. Entretanto, a idade de 11 anos considerada (Item 3.1) pode ser aceita como verdadeira. Ocorreu acentuado crescimento na fase juvenil, uma vez que na madeira adulta foram observados, aproximadamente, 5 anéis nos últimos 6,0cm próximos à casca.

Nesta tese aos lenhos "juvenil" e "adulto" correspondem a porção da madeira situada "próxima à medula" e "à casca", respectivamente. Nenhuma determinação específica

foi realizada para verificar a diferenciação entre as mesmas.

O diâmetro médio (36,0cm) dos cinco discos indica um crescimento radial, da ordem de 3,3cm/ano, mais elevado do que aqueles observados para a mesma espécie em outras regiões geográficas. À altura do peito e para a mesma espécie e idade, FERREIRA (1972) reporta um diâmetro médio de 22,0cm (incremento médio de 2,0cm/ano) para as medições de 12 árvores da região de Agudos - SP. Este diâmetro permanece praticamente constante até 16 anos, idade esta em que apenas 20,6cm é registrado, de acordo com observações feitas pelo autor. TAYLOR (1973b) registra uma razão de crescimento diamétrica média variando de 1,7 a 2,3cm/ano para as idades de 15 a 21 anos (cinco árvores amostradas por cada idade), em diferentes regiões da República da África do Sul.

Segundo TAYLOR, a razão de crescimento não tem influência na densidade da madeira, propriedade aceita como correlacionável com as deformações de crescimento (NICHOLSON et al., 1972 e 1975; BOYD, 1950), mas não totalmente comprovada (MALAN, 1985 e FERNANDES, 1982).

Ao considerar-se o primeiro caso e mesmo nas conclusões de MALAN (1985) e NICHOLSON (1973b), comentadas nos itens 2.2.3 e 2.4, respectivamente, o rápido crescimento das árvores utilizadas não influenciou na magnitude das deformações de crescimento obtidas.

4.1.3 Propriedades físicas

4.1.3.1 Teor de umidade

Em experimentos destinados à determinação das deformações de crescimento, o teor de umidade da madeira é medido para confirmação da condição “verde” do material utilizado, uma vez que não é desejada a interferência de outros fatores, principalmente das contrações oriundas da secagem.

Desta forma procederam diversos autores como JACOBS (1939 e 1945), BOYD (1950a), NICHOLSON (1971 e 1973b), OKUYAMA & KIKATA (1975c), SASAKI et al. (1978), SASAKI et al. (1978), ATHERTON (1978) e POST (1979a) para citar apenas algumas publicações importantes utilizadas como referência. Exceções são feitas para pesquisas desenvolvidas com o objetivo de determinar a influência de tratamentos diversos no alívio de tensões, como é o caso de MAEGLIN et al. (1985), que analisa o efeito do processamento da madeira através do método S-D-R (Serragem-secagem-resserragem).

No presente experimento, determinaram-se os valores de 99,31% e 144,23% para os teores de umidade da madeira provenientes do lenho adulto e juvenil, respectivamente, como representativos dos discos utilizados na determinação das deformações de crescimento transversais (Itens 3.2.3 e 3.3.1).

Com referência à determinação das deformações de crescimento longitudinais, os teores de umidade apresentados na Tabela 9 foram obtidos dos últimos sarrafos manuseados em cada fase experimental e, por esta razão, considerados como os valores mínimos ocorrentes.

TABELA 9. VARIACÃO DOS TEORES DE UMIDADE MÍNIMOS DOS SARRAFOS UTILIZADOS NA DETERMINAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS.

Lenho	Valores dos Teores de Umidade Mínimos (%)		
	Menor	Médio	Maior
Adulto ⁽¹⁾	98,2	133,8	153,8
Juvenil ⁽²⁾	71,3	112,7	155,7
Adulto/Juvenil ⁽³⁾	71,3	124,4	155,7

Valores obtidos nos ensaios de (1) três amostras para cada uma de cinco árvores, (2) três para cada uma de quatro árvores e (3) para todas as amostras referidas em (1) e (2).

Os valores obtidos comprovam, portanto, que todas as medições referentes à determinação das deformações de crescimento transversais e longitudinais foram realizadas em condição “verde”, ou seja, com os teores de umidade acima do ponto de saturação das fibras.

4.1.3.2 Densidade

Os valores das densidades verde, saturada, seca e básica são apresentados na Tabela A1.1 (Anexo 1), para cada amostra ensaiada da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden e obedecendo a ordem da altura crescente de suas obtenções (1,50m, 2,61m e 3,62m - Item 3.2.4) nos troncos das árvores.

Na Tabela 10 são identificadas as correspondentes densidades mínimas, máximas e médias, bem como os respectivos desvios padrão e coeficientes de variação.

TABELA 10. VALORES MÉDIOS DAS DENSIDADES VERDE, SATURADA, SECA E BÁSICA E DE SEUS CORRESPONDENTES DESVIOS PADRÃO E COEFICIENTES DE VARIAÇÃO PARA O LENHO ADULTO E JUVENIL DE *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden.

Lenho	Densidade											
	Verde ⁽⁴⁾			Saturada			Seca			Básica		
Adulto ⁽¹⁾	0,78	0,95	1,02	1,10	1,15	1,19	0,44	0,49	0,55	0,37	0,41	0,46
	0,07		7	0,02		2	0,03		7	0,02		6
Juvenil ⁽²⁾	0,63	0,77	0,94	1,07	1,12	1,13	0,37	0,43	0,47	0,32	0,36	0,38
	0,11		14	0,02		2	0,03		7	0,02		6
Adulto/Juvenil ⁽³⁾	0,63	0,87	1,02	1,07	1,13	1,19	0,37	0,46	0,55	0,32	0,39	0,46
	0,13		14	0,03		2	0,04		9	0,03		8

- Valores baseados em ensaios de três amostras para cada uma de cinco árvores (1); três para cada uma de quatro árvores (2) - item 3.2.4; para todas as amostras referidas (3).

- Os teores de umidade correspondente à densidade verde estão relacionados na Tabela 9 (4).

- Para cada conjunto de cinco dados, os três números superiores indicam as densidades mínima, média e máxima (g/cm^3), da esquerda para a direita, respectivamente. O número inferior esquerdo refere-se ao desvio padrão (g/cm^3) e o da direita ao coeficiente de variação (%).

Os coeficientes de variação obtidos são inferiores aos 10% publicados pelo U.S. FOREST PRODUCTS LABORATORY (1974) e aos 9% determinados para a densidade básica de madeiras da região amazônica (LISBOA, s.d.), exceto para as densidades verdes do lenho juvenil e adulto/juvenil. As básica e seca encontram-se dentro da faixa de variação referentes aos resultados de BHAT et al. (1990) e de STÖHR & MACKAY (1983), respectivamente (Tabela A1.2 - Anexo 1).

A análise da confiabilidade dos valores médios, calculados para a madeira dos lenhos adulto e juvenil em conjunto, é considerada através da determinação dos intervalos de

variação em que se encontram as densidades médias verdadeiras da população a que se referem (intervalo de confiança) nos níveis de confiança de 98 e 95 % comumente empregados (Tabela A1.3 - Anexo 1).

Por esta análise, o número de cinco árvores selecionadas, com três amostras para a árvore nº 1 e seis para as demais, é maior do que aquele necessário para estimar-se que os valores médios verdadeiros das densidades saturada e básica encontram-se contidos nos intervalos de variação definidos por ± 5 e $\pm 10\%$ dos valores médios respectivos determinados, considerando o nível de confiança de 98%. Neste mesmo nível, as cinco árvores são suficientes para garantir um intervalo de variação de 10% para a densidade seca e insuficientes para alcançar o intervalo de $\pm 15\%$ para a verde, caso em que ainda faz-se necessário a amostragem de uma árvore.

Para o nível de confiança de 95 %, os intervalos de variação mencionados permanecem os mesmos, confirmando a suficiência da amostragem realizada, inclusive para a densidade verde que alcança um intervalo de variação de $\pm 15\%$ do valor médio estimado.

NOACK (1970) considera que esta última confiabilidade (intervalo de confiança de $\pm 15\%$ da média, a um nível de confiança de 95%) é apenas suficiente para atender a propósitos práticos de investigações preliminares nos estudos das propriedades físicas e mecânicas da madeira.

Os valores obtidos para as densidades médias comparam-se relativamente bem com aqueles registrados em referências bibliográficas, uma vez que consideráveis diferenças ocorrem tanto dentro como entre árvores de uma mesma espécie de Eucaliptos (HILLIS & BROWN, 1978). Significantes variações também são observadas entre indivíduos de um mesmo grupo de idade e plantação (SCOTT, 1950; TAYLOR, 1972 e 1973a; e MALAN, 1982, citados por STÖHR & MACKAY, 1983).

Para a densidade verde, VUUREN et al. (1978) reporta uma média de $0,86\text{g/cm}^3$ em árvores de 12 a 15 anos de idade e para a seca STÖHR & MACKAY (1983) observam uma variação aproximada de $0,40$ a $0,72\text{g/cm}^3$ aos 24 anos de idade.

Na condição saturada em água, freqüentemente referida como “verde”, não foi

encontrado nenhum registro bibliográfico. Nesta condição os valores são maiores do que na “verde”, devido as massas dos corpos-de-prova utilizados aumentarem com a absorção de água e seus volumes permanecerem os mesmos. Na realidade, a densidade “verde” constitui-se em um valor aparente, conforme aceito pelas normas COPANT-461 (1972), sendo necessário correlacioná-lo com o teor de umidade de sua determinação.

A densidade básica é a mais utilizada na prática, embora não represente a madeira em nenhuma condição de teor de umidade. Em função do método utilizado para sua determinação e cálculo ser independente de contrações e colapsos, seu valor é destacado em investigações científicas (MALAN, 1984) e comparações da madeira da mesma ou de diferentes espécies, conforme também considerado nesta tese. Os demais valores apresentados foram determinados como forma complementar de caracterização do material em estudo.

Os seus valores para *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden apresentam uma variação de $0,33\text{g/cm}^3$ (FERREIRA et al., 1979) a $0,66\text{g/cm}^3$ (BRASIL & FERREIRA, 1972), incluindo as investigações de influências diversas (origem de sementes, localização geográfica, matrizes, clones, razão de crescimento, altura e diâmetro da árvore, e a variação própria entre e dentro de uma mesma árvore) realizadas por diferentes autores: FERREIRA (1972), HANS et al. (1972), TAYLOR (1973b), ESALQ-USP (1983), MALAN (1984), ALBINO & TOMAZELLO (1979), JESUS & VITAL (1986) e BHAT et al. (1990). Dentre estes, apenas FERREIRA (1972) estuda a sua variação aos 11 anos de idade, em função da altura e da distância radial, encontrando valores entre $0,43$ a $0,48\text{g/cm}^3$ com média de $0,59\text{g/cm}^3$, superiores aos determinados (Tabela 10).

A influência da altura da árvore na densidade básica é bastante contraditória. FERREIRA (1972) considera que ocorre um aumento da base para a copa, enquanto TAYLOR (1973a) e MALAN (1982), citados por STÖHR & MACKAY (1983), reportam exatamente o contrário. Nenhuma destas tendências é observada ao longo do comprimento dos sarrafos utilizados na determinação das deformações de crescimento longitudinais, conforme pode ser constatado pelos valores obtidos no centro e em seus extremos (1,50m; 2,61m e 3,62m de altura) - Tabela A1.1 (Anexo 1).

O reconhecido aumento no sentido medula-casca (FERREIRA, 1972; TAYLOR, 1973b; VUUREN et al., 1978; STÖHR & MACKAY, 1983 e MALAN, 1984) é confirmado pelo menor valor obtido para o lenho juvenil em relação ao adulto (Tabela 10).

A despeito das diferenças registradas a análise de variância (Tabela A1.5 - Anexo 1), referente às densidades básicas médias determinadas para cada uma das cinco árvores utilizadas (Tabela A1.4 - Anexo 1), não apresenta significância ao nível de 1% de probabilidade. Desta forma, estes valores são considerados iguais e a média aritmética de $0,39\text{g/cm}^3$, calculada entre eles, (Tabela 10) é aceita como representativa da madeira utilizada.

Embora a densidade básica seja de maior importância nas análises técnico-científicas, a determinação das deformações de crescimento longitudinais foram realizadas utilizando os sarrafos na condição verde. Também neste caso, a análise de variância das médias obtidas para cada árvore (Tabelas A1.6 e A1.7) não é significativa ao nível de 1% de probabilidade e a média de $0,87\text{g/cm}^3$ (Tabela 10) é aceita como representativa da madeira.

Deve ser ainda destacado que a determinação dos valores das densidades baseou-se em dois sarrafos para cada árvore (três amostras por sarrafo), tendo como critérios para suas seleções a condição de serem os últimos utilizados na medição das deformações de crescimento longitudinais e representarem um, o lenho adulto, e o outro, o juvenil (Item 3.2.4).

No caso de um dos sarrafos ter sido selecionado muito próximo à casca e o outro muito próximo à medula (casos ocorrentes nas árvores de números 3 e 5), a variabilidade determinada é de maior magnitude em função do gradiente existente.

Especificamente no caso da densidade verde, este fato, associado ao maior teor de umidade do lenho adulto em relação ao juvenil, contribuiu para a ocorrência das diferenças observadas e conseqüentemente para a variabilidade determinada.

Maiores precisões de resultados são naturalmente alcançadas com o aumento da amostragem.

As densidades determinadas em duas amostras (uma do lenho adulto e outra do juvenil), obtidas em um disco próximo aos utilizados na determinação das tensões de crescimento transversais (Tabela 11), são superiores às apresentadas na Tabela 10. Seus valores para a seca e básica comparam-se melhor com as determinadas por STÖHR &

MACKAY (1983) e FERREIRA (1972), respectivamente. A verde, entretanto, é bem mais elevada do que a referida por VUUREN et al. (1978).

TABELA 11. DENSIDADES VERDE, SECA E BÁSICA PARA O LENHO ADULTO E JUVENIL DE *Eucalyptus grandis* HILL. EX MAIDEN UTILIZADO NA DETERMINAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO TRANSVERSAIS.

Lenho	Densidade (g/cm ³)		
	Verde	Seca	Básica
Adulto	1,03	0,64	0,51
Juvenil	0,95	0,57	0,42
Adulto/Juvenil	0,99	0,61	0,47

Valores obtidos nos ensaios de uma amostra do lenho adulto e outra do juvenil.

4.1.4 Propriedades mecânicas

Os resultados obtidos para as propriedades mecânicas da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden, de acordo com os itens 3.2.1 e 3.3.1, encontram-se apresentados na Tabela 12, incluindo as médias, os desvios padrão e os coeficientes de variação. Estes últimos, comprovam uma variabilidade menor ou igual para a espécie em estudo, em relação às médias publicadas pelo U.S. FOREST PRODUCTS LABORATORY (1974), exceto para a dureza. A mesma observação pode ser comprovada com relação aos coeficientes de variação determinados como valores médios representativos de espécies de madeiras da região amazônica (LISBÔA, s.d.), conforme comparação efetuada na Tabela A1.2 do Anexo 1.

Análise similar à realizada para a densidade básica da madeira, quanto ao número de árvores amostradas necessárias à obtenção de determinada confiança nos resultados dos seus ensaios (Tabela A1.3 - Anexo 1), é apresentada para as propriedades mecânicas na Tabela A1.8 do mesmo Anexo. Entretanto, no menor nível de confiança analisado (95%), as duas amostras ensaiadas para cada uma das cinco árvores não são suficientes para alcançar um intervalo de confiança da média de $\pm 15\%$ para todas as propriedades incluídas, de acordo com as duas últimas linhas da referida Tabela.

TABELA 12. VALORES MÉDIOS DE PROPRIEDADES MECÂNICAS EM CONDIÇÃO VERDE, CORRESPONDENTES DESVIOS PADRÃO E COEFICIENTES DE VARIAÇÃO DETERMINADOS PARA A MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* HILL. EX MAIDEN.

Lenho	Propriedades Mecânicas																	
	Flexão Estática				Compressão				Tração		Dureza				Cisalhamento		Fendilhamento	
	Módulo de Ruptura (kg/cm ²)		Módulo de Elasticidade (100kg/cm ²)		Paralela às Fibras		Perpendicular às Fibras		Perpendicular às Fibras		Paralela às Fibras (kg)		Perpendicular às Fibras (kg)		Máxima Resistência (kg/cm ²)		Máxima Resistência (kg/cm)	
				Máxima Resistência (kg/cm ²)		Esforço no Limite Proporcional (kg/cm ²)		Máxima Resistência (kg/cm ²)										
Adulto	548		76		255		40		51		278		248		79		46	
	84	15	6	8	47	18	9	23	6	12	88	32	83	33	12	15	10	22
Juvenil	599		78		282		45		52		313		304		84		49	
	54	9	7	8	39	14	8	18	3	6	76	24	57	19	7	8	8	17
Adulto/Juvenil	497		74		228		34		49		243		191		73		42	
	80	16	5	7	40	18	7	21	9	18	93	38	66	34	14	19	11	26

Valores baseados em ensaios de uma amostra para cada uma de cinco árvores (1) e duas (uma do lenho adulto e outra do juvenil) para cada uma de cinco árvores (2).

Para cada conjunto de três valores o número central refere-se ao valor médio da propriedade, o da esquerda ao desvio padrão na mesma unidade de medida da propriedade e o da direita indica o coeficiente de variação em porcentagem.

Conforme comentado anteriormente, NOACK (1970) considera que esta confiabilidade é apenas suficiente para atender a propósitos práticos de investigações preliminares das propriedades da madeira.

Ao nível de 98% de confiança, apenas a amostragem correspondente à resistência máxima à tração perpendicular às fibras atinge o intervalo de variação da média de $\pm 15\%$ mas, o módulo de elasticidade na flexão estática, propriedade utilizada na determinação das tensões de crescimento longitudinais, satisfaz as exigências estatísticas de variabilidade para inclusão da média verdadeira da população dentro de um intervalo igual a $\pm 10\%$ do valor médio determinado.

A espécie de *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden não tem as suas propriedades mecânicas tão bem estudadas quanto as físicas. Mesmo no Brasil, onde os reflorestamentos com esta espécie têm significativa importância econômica, diversas pesquisas objetivando a determinação destas propriedades, como aquelas realizadas no INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SÃO PAULO (s.d.) em 48 espécies de *Eucalyptus* spp., não a inclui.

HILLIS & BROWN (1978) publicam os valores mínimos e máximos de algumas destas propriedades, os quais são transcritos na Tabela A1.9 do Anexo 1.

Em comparação com os resultados determinados (Tabela 12), os valores de HILLIS & BROWN são cerca de 1,1 a 2,3 vezes maiores nos casos da máxima resistência ao cisalhamento e da dureza perpendicular às fibras, respectivamente.

Para o módulo de elasticidade na flexão estática, esta razão varia de 1,7 a 1,8 vezes.

É difícil explicar a causa desta diferença, uma vez que os autores mencionados não fornecem dados suficientes para interpretação de seus resultados, tais como: local de origem e idade das árvores, normas utilizadas, estudo das propriedades, etc.

Tomando-se a densidade básica de $0,41 \text{ g/cm}^3$, obtida para *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden, como indicativa da resistência da madeira, os valores de suas propriedades mecânicas comparam-se com os das espécies amazônicas Faveira-tamboril (*Enterolobium maximum* Ducke) e Morototó (*Didymopanax morototoni* (Aubl.) Decne & Planch.) de densidades similares ($0,41$ e $0,42 \text{ g/cm}^3$, respectivamente), conforme publicados pelo

INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL (1981 e 1988, respectivamente).

A resistência do lenho adulto de *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden sendo maior do que a do seu lenho juvenil, reflete a relação direta existente entre os valores de suas respectivas densidades.

4.2 Deformações de crescimento longitudinais

4.2.1 Abate da árvore

As dificuldades para determinação da magnitude das deformações de crescimento, iniciam-se com a ocorrência das rachas devido ao corte transversal de abate, o qual constitui-se em uma forma de liberação de tensões (Figuras 12 e 31 WILHELMY & KUBLER, 1973a) e, conseqüentemente, na obtenção de valores menores do que os existentes dentro do tronco da árvore em pé (POST et al., 1980 - Item 2.2.1.2.4).

Dentre as várias formas sugeridas na bibliografia consultada (GIORDANO & GHISI, 1965; GIORDANO et al. 1969; GIORDANO & CURRÓ, 1972; VYK, 1978; WILHELMY & KUBLER, 1973a e b; KUBLER & CHEN, 1975; TANTICHAIBORIBOON & COOK, 1977a e b; PERKITNY et al., 1951 e MAYER-WEGELIN, 1955, estes dois últimos citados por CHAFE, 1979b; AGUIAR, 1986; MATTECK & WALTHER 1991; etc.) para a derruba da árvore, com a finalidade de evitar a concentração de tensões ou para homogeneizá-las em relação à medula, diminuindo a ocorrência de rachas, podem ser citadas: serragem próxima ao solo, derruba em altas e baixas temperaturas, cintamento circunferencial com braçadeiras, diferentes direções e ângulos de corte, perfuração de orifícios e anelamentos circunferenciais; de acordo com alguns exemplos apresentados nas Figuras 59 e 60.

Embora o atual experimento não tenha sido planejado para verificação destas variáveis de corte, as árvores utilizadas foram abatidas segundo as três últimas formas acima

mencionadas (Item 3.1), com a intenção de minimizar a ocorrência de rachas, sempre que nenhuma diferença significativa tenha sido verificada quanto à ocorrência de rachas, conforme ilustrado nas Figuras 36 (chanfro e corte transversal direto), 37 (anelamento circunferencial) e 38 (perfuração ou traspassamento direto com o sabre da motosserra).

Neste último caso pode ser claramente observada a atuação da força de compressão longitudinal existente no centro do tronco. Através da perfuração realizada em um dia anterior ao do abate da árvore, as tensões, sendo liberadas, provocaram a expansão da parte central perfurada. Estando a madeira, na sua vizinhança, impedida de acompanhar o deslocamento resultante, de tal forma a ocorrer uma redistribuição de tensões em todo o topo (Figura 12), o centro perfurado desprende-se do restante da madeira, conforme é ilustrado na Figura 38.

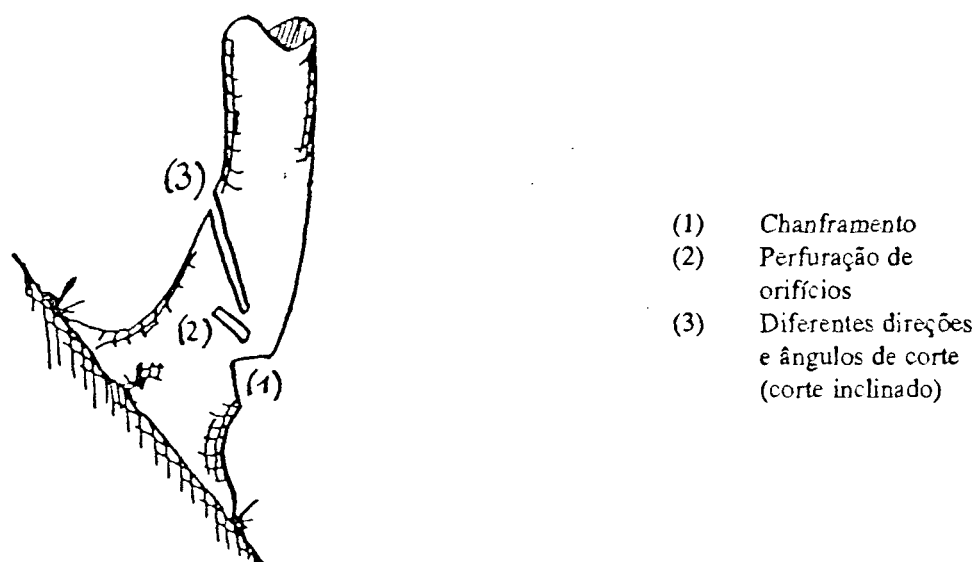


FIGURA 59. TÉCNICAS DE ABATE DE ÁRVORES (MATTHECK & WALTHER, 1991).

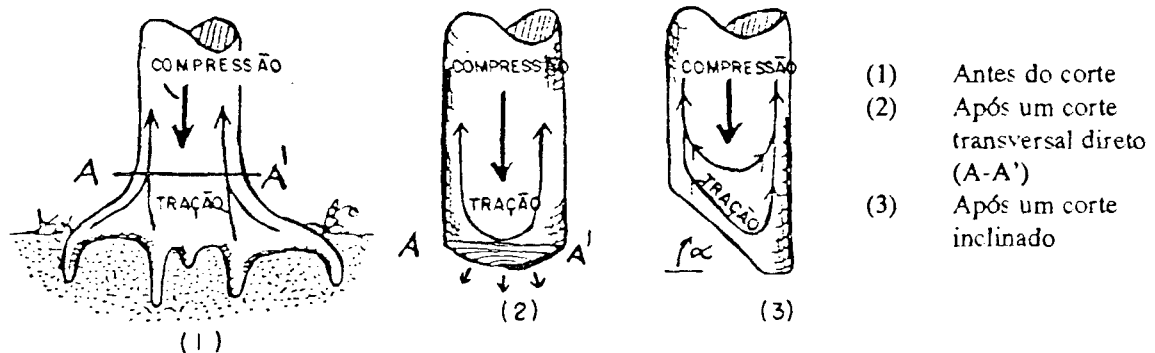


FIGURA 60. REDISTRIBUIÇÕES DE TENSÕES NO ABATE DE ÁRVORES (MATTHECK & WALTHER, 1991).

4.2.2 Desdobro

Os processos utilizados para o desdobro de uma tora podem ser agrupados segundo aspectos geométricos e anatômicos, conforme discutido por BRITO (1985), em três possibilidades: o desdobro em relação aos anéis de crescimento produz peças com faces tangenciais ou radiais, quando os cortes são efetuados tangencialmente aos anéis e paralelos uns aos outros ou perpendicularmente (sentido radial) aos mesmos; o desdobro em relação ao eixo longitudinal incluindo tanto aqueles realizados através de cortes "paralelos à casca" como os paralelos ao eixo longitudinal da tora, este último sendo obtido através da eliminação da diferença entre os diâmetros dos seus dois topos (conicidade); e, finalmente, o desdobro segundo a seqüência de cortes, que pode ser efetuado através de "cortes sucessivos" contínuos paralelos entre si e sempre no mesmo sentido, através de "cortes simultâneos" realizados por equipamentos que possuam duas ou mais serras e através de "cortes alternados". Neste último caso, são efetuados cortes sucessivos em uma das faces da tora para, a seguir, voltar a mesma

e serrar em outro plano, abrindo novas faces que poderão ser paralelas ou perpendiculares às primeiras.

A escolha de um ou de outro processo de desdobro, ou de uma combinação entre eles, é função de inúmeras variáveis que incluem: características próprias da tora ou de espécie (dureza, tensões de crescimento, forma e dimensões, etc.); adequabilidade do equipamento (máquinas e serras); rendimento em função do tempo de desdobro ou de volume de madeira produzido por tora; simplicidade operacional; qualidade da mão-de-obra disponível, forma, dimensão e destinação da madeira serrada; etc.

No caso dos Eucaliptos, as primeiras preocupações concentram-se na existência de elevadas tensões de crescimento, com influência direta em todas as variáveis mencionadas e ainda com eventual risco de acidentes para pessoas e equipamentos.

Em função das dificuldades encontradas com a espécie, muitos autores têm dedicado estudos específicos de seu desdobro, podendo ser citados: BERENGUT et al. (1973), PRIEST et al. (1981 e 1984), HASLETT & KININMONTH (1984), VIANNA NETO (1986), MONTAGNA et al. (1990), etc.

BERENGUT et al. (1973) observam que as conclusões obtidas quanto à conversão de toras de Eucaliptos em madeira serrada são bastante diversas e até contraditórias, o que pode acontecer devido às grandes variações existentes entre as espécies deste gênero como dentro de uma mesma espécie. Em seus experimentos, referentes à seqüência de cortes acima referida, BERENGUT et al. concluíram pelos melhores resultados conseguidos (maiores rendimentos em volume de madeira serrada) através do esquadrejamento da tora em três faces, sendo o bloco restante desdobrado em cortes paralelos diretos. Este método, que combina desdobros em “faces tangenciais”, “paralelos ao eixo longitudinal” e “cortes alternados”, é, freqüentemente, o mais praticado pelas serrarias nacionais, devido à simplicidade e adequabilidade da maioria dos equipamentos disponíveis.

Considerando a distribuição de tensões de crescimento existente dentro do tronco (Figuras 27 e 30), um simples corte efetuado de um lado da tora provoca um desordenamento do equilíbrio destas tensões, tendo como conseqüência a ocorrência de empenamentos, tanto

na tora quanto na peça serrada. Por esta razão é que o desdobro em “cortes simultâneos” (“gang sawing”) tem alcançado maior sucesso no processamento de Eucaliptos em países como a África do Sul, Austrália e Suécia, conforme já mencionado por BOYD (1950b).

A tendência de desenvolvimento de rachas centrais em tábuas e pranchas obtidas, também é explicada pela ocorrência da redistribuição de tensões, considerando-se ainda a maior proporção de lenho juvenil (tensões longitudinais compressivas) em relação ao lenho adulto (tensões longitudinais de tração), existente nestas peças de madeira, quando comparadas com as mesmas dentro do tronco (Item 2.2.1.2.1 e 2.3.1.1).

Segundo BOYD, a ocorrência destas rachas tem diminuído com a utilização do método sueco denominado “tandem gang-sawing”, o qual consiste no desdobro simultâneo de peças de madeira na porção do tronco oriunda da concomitante serragem (mas um pouco antecipado) da costaneira e das duas peças de madeira que lhe são contíguas, em dois lados do tronco. Este método exige, portanto, um equipamento composto de um determinado número de serras múltiplas, que desdobrem a porção restante do tronco, precedidas de outras seis serras múltiplas, de modo a possibilitar o corte da costaneira e das duas peças contíguas, simultaneamente, e em dois lados do tronco.

Ao considerar-se a atual situação das serrarias brasileiras, tal equipamento é completamente inviável de ser utilizado.

ATHERTON (1978), salienta que se o corte de sucessivas tábuas ou pranchas é realizado em apenas um lado da tora, a sua curvatura tende a aumentar, tornando impossível a obtenção de peças retilíneas. Entretanto, se os cortes sucessivos são realizados em lados opostos, o gradiente de deformação retornará ao seu estado normal, ou a curvatura presente não constituirá grande problema.

O desdobro através de “cortes alternados”, sendo o que mais se aproxima do “simultâneo” (“gang sawing”), é, portanto, o que oferece melhores resultados, tanto em termos de rendimento (BERENGUT et al., 1973) como em precisão de corte e uniformidade de espessuras das peças produzidas, uma vez que diminui a tendência de empenamentos da tora e das próprias peças. Em decorrência, é de se esperar que ocorra também uma diminuição

de rachas nestas últimas.

No presente experimento, onde se obtiveram tábuas de reduzidas espessuras (20,0mm), contendo pregos em seus extremos e ainda sendo obrigatória a realização do corte em um plano longitudinal pré-determinado (iniciando-se o corte em uma linha traçada num dos topos da tora e tendo que alcançar seu outro extremo numa linha também pré-traçada), as dificuldades foram enormes, principalmente considerando-se que o equipamento disponível possuía oito anos de uso (Item 3.2.2).

Diversas combinações de desdobro e de traçado do diagrama de corte foram testadas. O método de “cortes alternados”, pelo qual a tora é volteada várias vezes, não pôde ser utilizado na íntegra, pela impossibilidade de recolocação da tora na exata posição de corte programada.

Conforme tratado no item 3.2.2, tanto o carro porta-toras quanto a própria tora foram constantemente nivelados com a serra-de-fita, através da utilização de calços (cunhas). Como a cada novo corte longitudinal podem ocorrer novos empenamentos, outra sistemática de colocação de calços teria que ser analisada, o que demandaria um tempo considerável, ao passo que com a tora presa pelos “gatos” no carro, a tendência de empenamentos é reduzida.

Assim, os desdobros seguiram o esquema apresentado na Figura 45, onde os cortes alternados foram realizados primeiramente em um dos lados da tora, removendo-se a costaneira e duas a três pranchas. Após apoiar esta face plana na mesa do carro porta-toras, removeram-se a costaneira e nove a treze pranchas. Finalmente, com as duas faces planas obtidas apoiadas na mesa e na varanda do carro, completou-se o esquema de desdobro, conforme o diagrama de corte traçado nos topos de cada uma das cinco toras utilizadas.

Para o traçado do diagrama de corte, foi inicialmente planejado retirar todos os sarrafos possíveis de serem obtidos em cada tora. Entretanto, como o desdobro e as medições necessárias teriam que ser realizadas ininterruptamente, a fim de evitar o aumento ou a formação de novas rachas (processo que demanda mais de 24 horas), optou-se por adotar a obtenção de sarrafos em apenas três pranchas centrais em cada uma de duas direções diametrais perpendiculares entre si (Figura 43).

Após iniciado o desdobro, se a operação for interrompida por períodos prolongados, a ação das tensões, não mais distribuídas homoganeamente, provoca o aumento ou a formação de novas rachas, conforme verificado em uma tora utilizada como teste prévio do processo de medição das deformações longitudinais de crescimento.

Considerando-se ainda que a forma imposta para traçamento do diagrama de corte (tomando como base as distâncias horizontais e verticais entre a serra-de-fita e linhas traçadas em ambos os topos da tora - Item 3.2.2) impediu que a medula se situasse na prancha diametral central, a retirada de sarrafos em três pranchas centrais, nas duas direções perpendiculares entre si (total de seis pranchas), garantiu a obtenção das medidas necessárias à representação da distribuição das tensões de crescimento na porção central do tronco da árvore.

4.2.3 Adequabilidade da amostra

O comprimento da amostra (sarrafo) deve ser relacionado com o diâmetro da tora, devido ao corte transversal liberar componentes das tensões de crescimento que alteram suas magnitudes e distribuição, através do fenômeno denominado “efeito de topo”, discutido no item 2.2.1.2 (Figura 12). Este efeito estende-se ao longo do comprimento da tora até uma distância de 1,3 a 2,3 vezes o seu diâmetro, conforme experimentos realizados por WILHELMY & KUBLER (1973a e b) e confirmados por SWACZYNA (1978), ou até 0,90m de acordo com BOYD (1950a).

POST (1979a) e CHARDIN & SALES (1983a e b, e 1984) citam a distância de 3 vezes o diâmetro, sem entretanto haverem realizado experimentos específicos a respeito.

SALES (1986) considera que o corte transversal de derruba e as conseqüentes rachas que ocorrem no topo representam apenas um alívio de tensões da ordem de 10 a 15% da sua magnitude real, a uma distância de um diâmetro da referida seção.

Ao considerar este relacionamento, conclui-se que devem ser utilizadas toras com maior razão de comprimento/diâmetro, ou seja, sarrafos de maiores comprimentos, a fim de

diminuir a influência do referido efeito na magnitude das deformações determinadas. Entretanto, comprimentos relativamente menores são freqüentemente preferidos, com o propósito de facilitar o corte e o manuseio, bem como para preservar a esbeltez necessária à estabilidade do sarrafo, cujas seções transversais devem ser bem reduzidas.

JACOBS (1945) recomenda sarrafos com larguras de, aproximadamente, 12,7mm como adequados para toras de diâmetros maiores que 15,2cm, devendo os mesmos serem cortados ao longo dos anéis de crescimento. Esta operação é muito difícil, até mesmo impossível, no caso da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden por possuir anéis poucos distintos (Item 4.1.2).

Nesse mesmo experimento, JACOBS utiliza dimensões para a espessura da prancha diametral de 1/12 e para a largura dos sarrafos de 1/24 do diâmetro do tronco.

Em 1938, o mesmo autor observa que seções transversais menores do que 25,4 x 12,7mm são praticamente impossíveis de serem cortadas, mesmo utilizando-se uma serra manual.

A Tabela 13 apresenta uma comparação entre as dimensões dos sarrafos adotadas no presente experimento (última linha da Tabela) e as de diferentes autores que utilizaram métodos similares de determinação das deformações de crescimento longitudinais, através da medição de diferença de comprimentos entre sarrafos dentro e fora da tora.

TABELA 13. COMPARAÇÃO DAS DIMENSÕES DE AMOSTRAS UTILIZADAS NA DETERMINAÇÃO DE DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS, ATRAVÉS DE MÉTODOS BASEADOS EM DIFERENÇAS ENTRE COMPRIMENTOS DE SARRAFOS.

Diâmetro da Tora (d) ⁽¹⁾ (mm)	Dimensão da Amostra (mm)		Razão		Autor
	Comprimento (l) ⁽²⁾	Seção Transversal (S) ^(1,3)	l/d	s/d	
d > 76	3.048	-	l/d < 40 (?)	-	JACOBS (1938) ⁽⁴⁾
d > 400	2.500	16,7/33,3	6,3	0,04/0,08	JACOBS (1945) ⁽⁵⁾
127 - 178	1.016	12,7/12,7	5,7/8,0	0,07/0,10	ATHERTON(1978)
410	3.632	12,7/13,0	8,9	0,03/0,03	POST(1979a)
600 - 750	2.500	60,0/60,0	3,3/4,2	0,08/0,10	CHARDIN & SALES (1983a e b, 1984)
127 - 254	2.400	12,7/38,0	9,4/18,9	0,05/0,30	MAEGLIN et al. (1985)
339 - 360	2.320	16,3/24,5	6,4/6,8	0,05/0,07	Presente experimento

(1) Valores médios aproximados; (2) valores padrão; (3) refere-se a valores mínimos e máximos de cada dimensão da seção transversal, sem distinção de largura e espessura do sarrafo; (4) recomendação; (5) valores de apenas uma das medições (JACOBS utiliza dimensões variadas).

A razão média entre o comprimento padrão dos sarrafos e os diâmetros das toras utilizadas ($l/d = 6,6$) é superior à média calculada para os experimentos dos outros autores ($l/d = 6,1$), excetuando-se apenas MAEGLIN et al. (1985) que destoam dos demais.

Considerando-se a influência do efeito de topo ao longo do comprimento da tora (e conseqüentemente dos sarrafos), a razão l/d é satisfatória, por abranger medições de deformações de crescimento em porções do comprimento isentas deste efeito, mesmo considerando a distância de $3d$ citada por POST (1979) e CHARDIN & SALES (1983a e b, e 1984), sem a devida justificativa técnica.

Quanto às razões entre as dimensões das seções transversais e os diâmetros, os valores adotados também comparam-se, favoravelmente, apresentando uma média menor ($s/d = 0,06$) que a dos demais autores ($s/d = 0,09$).

As dimensões propostas por CHARDIN & SALES (1983a e b, e 1984), embora apresentem a vantagem de fornecer material para o estudo das relações entre tensões de crescimento e a qualidade da madeira, conforme comentado pelos próprios autores, não possibilitam o conhecimento de suas distribuições radiais.

Nas toras utilizadas neste experimento, com diâmetros variando de 339 a 360mm, as seções transversais de sarrafos propostos por CHARDIN & SALES (60 x 60mm) permitiriam realizar medições de deformações de crescimento longitudinais, no máximo em dois pontos ao longo do raio.

A variação de cada uma das dimensões das seções transversais, de 16,3 a 24,5mm (última linha da Tabela 13), são oriundas de irregularidades na serragem, uma vez que a seção transversal escolhida inicialmente foi de 20,0 x 20,0mm (Item 3.2.2).

Em função das dificuldades encontradas na execução do desdobro (Item 4.2.2) não se conseguiu obter melhores resultados. A movimentação do carro porta-toras devido a folgas existentes, bem como da tora e das peças de madeira, em consequência da gradativa liberação de tensões em cada novo corte durante o processo de desdobro; as irregularidades do tronco; o volteamento da tora para execução do desdobro em “cortes alternados”; e mesmo a variação da espessura da linha de corte (provocada pela utilização de serras recém-afiadas e desgastes normais de seus dentes) são fatores que inviabilizam a obtenção de sarrafos com seções transversais homogêneas, tanto quanto no que diz respeito às variações ao longo do comprimento de cada um deles, como entre eles. As dimensões finais obtidas são, portanto, consideradas satisfatórias.

POST (1979a), planejando obter sarrafos com seções transversais variáveis de 12,7 x 12,7mm no topo menor e 12,7 x 13,0mm no topo maior (Item 2.2.1.2.4 e Tabela 13), obteve como resultado seções médias de 12,7 x 25,4mm, no desdobro de uma tora de *Fraxinus americana*. Esta espécie não é referida na bibliografia consultada como possuindo as mesmas dificuldades de processamento que as de Eucalipto.

Em experimentos programados para estudar a magnitude e distribuição das tensões de crescimento, normalmente são selecionadas amostras livres de defeitos, exceto quando o objetivo é o estudo da influência específica de um determinado fator como a inclinação da árvore, por exemplo.

No caso de *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden é impossível estudar a distribuição de suas tensões eliminando-se os defeitos característicos da própria madeira, como os nós,

por exemplo. Desta forma, todos os sarrafos obtidos foram considerados nas medições, sendo seus defeitos (nós, rachas, esmoados e bolsa de goma ou “kino”) anotados conforme apresentado no Anexo 2.

A eliminação de um determinado sarrafo, somente será considerada se a deformação de crescimento obtida (através de medições efetuadas no mesmo) apresentar destacada variação dentro do conjunto total de dados, conforme será discutido quando de suas análises (Item 4.2.4).

A inclinação da grã de peças de madeira pode ser diferente daquela registrada para a árvore de uma espécie, uma vez que depende da forma de desdobro.

A análise de um número variável de sarrafos, através de observações visuais ou da utilização de um “riscador”, fazendo-o correr sobre suas faces radiais, indicou que a grande maioria pôde ser considerada como possuindo grã reta ou, aproximadamente reta (direita), da mesma forma que observado para a espécie (Item 4.1.2).

Como esta análise não foi realizada em todos os sarrafos, o que demandaria um tempo considerável, e também devido ao sistema de eliminação de valores de deformações considerados bastante diferentes do conjunto de dados obtidos, os seus resultados não são apresentados como os dos outros defeitos que possam interferir nas conclusões (Anexo 2).

A influência da grã é bastante significativa, uma vez que a resistência da madeira, que no caso das deformações de crescimento longitudinais inclui principalmente a tração e a compressão paralela às fibras, é dependente deste fator. A tração paralela às fibras da madeira é extremamente alta. Baseado em dados fornecidos por KOLLMANN & CÔTÉ (1968) e nos valores das propriedades mecânicas determinadas (Tabela 12), a tração paralela às fibras da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden pode ser 25 vezes maior do que na direção perpendicular.

Pregos ou parafusos de pequenas dimensões foram normalmente utilizados como pontos de contacto para medições pelos autores que executaram experimentos semelhantes. Parafusos com 6,35 a 12,70mm e pinos com 15,88mm de comprimento foram considerados adequados por JACOBS (1945) e POST (1979a), respectivamente. ATHERTON (1978), após

experimentar diferentes tipos de pontos de contacto fixados com cola na madeira, decidiu pela utilização de pinos com 1,59mm de diâmetro e 6,35mm de comprimento.

Os pregos galvanizados escolhidos, tendo suas cabeças esmeriladas, comprimentos variáveis de 14,52 a 15,68mm e diâmetros de 1,20 a 1,28mm (Item 3.2.2), atenderam perfeitamente aos propósitos do presente experimento, permanecendo firmes em suas posições, após o desdobro da tora e propiciando uma superfície limpa, homogênea e constante, para o contacto dos fusos dos relógios comparadores, durante as repetidas medições realizadas.

4.2.4 Medição das deformações

As leituras originais obtidas no paquímetro e relógios comparadores, utilizados no aparelho de medição fabricado (Item 3.3.2.1 - Figura 47), são apresentadas no Anexo 2.

A utilização destas leituras na determinação dos comprimentos dos sarrafos dentro da tora (S_t), da pranha (S_p) e isoladamente (S_s), é realizada conforme fórmulas indicadas nos itens 3.3.2.2 e 4.2.5.

4.2.4.1 Variação de temperatura e umidade relativa do ar

A execução do experimento em cada tora iniciou-se com a marcação do diagrama de corte, aproximadamente às 7:00h da manhã, seguindo-se o seu desdobro e simultânea medição dos comprimentos dos sarrafos, com término variando entre 23:00h do mesmo dia até 2:00h da madrugada seguinte.

As temperaturas durante a fase de medições, que normalmente iniciou-se no período da tarde com a obtenção dos comprimentos dos sarrafos dentro da tora (S_t) e terminou com a dos sarrafos isolados (S_s), apresentaram uma variação máxima de 20,0 a 33,5°C. Devido

à seqüência de medições, os seus maiores valores referem-se à obtenção dos comprimentos S_t . Para esta última, ocorreram variações de 22,0 a 33,5°C e, com referência aos valores de S_s , de 20 a 26,0°C.

Para a determinação dos comprimentos dos sarrafos dentro da prancha, registraram-se variações de 21,0 a 26,0°C.

Considerando-se as temperaturas médias ponderadas, em função da quantidade de medidas efetuadas em cada uma delas, obtiveram-se os valores de 28,9 23,1 e 23,5°C, referentes a S_t , S_p e S_s , respectivamente.

Para todo o conjunto de medições realizadas, incluindo S_t , S_p e S_s , a média ponderada passa a ser 25,8°C.

As temperaturas de obtenção dos parâmetros relativos ao aparelho de medição variaram de 26,3 a 26,5°C, com média de 26,4°C, semelhante à média de 25,8°C da condução do experimento.

De acordo com CARLI (1964), os instrumentos de medição (paquímetro, relógios comparadores, etc.) são aferidos a 20°C e, portanto, correções de medições, levando-se em consideração a contração ou dilatação térmica de materiais, teriam que se basear neste valor. No caso do experimento, a variação média a ser considerada é de apenas $25,8 - 20,0 = 5,8^\circ\text{C}$ e de $26,4 - 20,0^\circ\text{C} = 6,4^\circ\text{C}$ para a madeira e o aparelho, respectivamente.

Entretanto, as correções de valores, em função da variação constante da temperatura, são difíceis de serem realizadas, quando diferentes materiais são envolvidos e, principalmente quando um deles é a madeira, ainda muito pouco estudada neste aspecto.

O conhecimento dos parâmetros necessários aos cálculos (calor específico, calor específico médio, coeficiente de temperatura e de dilatação linear), seriam obtidos, na melhor das hipóteses, em termos aproximados. No caso do *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden, não é do conhecimento do autor a existência destes parâmetros.

O coeficiente de dilatação linear da madeira, por exemplo, depende da própria espécie, da sua direção estrutural (radial, tangencial ou longitudinal), do teor de umidade, dimensões e nível de temperatura. Madeiras muito úmidas necessitam de até duas horas para

expandirem-se ou contraírem-se, em função de alterações térmicas, conforme estudado por KUBLER et al. (1973c), em quatro diferentes espécies de madeira.

Desta forma, deixa-se de considerar quaisquer correções nos valores medidos (na expectativa de que a influência da variação da temperatura verificada seja pequena) baseando-se nos fatores acima mencionados, entre os quais: variações médias relativamente baixas, medições dos comprimentos dos sarrafos a temperaturas médias praticamente iguais à de aferição do aparelho de medição e demora de tempo para que o material responda às alterações térmicas.

Reforçando esta expectativa de pequena influência térmica, acrescenta-se o fato de que as deformações de crescimento são determinadas em relação à diferença entre dois comprimentos, ocorrendo, portanto, a eliminação parcial de erros cometidos. Assim, por exemplo, se S_t é medido a $28,9^{\circ}\text{C}$ e S_s a $23,5^{\circ}\text{C}$, a diferença de temperatura que induziria ao erro é de $5,4^{\circ}\text{C}$.

Considerando-se a mesma análise acima apresentada para cada tora, as variações de temperatura ainda seriam menores: $20,0$ a $27,3^{\circ}\text{C}$; $23,0$ a $33,0^{\circ}\text{C}$; $25,0$ a $33,0^{\circ}\text{C}$; $25,0$ a $33,5^{\circ}\text{C}$; e $22,5$ a $25,5^{\circ}\text{C}$ para as toras de números 1 a 5, respectivamente, em comparação com a variação máxima citada de $20,0$ a $33,5^{\circ}\text{C}$.

A umidade relativa apresentou uma variação de $45,5$ a $87,0\%$, durante o período total de execução do experimento.

4.2.4.2 Intervalo de tempo de medição

Durante a fase de experimentação do método de determinação das deformações de crescimento longitudinais, observou-se o intervalo de tempo necessário para liberação das tensões e de suas conseqüentes deformações após o corte de quatro sarrafos obtidos de toras extras, consideradas como pertencentes à espécie de *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden.

Para os dois sarrafos situados na zona de compressão, a máxima deformação

ocorreu dentro dos cinco primeiros minutos após o corte, seguindo-se um decréscimo insignificante e variável dentro de 1% do valor máximo obtido em 12 leituras, realizadas até os 100 minutos finais de observação.

No caso dos dois sarrafos situados na zona de tração, os resultados alcançados não são conclusivos. Em um deles foram anotados apenas três resultados de deformações (aos 2, 7 e 27 minutos), sendo 88% delas liberadas nos 2 primeiros minutos em relação ao valor obtido aos 27. O outro sarrafo, sendo mantido preso dentro da cantoneira e em observação no aparelho de medição, até os primeiros 16 minutos apresentou um pico de acréscimo nas deformações registradas, equivalente a $23\mu\varepsilon$, quando de sua recolocação no aparelho aos 39 minutos, mantendo constante o valor máximo alcançado até os 54 minutos finais considerados.

Em função deste último resultado basear-se em uma única observação, não se pode garantir que o mesmo seja decorrente de efeitos naturais e não devido a erros experimentais de colocação/recolocação do sarrafo no aparelho.

De acordo com a “Revisão de Literatura”, apresentada no item 2.2.1.2.4 (Página 45), períodos de tempo variados de 3 a 5 minutos para medição de efeitos elásticos imediatos (NICHOLSON, 1971), até 14 dias para recuperação das deformações visco-elásticas (BOYD & SCHUSTER, 1972) são citados. Entretanto, o tempo de 15 minutos, citado por MAEGLIN et al. (1985), bem como a limitação do experimento a um máximo de 8:00h de duração (CHARDIN & SALES, 1984) são mais coerentes para fins práticos de execução e para evitar a influência da secagem.

Os intervalos de tempo reais, dispendidos neste experimento, são apresentados na Tabela 14.

TABELA 14. INTERVALO DE TEMPO TRANSCORRIDO ENTRE O DESDOBRO E A DETERMINAÇÃO DO COMPRIMENTO DOS SARRAFOS.

Intervalo de tempo transcorrido (min)								
Desdobro da Tora/ Medição do Sarrafo na Prancha			Desdobro da Tora/ Medição do Sarrafo			Desdobro da Prancha/ Medição do Sarrafo		
Min.	Med.	Máx.	Min.	Med.	Máx.	Min.	Med.	Máx.
3	11	25	16	141	273	9	57	153

Considerando-se o tempo transcorrido entre o término do desdobro de cada sarrafo a partir da prancha e o momento da medição de sua deformação resultante (últimas três colunas da Tabela 14), verifica-se que dentro das possibilidades práticas possíveis, os resultados obtidos incorporam as recuperações elásticas e visco-elásticas.

O período total dispendido, variando aproximadamente de 9 a 12 horas, é também aceitável, principalmente ao considerar-se que as medições foram realizadas, em sua maioria, durante a noite.

4.2.4.3. Reprodutibilidade de medições

O desempenho do aparelho fabricado (Item 3.3.2.1 - Figura 47) para medição do comprimento de peças de madeira, ou das deformações de crescimento longitudinais (Item 3.3.2.1 - Figura 47), pode ser considerado satisfatório, principalmente quanto ao seu manuseio.

A utilização dos paquímetros (Item 3.3.2.2 - Figuras 52 e 54) na determinação das alturas de medições dos relógios comparadores, efetuadas ao longo da haste vertical do aparelho, não apresentou nenhuma dificuldade.

A mesma facilidade foi encontrada com a performance dos relógios comparadores (Item 3.3.2.2 - Figuras 51 e 53), tomando-se os devidos cuidados quanto às suas fixações, com a finalidade de evitar diferenças nas fórmulas de medições, conforme apresentado na referida seção, ou mesmo eventuais erros.

A simplicidade do aparelho e mesmo sua rusticidade são justificáveis em função de ter sido fabricado somente para utilização temporária durante a execução da fase experimental planejada nesta tese.

Como única dificuldade em seu manuseio, pode ser citado apenas o seu peso. A colocação de rodízios facilitaria sobremaneira sua deslocação em curtas distâncias.

Por outro lado, a utilização de materiais homogêneos, quanto a parâmetros térmicos, bem como a realização de medições em ambientes dotados de controles de tais parâmetros e da umidade relativa do ar evitaria os problemas de efeitos da temperatura, discutidos no item 4.2.4.

A comparação do aparelho fabricado com outros sistemas de medições utilizados é impossível de ser apresentada. JACOBS (1945) menciona apenas a necessidade de uma fita de aço com precisão de 0,254mm, nas medições de comprimento padrão de 2.540,0mm, ou de micrômetros com precisão de $2,54 \times 10^{-3}$ mm, para peças de 254,0mm. ATHERTON (1978) cita somente que as medições foram realizadas com micrômetros convenientemente utilizados em um aparelho de medição (“measuring frame”). A página da sua tese, na qual é referida a apresentação do aparelho, não é anexada aos dois volumes obtidos através de diferentes fontes. POST et al. (1979a) denominam seu aparelho de “grande micrômetro” (“large micrometer”), mas sua apresentação transcrita na Figura 17 não fornece suficientes detalhes para visualização do seu manuseio. Finalmente, MAEGLIN et al. (1985) mencionam apenas haver utilizado um “gabarito de medição” (“measuring jig”) calibrado com relógios comparadores.

A precisão de instrumentos capazes de detectar diferenças de comprimentos que ocorram em peças de madeira, devido à liberação de tensões, são naturalmente dependentes da magnitude das conseqüentes deformações liberadas e, portanto, da espécie de madeira e dos comprimentos destas peças.

Para o comprimento de 2.320,0mm adotado, a precisão dos instrumentos utilizados (relógios comparadores e paquímetros) é suficiente.

O paquímetro com menor precisão (0,02mm) tem pouca influência nos resultados

encontrados, devido a sua utilização ser restrita à determinação do valor de J (Item 3.3.2.2 - Figuras 52 e 54), cuja ordem de grandeza é muito menor do que as dos outros valores envolvidos na fórmula de determinação do comprimento de um sarrafo ($S_t = (A + G - D)^2 + J^2$).

A precisão dos relógios comparadores é suficiente para a determinação de deformações de crescimento longitudinais de até $4\mu\epsilon$, pois considerando-se o comprimento padrão, apenas dois dos valores determinados têm magnitudes inferiores (Item 4.2.5):

$$\epsilon_{ls} = \frac{S_t - S_s}{S_s} \cdot 10^6 \text{ (Item 3.3.2.2)}$$

$$\epsilon_{ls} = \frac{0,01}{2.320} \cdot 10^6$$

$$\epsilon_{ls} = 4,3\mu\epsilon$$

Por outro lado, o rigor estabelecido para a determinação das medições necessárias é, no mínimo, igual ao de outros experimentos similares conduzidos por autores diversos: JACOBS (1945) recomenda a precisão de 0,254mm (1/100") para comprimentos de 2.540,0mm, conforme já mencionado; ATHERTON (1978), $2,54 \times 10^{-3}$ mm (1/10.000") para 1.016,0mm; e POST (1979a) e MAEGLIN et al. (1985), $2,54 \times 10^{-2}$ (1/1.000") para comprimentos de 3.632 e 2.400,0mm, respectivamente.

Quanto à precisão de 1mm da trena de aço, utilizada na medição do comprimento padrão inicial de 2.320,0mm, nenhuma influência significativa pôde derivar nos resultados, uma vez que a determinação das deformações de crescimento longitudinais, sendo relativa à diferença entre dois comprimentos ($S_t - S_s$) dependentes da mesma magnitude desta precisão, praticamente elimina seus efeitos.

POST (1979a) utiliza, como forma de aferição do aparelho de medição por ele fabricado, as repetidas medições realizadas em uma mesma tábua de madeira de angiosperma.

Através destas medições, foi detectado um erro máximo de 0,127mm (0,005"), ao qual corresponde uma possível variação de $35\mu\epsilon$ nos resultados das deformações de crescimento longitudinais, considerando-se o comprimento padrão de 3.632,0mm (143"), ou

seja, $\left[\frac{0,127}{3.632,0} \right] \times 10^6 = 35$.

MAEGLIN et al. (1985), da mesma forma, citam a utilização de uma régua de aço de forma análoga.

No atual experimento foi considerada inviável a adoção de qualquer método similar, em virtude de não ter sido encontrada nenhuma forma adequada de apoio para uma régua de aço, de modo a possibilitar a aferição em diferentes alturas das hastes do aparelho de medição.

Desta forma, optou-se pela utilização da “coluna de aferição”, mencionada no item 3.3.2.1 (Figura 49), como único procedimento destinado a verificar a reprodutibilidade das medições efetuadas.

Através deste procedimento, minuciosamente exposto no Anexo 3, verificou-se que ou as hastes do aparelho de medição não se encontravam perfeitamente alinhadas ou deviam existir irregularidades nas canaletas por onde eram deslocadas as peças de fixação dos relógios comparadores (Item 3.3.2.1 - Figuras 47 e 48), as quais possibilitaram efetuar medições a diferentes alturas.

Em conseqüência, foram propostas equações de ajustamento de todos os valores medidos a diferentes alturas das hastes verticais do aparelho em relação à altura de 15,0mm de medição do comprimento do sarrafo isoladamente (S_s).

O ajustamento de valores proposto através da utilização de duas equações correspondentes às hastes nºs 1 e 2 do aparelho de medição, com seus respectivos relógios comparadores, equivale a considerar que todas as medidas obtidas a diferentes alturas foram realizadas a 15,0mm.

O correto emprego das equações, cujos resultados devem ser adicionados às medidas E_i e F_i (Anexo 2), referentes à determinação do comprimento dos sarrafos dentro da tora, é exemplificado no Anexo 3.

Os valores ajustados, bem como todos os cálculos necessários à determinação das deformações de crescimento longitudinais, segundo a metodologia constante no item 3.3.2.2, são apresentados no Anexo 4.

Excetuam-se, do ajustamento realizado, os valores obtidos nos pontos de altura

igual a 10,0mm e 15,00mm. Este último, por ter servido de base para as correções dos demais, e o primeiro (altura igual a 10,0mm), somente tendo sido utilizado nas medições de comprimentos de sarrafos dentro da prancha (S_p), já apresenta uma variabilidade própria e com relação ao segundo (altura de 15,0mm) dentro de limites bastante aceitáveis.

No Anexo 3, também é demonstrado que, pela utilização dos valores ajustados, é possível ocorrer um erro máximo de $21\mu\epsilon$, com referência às deformações de crescimento calculadas. Este erro é bem menor do que os $35\mu\epsilon$ aceitos por POST (1979a), conforme mencionado anteriormente, e significativamente inferior à maioria das deformações determinadas, motivos pelos quais é aceitável.

4.2.5 Magnitude e distribuição

Os cálculos apresentados no Anexo 4, segundo a metodologia constante no item 3.3.2.2, determinam os comprimentos dos sarrafos dentro da tora (S_t), da prancha (S_p) e isolados (S_s).

De posse destes valores, obtém-se as deformações de crescimento correspondentes à liberação das tensões em cada uma das fases do desdobro da tora.

4.2.5.1 Deformações de crescimento ocorrentes no desdobro de toras em sarrafos

As deformações de crescimento resultantes da liberação de tensões devido ao desdobro de toras em sarrafos correspondem a seus valores totais residuais possíveis de serem determinados, conforme constante nos itens 2.2.1, 2.3.1 e 2.4.

As magnitudes destas deformações foram obtidas segundo a fórmula apresentada no item 3.3.2.2 $\left[\epsilon_{ts} = \frac{S_t - S_s}{S_s} \times 10^6 \right]$, em unidades de microdeformações ($1\mu\epsilon = 10^{-6}$ mm/mm), e suas distribuições são apresentadas na Figura 61 ("a" e "e") sobre a seção

transversal de cada tora.

Através desta representação gráfica, os valores das deformações são plotados nos locais onde os sarrafos foram cortados, ou seja, nos pontos de suas medições. A partir do centro (medula), a cada novo valor fornecido corresponde a distância de 24,0mm.

Os raios da tora não se encontram em uma escala perfeita. Os seus valores foram obtidos, para cada uma delas, como a média aritmética entre as distâncias radiais da medula à casca, no topo menor (Tabela 8), e as distâncias reais do sarrafo central à casca, para o maior. Neste topo o sarrafo central não correspondeu à medula (Item 3.2.2).

As magnitudes das deformações de crescimento determinadas podem ser melhor apreciadas em conjunto através de suas distribuições diamétricas (Figura 62, de "a" a "e") apresentadas de forma similar aos modelos teóricos de BOYD (1950b) e de KUBLER (1959b), ilustrados nas Figuras 26 e 27, respectivamente.

Nesta última representação gráfica, o ponto de valor igual a zero, na abscissa, indica a posição do sarrafo central, na maioria das vezes sem a sua correspondente deformação de crescimento. Isto se deve à ocorrência de rachas ou de defeitos que, provocando a quebra do sarrafo, inviabilizaram sua medição.

Na prática, este valor é impossível de ser determinado para a espécie de *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden, pelo menos ao considerar-se as toras examinadas na serraria e na derruba de árvores, durante todo o período de permanência do autor na WEG Motores, S.A.

A escala de 24,0 em 24,0mm, correspondente aos pontos locados para medição das deformações, é também utilizada na abscissa. A inexistência de alguns valores deve-se aos motivos já mencionados.

Devido à incontrolável ocorrência de rachas na prancha diametral, adotou-se os atuais diagramas para medição das deformações de crescimento, na tentativa de representar a variação média nesta direção, ou seja: os raios indicados com o sufixo "B" correspondem à direção mais próxima da diametral, e aqueles com sufixos "A" e "C", indicam as direções imediatamente paralelas e distanciadas de 24,0mm da primeira.

A Tabela 15 sintetiza os principais dados referentes às toras estudadas, facilitando a apreciação dos resultados alcançados.

FIGURA 61. MAGNITUDE DAS DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO RESIDUAIS LONGITUDINAIS ($1\mu\epsilon = 10^{-6}\text{mm/mm}$) DECORRENTES DA LIBERAÇÃO DE TENSÕES NO DESDOBRO DE TORAS DE *Eucalyptus grandis* HILL. EX MAIDEN EM SARRAFOS. a. TORA N° 1. b. TORA N° 2. c. TORA N° 3. d. TORA N° 4. e. TORA N° 5.

	r1A	r1B	r1C											
	14 386	1 454	27 381											
	15 182	2 -	28 -											
	16 -39	3 -	29 -											
	17 -514	4 -	30 -											
r4A	69 214	68 -114	67 -311	66 -652	65 -	18 -1013	5 -	31 -	64 -423	63 -121	62 62	61 272	60 415	r2A
r4B	49 144	48 -215	47 -455	46 -851	45 -1294	19 -	6 -	32 -796	44 -564	43 -250	42 -21	41 198	40 356	r2B
r4C	59 160	58 -77	57 -456	56 -761	55 -1064	20 -	7 -	33 -871	54 -495	53 -292	52 -42	51 192	50 375	r2C
	21 -	8 -	34 -											
	22 -594	9 -	35 -											
	23 -466	10 -	36 -											
	24 -167	11 -	37 -											
	25 45	12 -	38 95											
	26 667	13 -	39 374											
	r3A	r3B	r3C											

a. Tora n° 1

	r1A	r1B	r1C											
	29 -	1 -	15 -											
	30 6	2 25	16 83											
	31 -46	3 -99	17 -127											
	32 -196	4 -430	18 -											
	33 -832	5 1263	19 -											
r4A	53 -363	54 14	55 -64	56 -487	57 -989	34 -1263	6 -	20 -1190	58 -985	59 -548	60 -286	61 -10		r2A
r4B	43 -	44 -	45 -	46 -	47 -	35 -	7 -	21 -	48 -	49 -	50 -	51 -	52 -	r2B
r4C	62 196	63 65	64 -413	65 -658	66 -	36 -	8 -2089	22 -	67 -1065	68 -	69 -227	70 -9		r2C
	37 -1473	9 -1807	23 -1570											
	38 -1141	10 -1394	24 -1212											
	39 -914	11 -849	25 -689											
	40 -565	12 -365	26 -313											
	41 -108	13 -3	27 -63											
	42 216	14 154	28 78											
	r3A	r3B	r3C											

b. Tora n° 2

	r1A	r1B	r1C											
	13 560	1 -	25 -											
	14 318	2 -	26 -											
	15 -	3 -	27 -											
	16 -	4 -	28 216											
r4A	56 849	55 525	54 494	53 287	52 24	17 -	5 -	29 508	51 77	50 -	49 -	48 -	47 -	r2A
r4B	46 943	45 685	44 528	43 148	42 48	18 353	6 -	30 602	41 -	40 -	39 -	38 598	37 908	r2B
r4C	66 943	65 793	64 597	63 381	62 98	19 -	7 -	31 -	61 110	60 251	59 391	58 584	57 836	r2C
	20 33	8 -	32 -											
	21 398	9 -	33 -											
	22 758	10 -	34 549											
	23 703	11 810	35 727											
	24 954	12 1025	36 875											
	r3A	r3B	r3C											

c. Tora n° 3

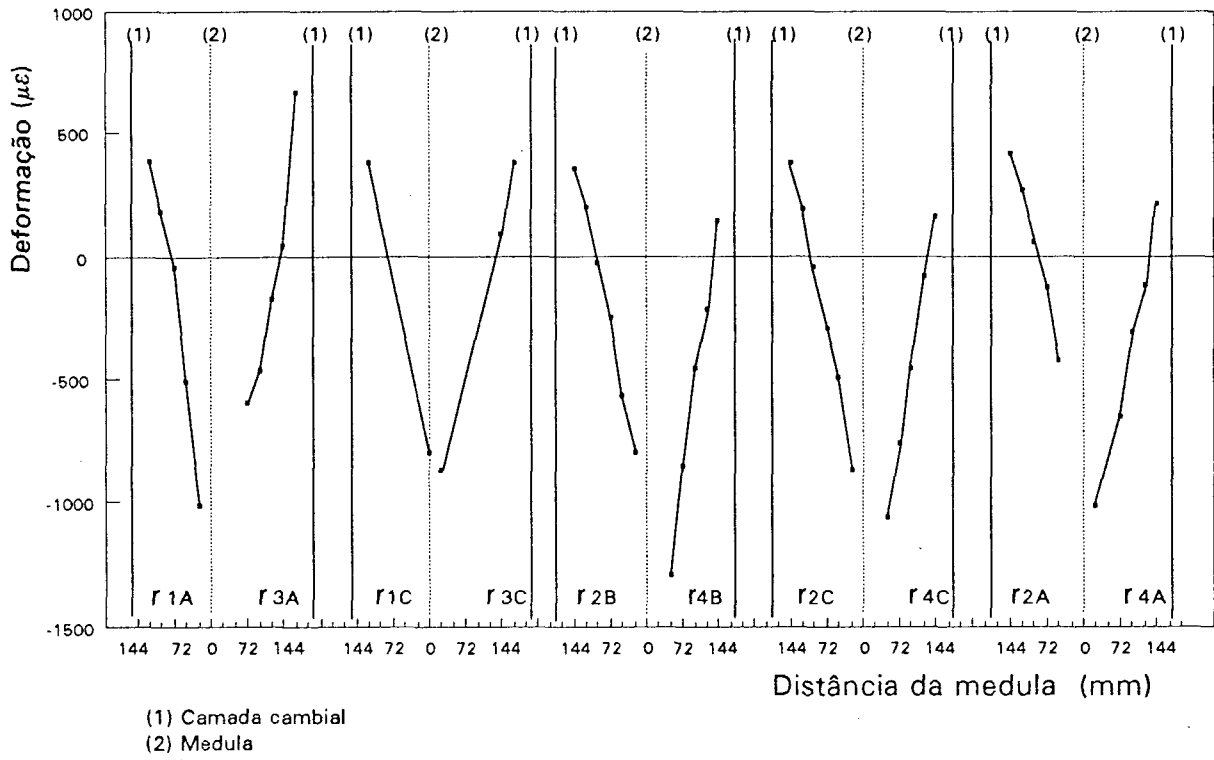
	r1A	r1B	r1C											
	13 125	1 57	25 11											
	14 -	2 497	26 257											
	15 -	3 457	27 136											
	16 781	4 569	28 720											
r4A	57 421	58 595	59 372	60 635	61 978	17 1142	5 -	29 1047	62 871	63 557	64 205	65 72	66 177	r2A
r4B	37 2	38 93	39 442	40 869	41 1267	18 -	6 -	30 -	42 -	43 -	44 665	45 17	46 394	r2B
r4C	47 42	48 88	49 845	50 -	51 -	19 1984	7 -	31 1436	62 1488	63 1067	64 282	65 -	66 -	r2C
	20 1834	8 -	32 1034											
	21 1437	9 1010	33 1032											
	22 469	10 595	34 -											
	23 570	11 642	35 -											
	24 62	12 34	36 -											
	r3A	r3B	r3C											

d. Tora n° 4

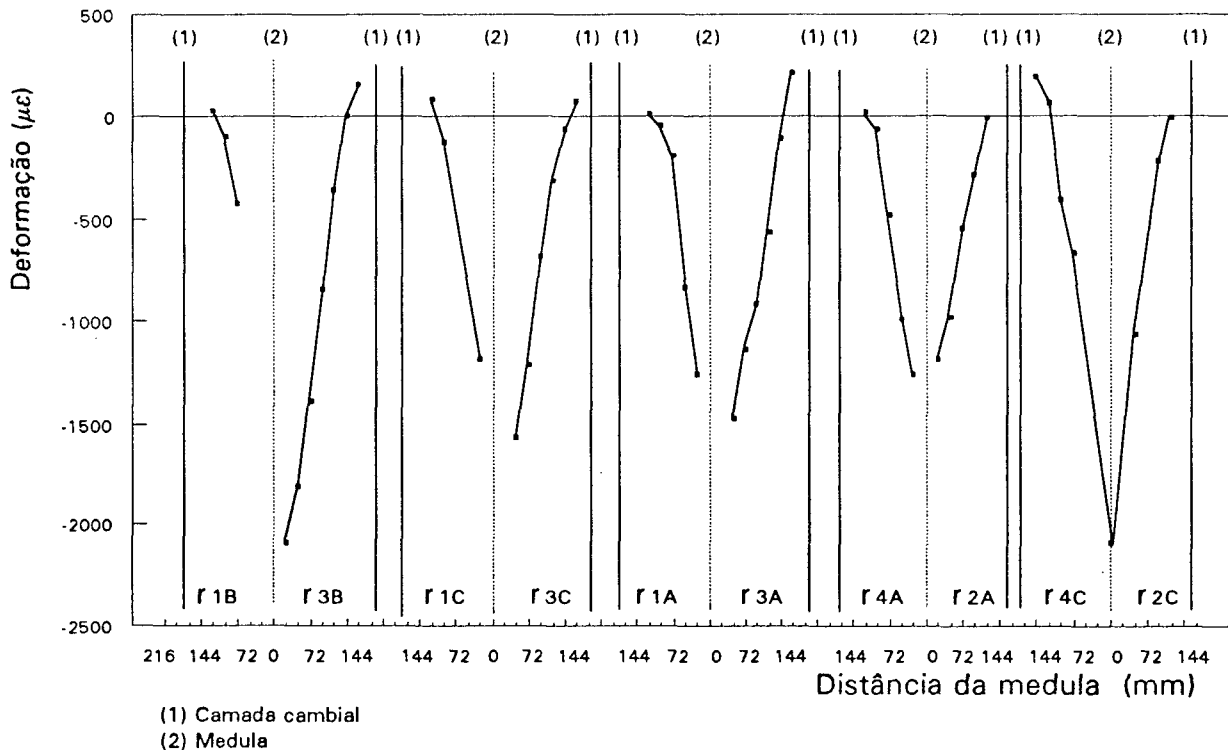
	r1A	r1B	r1C											
	29 452	1 333	15 -											
	30 50	2 -11	16 -198											
	31 289	3 -123	17 -7											
	32 -310	4 -320	18 -178											
	33 -629	5 -560	19 -347											
	34 -	6 -850	20 -443											
r4A	63 89	64 -214	65 -367	66 -652	67 -	68 -	35 -	7 -1120	21 -828	69 -	70 -	71 31	72 298	r2A
r4B	43 190	44 -260	45 -296	46 -720	47 -1060	48 -1362	36 -	8 -	22 -	49 -344	50 -68	51 72	52 240	r2B
r4C	53 -	54 -95	55 -224	56 -535	57 -920	58 -	37 -1729	9 -	23 -	59 -	60 -116	61 7	62 650	r2C
	38 -1154	10 -903	24 -											
	39 -642	11 -440	25 -227											
	40 -239	12 -153	26 7											
	41 -	13 111	27 134											
	42 187	14 277	28 287											
	r3A	r3B	r3C											

e. Tora n° 5

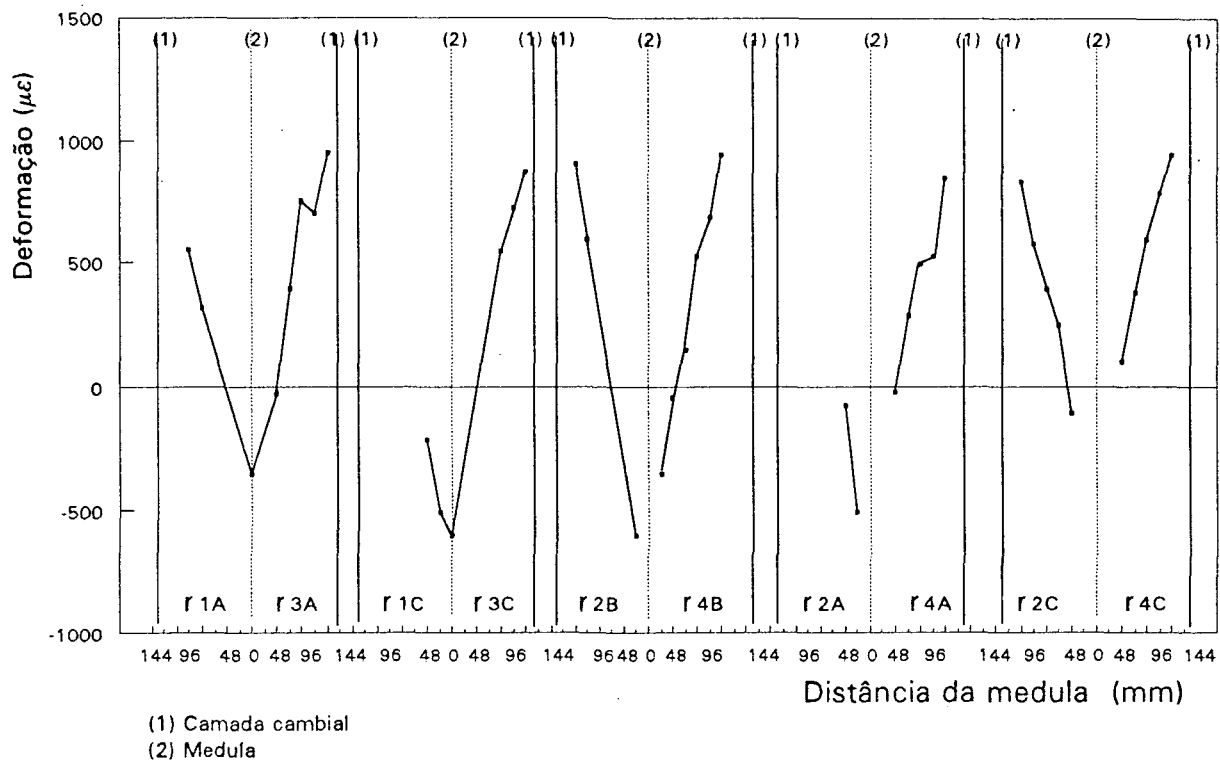
FIGURA 62. DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA DAS DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO RESIDUAIS LONGITUDINAIS ($1\mu\epsilon = 10^6\text{mm/mm}$) DECORRENTES DA LIBERAÇÃO DE TENSÕES NO DESDOBRO DE TORAS DE *Eucalyptus grandis* HILL. EX MAIDEN EM SARRAFOS. a. TORA N° 1. b. TORA N° 2. c. TORA N° 3. d. TORA N° 4. e. TORA N° 5.



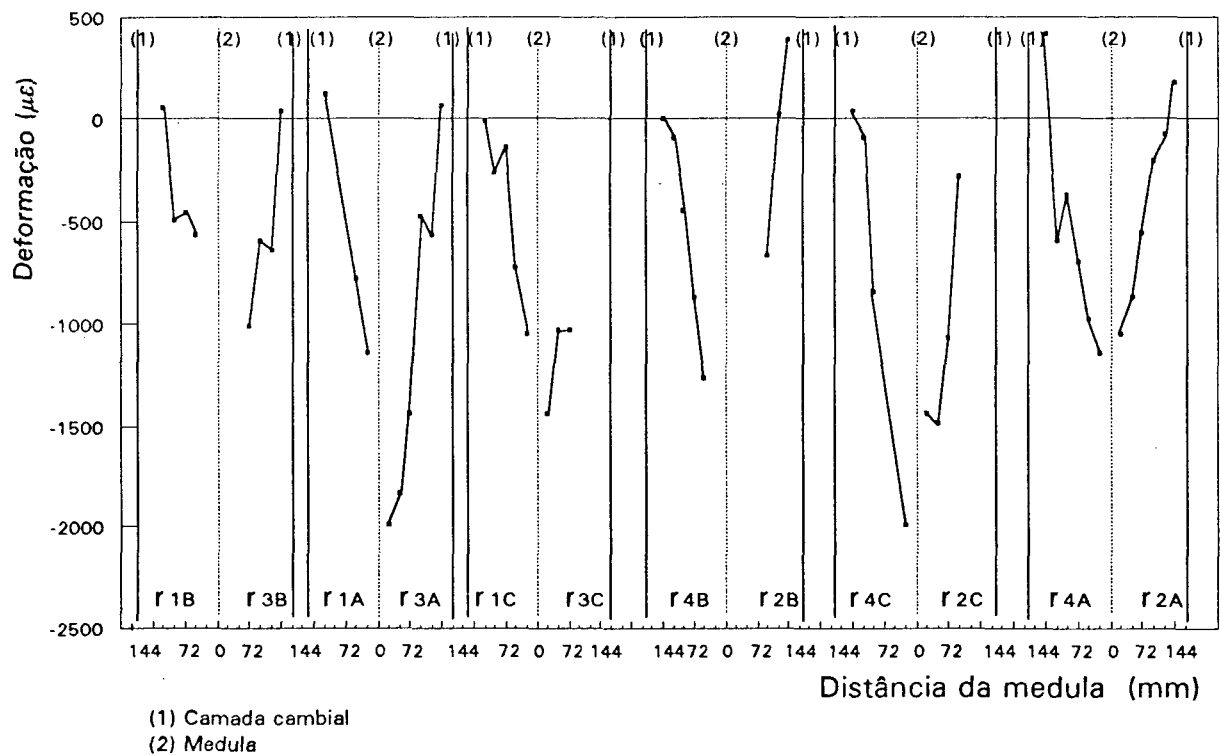
a. Tora n° 1



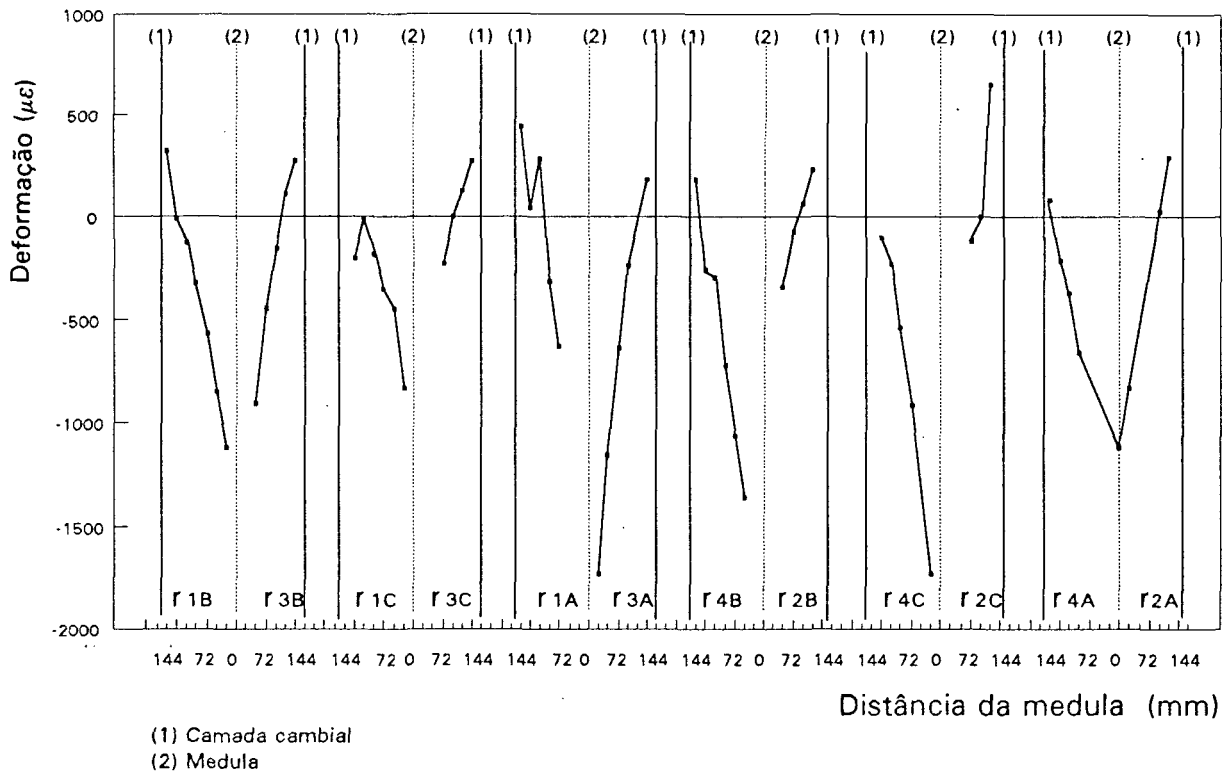
b. Tora n° 2



c. Tora n° 3



d. Tora n° 4



e. Tora nº 5

TABELA 15. DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS RESIDUAIS DETERMINADAS NO INTERIOR DO TRONCO DE CINCO ÁRVORES DE *Eucalyptus grandis* HILL. EX MAIDEN, COM 11 ANOS DE IDADE.

Tora N°	Diâmetro Médio ⁽¹⁾ (mm)	Densidade Básica ⁽²⁾ (g/cm ³)	Quantidade de Medições ⁽³⁾	Deformação Específica ($\mu\epsilon$)					
				Tração ⁽⁴⁾			Compressão ⁽⁵⁾		
				Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima
1	360/360	0,41	45	144	357	667	796	893	1.013
2	346/376	0,39	47	78	161	216	1.190	1.514	2.089
3	344/358	0,39	39	560	877	1.025	353	488	602
4	326/352	0,40	49	2	146	421	1.047	1.402	1.984
5	352/358	0,35	55	89	300	650	828	1.266	1.729
Todas as Toras	346/361	0,39	235	2	390	1.025	353	1.131	2.089

(1) Diâmetro considerando-se as direções radiais de determinação das deformações; (2) Tabelas A1.4. e 10; (3) Inclui todas as medições realizadas; (4) Inclui 43 medições realizadas a uma distância da casca variando de 7,0 a 53,0mm considerando-se os dois topos da tora; e (5) Inclui 16 medições realizadas no máximo a 34,0mm da medula.

Através da simples observação dos gráficos ilustrados na Figura 62, pode ser constatada a tendência geral de tração periférica e compressão crescente em direção à medula, comprovando as observações de diferentes autores, citados na “Revisão de Literatura”.

Entre as deformações periféricas determinadas, apenas dois valores são negativos (sarrafos n° 53 - tora 2 - Figura 61b e n° 25 - tora 4 - Figura 61d). Entretanto, estes valores situam-se a distâncias médias de 35,0 e 36,0mm, respectivamente, da casca e, portanto, não podem ser considerados como exceções ao reconhecido estado de tração periférica (Item 2.4.1).

Mesmo excluindo estes valores, as deformações periféricas determinadas (Tabela 15) apresentam uma variação individual maior (2 a 1025 $\mu\epsilon$), e uma média de 390 $\mu\epsilon$, cerca de 45% menor do que as registradas na Tabela 1, para diferentes espécies de *Eucalyptus*.

Da mesma forma que justificado para a exclusão dos valores negativos dos sarrafos n°s 53 e 25 acima citados, todas as deformações, não tendo sido determinadas exatamente na periferia da árvore (distanciadas de 7,0 a 53,0mm da casca em relação aos dois topos da tora), sofreram a influência do gradiente de tensão existente no sentido periferia (tração)/medula (compressão), que tende a diminuir suas magnitudes. Esta pode ser a justificativa para as pequenas magnitudes de tensões de tração observadas na Figura 62, especialmente em 62b e

d.

Em comparação com o único valor médio de $200\mu\epsilon$, apresentado para *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden (Tabela 1), o valor determinado no momento é maior.

Na opinião do autor, entretanto, esta constatação somente aumenta a incerteza acerca da magnitude de $200\mu\epsilon$, conforme discutido no item 2.4.1.

As deformações de crescimento compressivas máximas, determinadas nas camadas mais internas da madeira, variam individualmente de 353 a $2089\mu\epsilon$, com média de $1.131\mu\epsilon$ (Tabela 15).

Estes valores são mais bem comparáveis com os de outras espécies de *Eucalyptus*, apresentados nas Tabelas 4 e 5, embora, para uma melhor acuidade equiparativa, ter-se-ia que obter maiores informações quanto aos diâmetros das árvores.

Novamente, mesmo o menor valor individual determinado neste experimento é superior àquele publicado para *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden ($194\mu\epsilon$), de acordo com a Tabela 5, embora este último refira-se a árvores de 9 anos de idade (HARDIE, 1974).

Os valores médios determinados de -893, -1.514, -488, -1.402 e $-1.266\mu\epsilon$ para as árvores (toras) de números 1, 2, 3, 4, e 5, com diâmetros médios de 360,0; 361,0; 351,0; 339,0 e 355,0; respectivamente, são, também, mais bem comparáveis com os apresentados na Tabela 4 e 5, situando-se em um intervalo aproximadamente central, quanto às suas magnitudes.

A enorme variabilidade entre os valores determinados comprovam as dificuldades encontradas nos trabalhos similares (Item 2.4.1), no sentido de estabelecer uma correlação adequada entre os mesmos.

Da mesma forma que observado por outros autores como TRENARD & GUÉNEAU (1975), o desvio padrão, se calculado, seria maior do que a própria magnitude dos valores.

Os defeitos anotados nos sarrafos (Anexo 2) não influenciam nos valores individuais obtidos, o que pode ser comprovado pelos gradientes de deformações apresentados nas Figuras 62 e 63.

Cada um desses valores individuais, quando analisados em relação às deformações determinadas, não indica haver nenhum tipo de correlação, mesmo quando da ocorrência de

nós que ocupam toda a seção transversal do sarrafo. Conseqüentemente, os resultados finais são considerados como representativos da madeira da espécie, incluindo os defeitos normais encontrados.

Na Figura 63, a distribuição das deformações de crescimento são representadas em função de sua variação radial por tora, possibilitando a comparação com o modelo teórico apresentado por KUBLER (1959b) e discutido no item 2.3.1:

$$\varepsilon_l = \varepsilon_l^0 \left[1 + 2 \ln \frac{r}{r_a} \right]$$

onde,

ε_l = deformação de crescimento residual longitudinal (valor adimensional);

ε_l^0 = deformação específica inicial de tração desenvolvida na periferia da árvore (valor adimensional);

r = raio correspondente ao ponto para o qual a avaliação de deformação é desejada (mm); e

r_a = raio da árvore (mm).

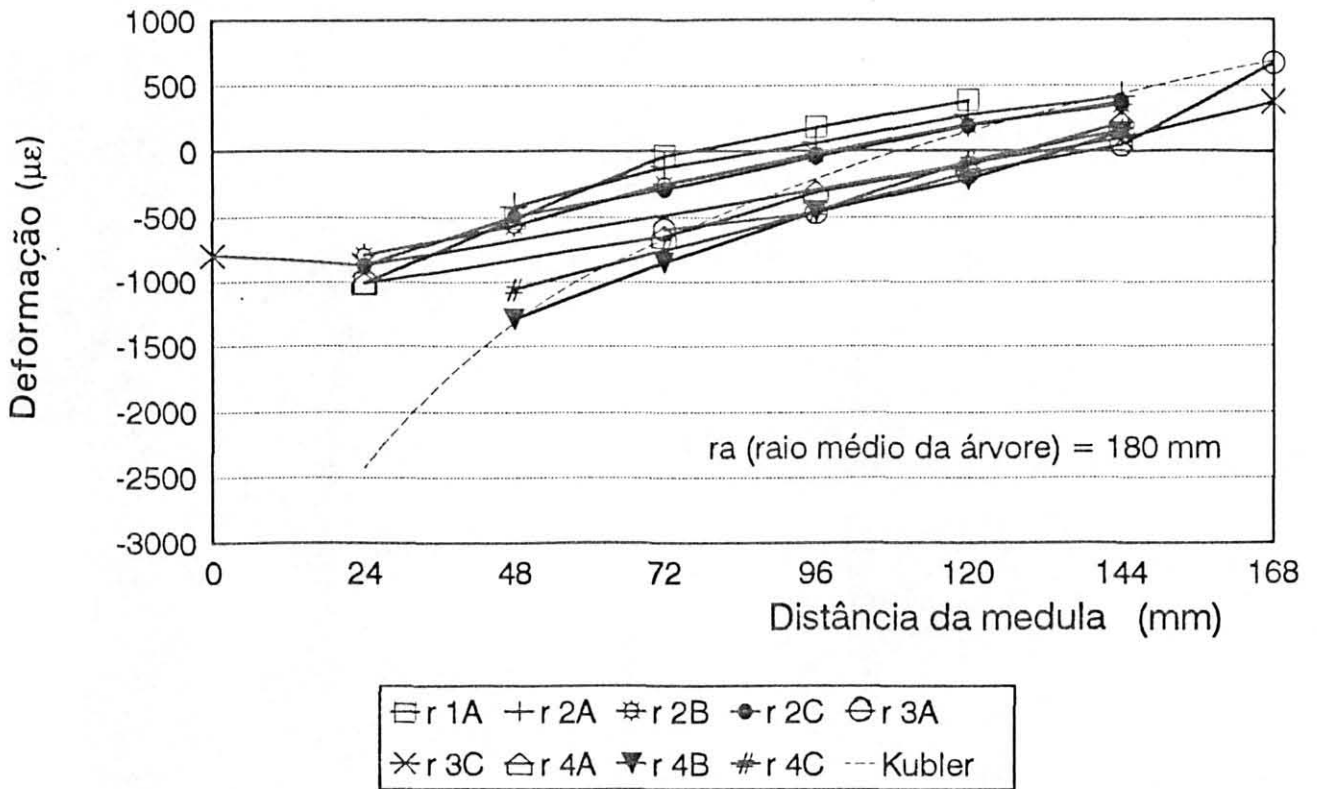
A escolha deste modelo teórico, para fins comparativos com os resultados obtidos, baseia-se no fato de sua ampla utilização. É necessário lembrar-se, entretanto, que o modelo é adequado, principalmente, a materiais de comportamento elástico-isotrópico, conforme discutido no referido item.

Na aplicação do modelo, utilizou-se o valor de $\varepsilon_l^0 = 0,0008$, sugerido por BOYD (1950b), uma vez que os correspondentes valores determinados nesta tese, da ordem de 0,00039, não representam o valor da tração periférica ocorrente nas toras em estudo, conforme discutido acima.

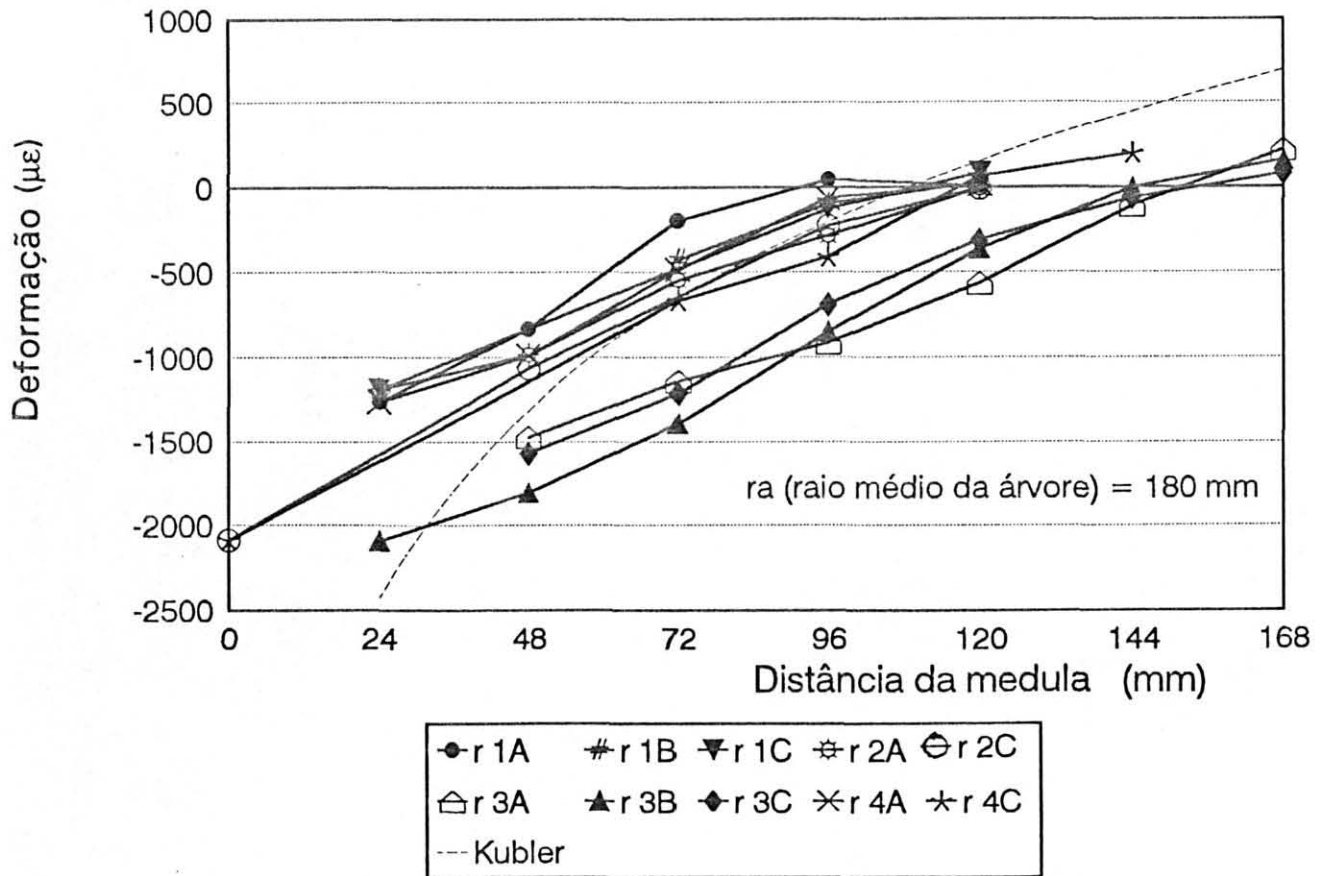
Para os valores de r_a , foram utilizados os raios médios para cada tora, considerando-se os seus dois topos e a direção radial de determinação das deformações de crescimento.

Excetuando a tora nº 3 (Figura 63c), os valores estimados pelo modelo teórico de KUBLER (1959b) são bem maiores quando próximos ao centro da árvore, relativamente maiores quando próximos à casca e apresentam melhor nível de comparação quando suas estimativas são analisadas nas zonas intermediárias.

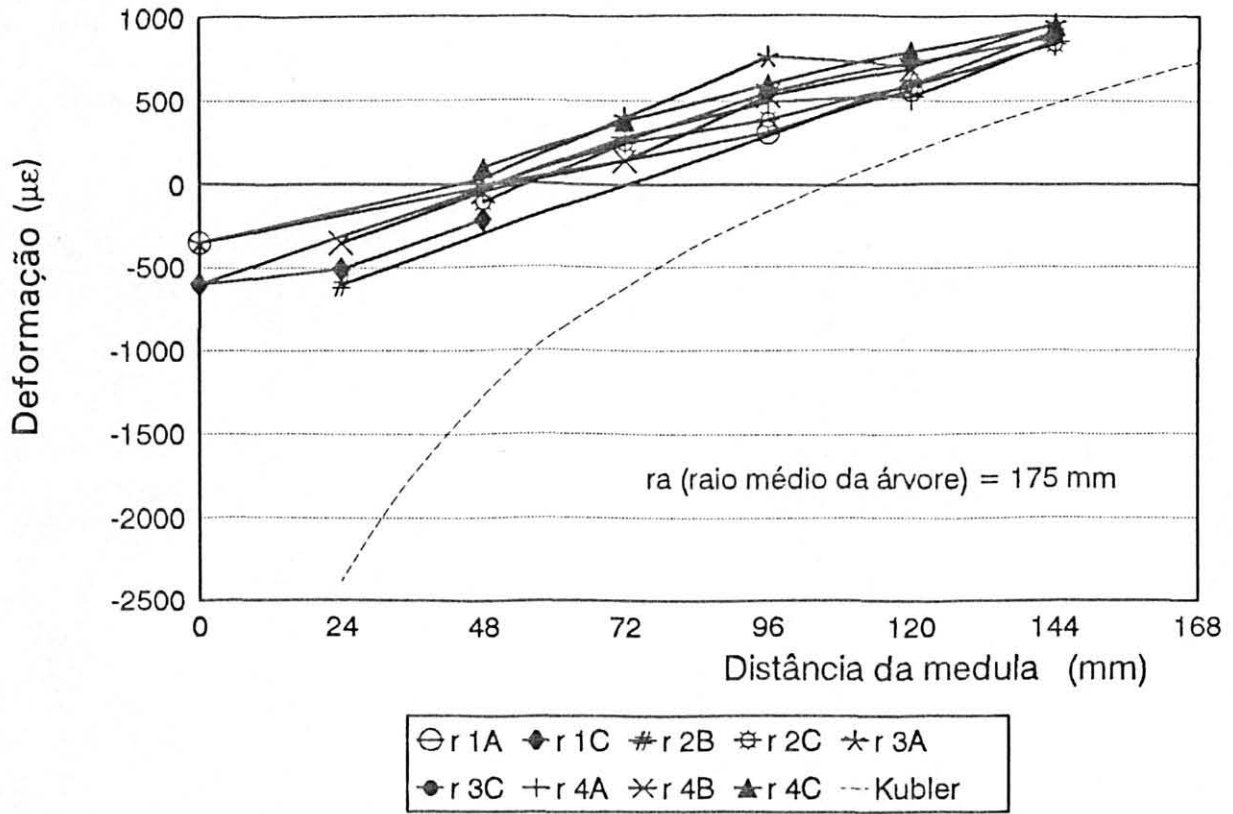
FIGURA 63. DISTRIBUIÇÃO RADIAL DAS DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO RESIDUAIS LONGITUDINAIS ($1\mu\epsilon = 10^{-6}\text{mm/mm}$), DECORRENTES DA LIBERAÇÃO DE TENSÕES, QUANDO DO DESDOBRO DE TORAS DE *Eucalyptus grandis* HILL. EX MAIDEN, EM SARRAFOS (LINHAS CONTÍNUAS); EM COMPARAÇÃO COM O MODELO TEÓRICO (LINHA TRACEJADA), PROPOSTO POR KUBLER (1959b). a. TORA N° 1. b. TORA N°2. c. TORA N° 3. d. TORA N° 4. e. TORA N° 5.



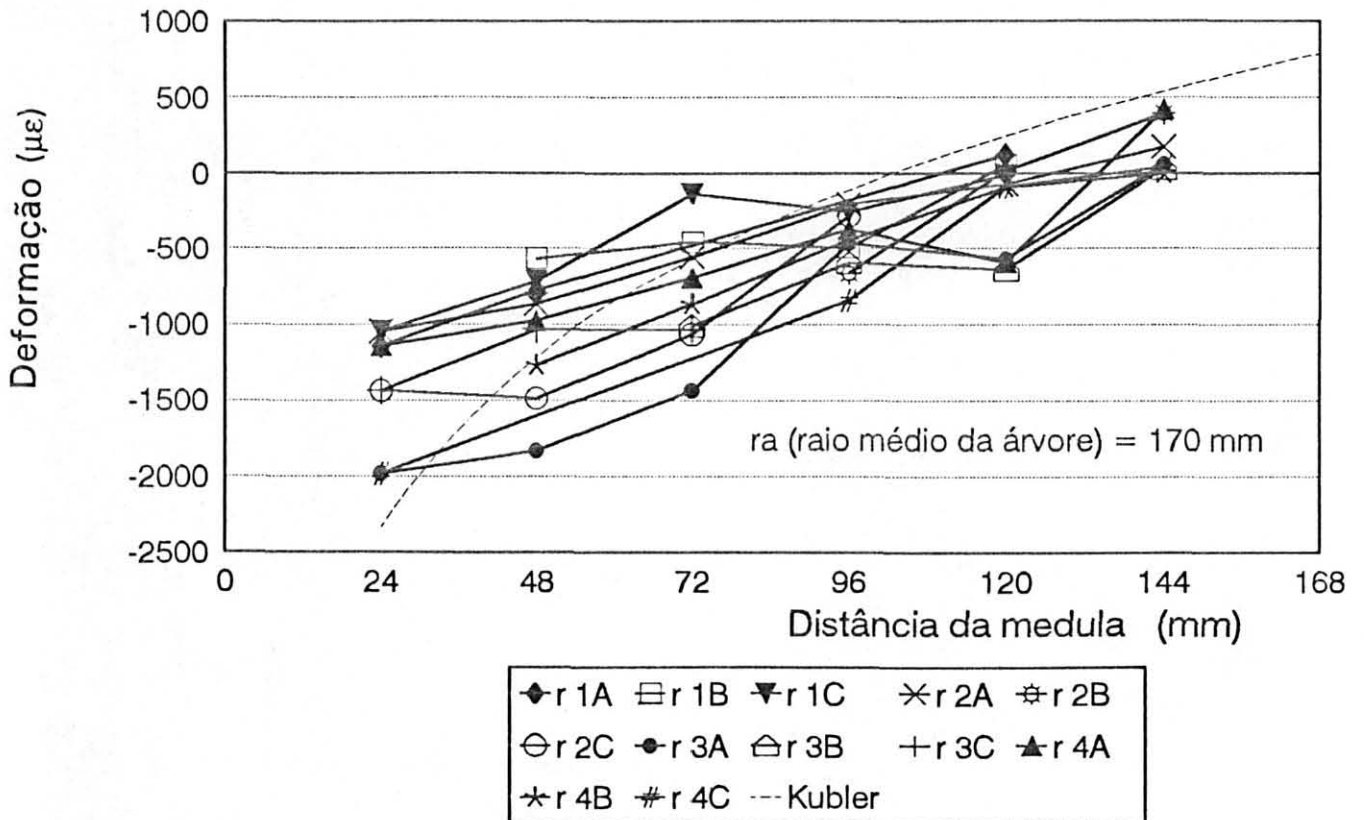
a. Tora n° 1



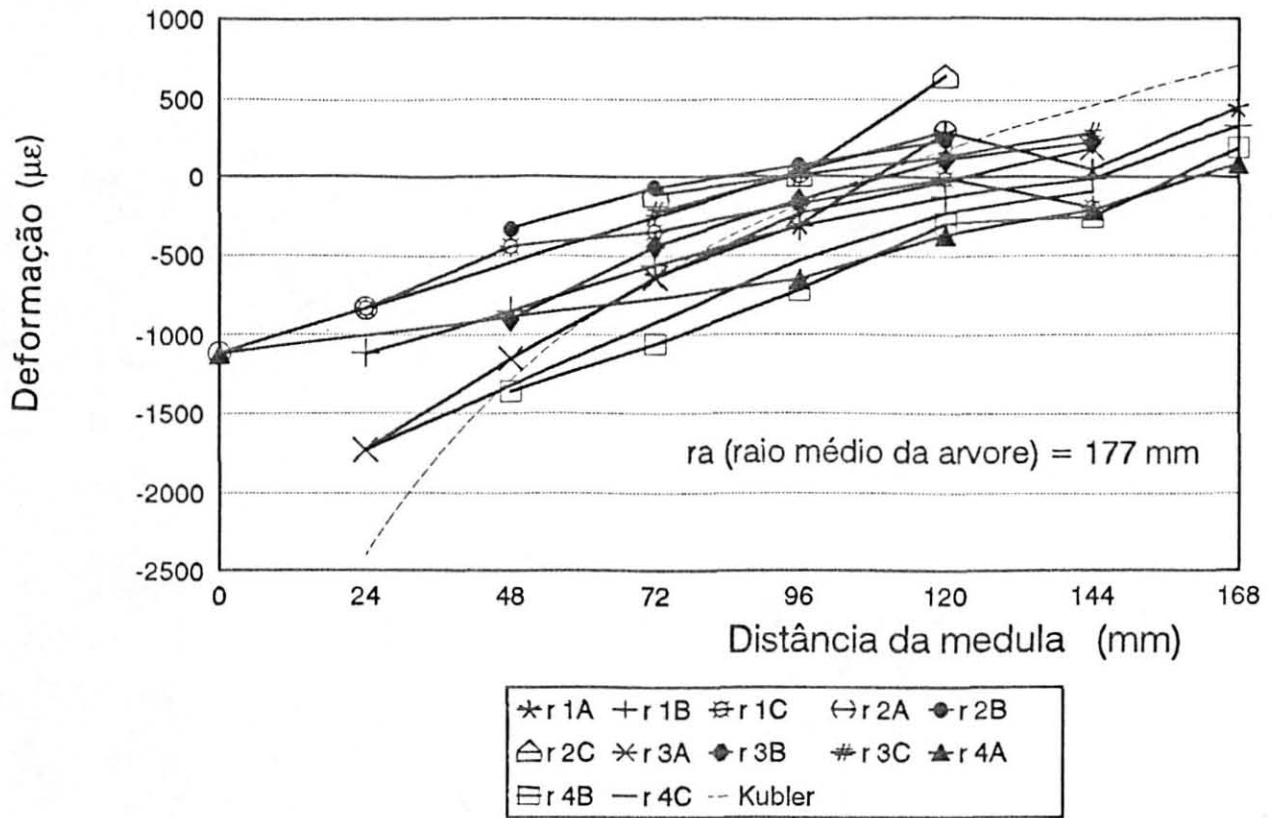
b. Tora n° 2



c. Tora n° 3



d. Tora n° 4



e. Tora n° 5

POST (1979a), analisando os dados dos quatro raios de apenas uma árvore de *Fraxinus americana*, reporta a mesma observação com relação aos valores próximos ao centro, menores valores estimados pelo modelo entre 15 a 35% de distância da medula e maiores valores compressivos entre 45 a 55%.

Na zona periférica de tração, a partir de aproximadamente 60% de distância da medula, os dados de POST (1979a) são bem representados pelo modelo de KUBLER (1959b).

Entretanto, KUBLER (1987) reporta que os resultados obtidos por JACOBS (1933, 1945), em mais de 200 árvores de *Eucalyptus gigantea* (*Eucalyptus delegatensis*), confirmam a precisão do referido modelo, conforme discutido no item 2.3.1.

Em função da enorme variabilidade existente entre resultados referentes às deformações de crescimento, é muito provável que KUBLER (1987) novamente tenha razão ao afirmar que a relativa utilização de poucas árvores no estudo de uma espécie passa conduzir a falsas interpretações.

Não sendo objetivo desta tese a determinação do exato modelo teórico que se adeque aos valores determinados, fica registrada a possibilidade de validade do modelo de KUBLER (1959b), uma vez que uma maior quantidade de dados sejam disponíveis para verificá-lo.

É com o intuito de prosseguimento dos estudos iniciados com Eucaliptos brasileiros, que todos os dados obtidos, inclusive os originalmente medidos, são fornecidos em anexo.

Com referência à tora nº 3, o seu comportamento completamente atípico, em relação às outras quatro incluídas, tem-se manifestado em todas as análises até aqui apresentadas, conforme pode ser observado na Tabela 15.

Como diferenças na metodologia utilizada no processamento desta árvore destaca-se, principalmente, que a mesma foi a única a ser abatida com anelamento circunferencial (Item 3.1), técnica considerada inclusive como destinada ao alívio de tensões visando a diminuição da ocorrência de rachas. Também esta árvore, ficando presa em outra vizinha quando da sua queda após o corte de derruba, foi submetida a um esforço de flexão adicional. Por último, durante a medição dos sarrafos isolados, um dos relógios comparadores teve que ser substituído, sendo as medições do sarrafo dentro da tora realizada com relógio comparador

diferenciado.

Com referência ao gradiente de tensão ou deformação existente no sentido casca/medula, a Tabela 16 apresenta a relação existente entre a distância radial a partir da medula (r) e o raio da árvore (r_a), referente ao ponto de transição entre o estado de tração longitudinal periférico e o de compressão longitudinal central.

TABELA 16. DISTÂNCIA RADIAL DE TRANSIÇÃO, A PARTIR DA MEDULA, ENTRE O ESTADO DE TRAÇÃO LONGITUDINAL PERIFÉRICA E O DE COMPRESSÃO LONGITUDINAL CENTRAL, NO TRONCO DE ÁRVORES DE *Eucalyptus grandis* HILL. EX MAIDEN.

Tora N°	Distância radial (r/r_a)*		
	Mínimo	Médio	Máximo
1	0,47	0,62	0,78
2	0,52	0,67	0,78
3	0,27	0,31	0,40
4	0,69	0,77	0,84
5	0,54	0,68	0,82
Geral	0,27	0,61	0,84
Geral Exceto Tora N° 3	0,56	0,69	0,81

* r = Distância radial a partir da medula; r_a = raio da árvore.

Novamente, a tora n° 3 apresenta um comportamento atípico em comparação com as demais. Excetuando-se o ponto mínimo de $0,27r_a$, os valores restantes são muito bem comparáveis com aqueles registrados na bibliografia consultada, os quais variam de $0,45r_a$ para *Fagus sylvatica* (SWACZNA, 1979a e b) a $0,75r_a$ para *Eperua falcata* (CHARDIN & SALES, 1983a e b).

As diferenças observadas no presente experimento, entretanto, não justificam a eliminação de nenhum valor, face a enorme variabilidade dos dados encontrada nos estudos referentes ao tema em questão.

Confirmada a magnitude e distribuição das deformações de crescimento residuais longitudinais no interior dos troncos de árvores de *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden, não resta dúvida que a maior eficiência do seu desdobro é obtida através de processos de "cortes

simultâneos” e, em segundo lugar, de “cortes alternados”, conforme tratado no item 4.2.2.

4.2.5.2 Deformações de crescimento ocorrentes no desdobro de toras em pranchas e de pranchas em sarrafos

As magnitudes das deformações de crescimento resultantes da liberação de tensões no desdobro de toras em pranchas e de pranchas em sarrafos, em unidades de microdeformações ($1\mu\varepsilon = 10^{-6}\text{mm/mm}$), foram determinadas segundo as fórmulas $\varepsilon_{ip} = \frac{S_i - S_p}{S_p} \times 10^6$ e $\varepsilon_{ps} = \frac{S_p - S_s}{S_s} \times 10^6$ (Item 3.3.2.2), para algumas pranchas das toras n^{os} 1, 2 e 5, conforme apresentada na Tabela 17.

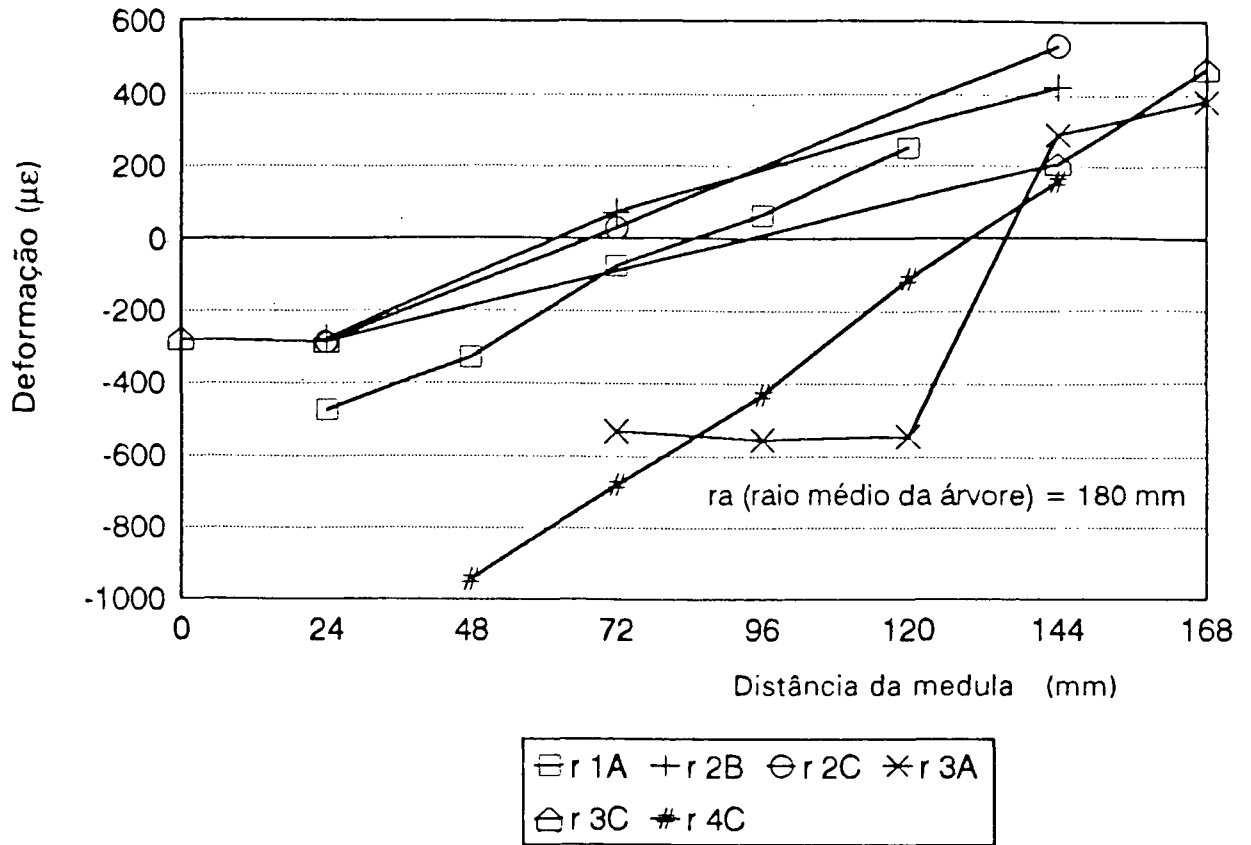
A distribuição radial das deformações de crescimento longitudinais, devido ao desdobro das toras em pranchas (Figura 64), apresenta o mesmo gradiente de tração periférica e compressão central ocorrente no tronco da árvore, conforme observado quando da análise das deformações de crescimento devido ao desdobro das toras em sarrafos (Figuras 62 e 63), exceto para os raios r_{4A} da tora 2 e r_{4B} da tora 5.

Esta verificação está em contradição com as conclusões teóricas constantes no item 2.2.1.2.1, segundo as quais deveria ocorrer um alongamento da prancha, em decorrência da existência de maior proporção de madeira em estado de compressão na tora (madeira central que tende a expandir-se com a liberação das tensões através do desdobro) do que na prancha. Também está em contradição com os dados experimentais de POST (1979a), baseados na análise de apenas uma prancha diametral, nos quais foram obtidas somente deformações de compressão ao longo de toda a prancha, e conseqüentemente, o aumento de todo seu comprimento (Figura 28 - Item 2.3.1.1).

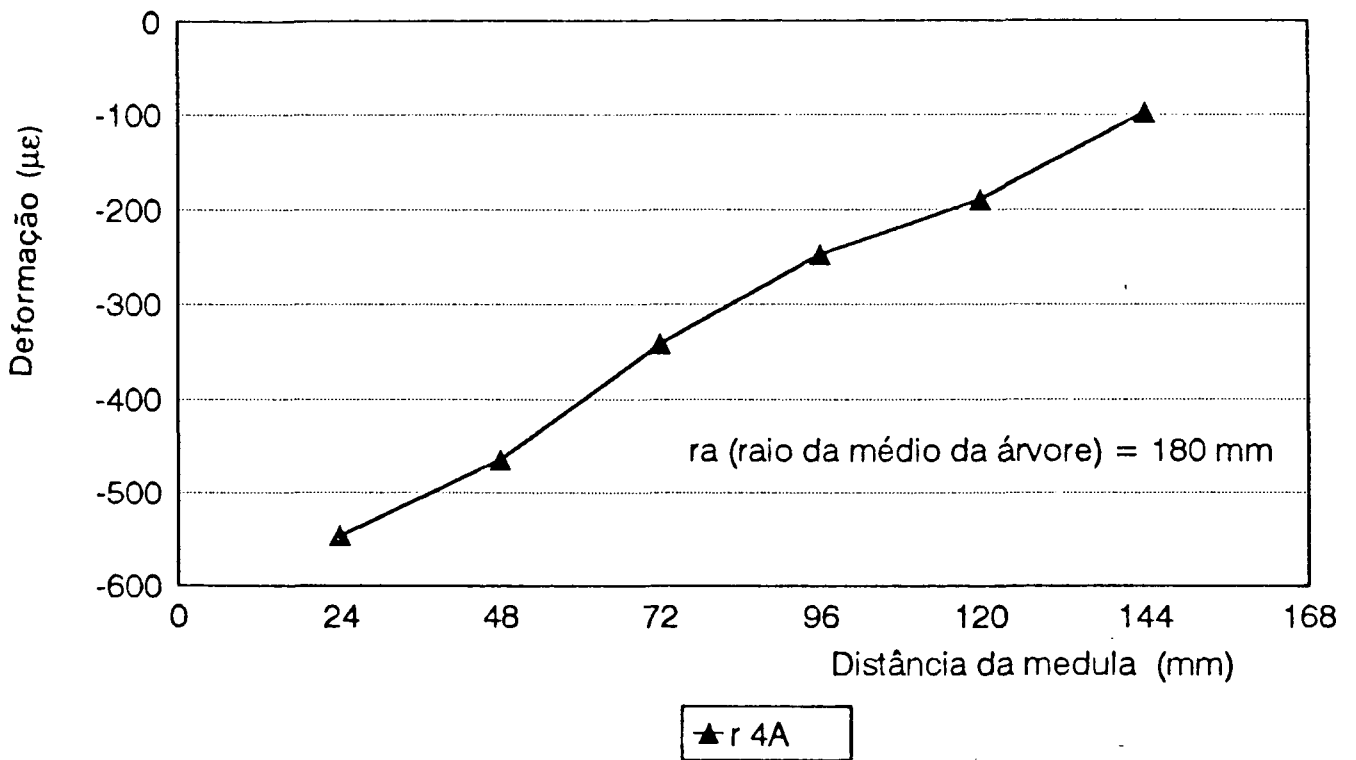
Nenhuma explicação para esta diferença de comportamento é encontrada, excetuando-se apenas o fato de se tratar de espécies diferentes e de não ter sido observado o tempo transcorrido entre o desdobro e as medições.

No presente experimento, não tendo sido planejado especificamente o estudo da variação das deformações com o tempo, sendo as medições realizadas logo após o desdobro, nada se pode concluir quanto ao período necessário para ocorrerem as recuperações

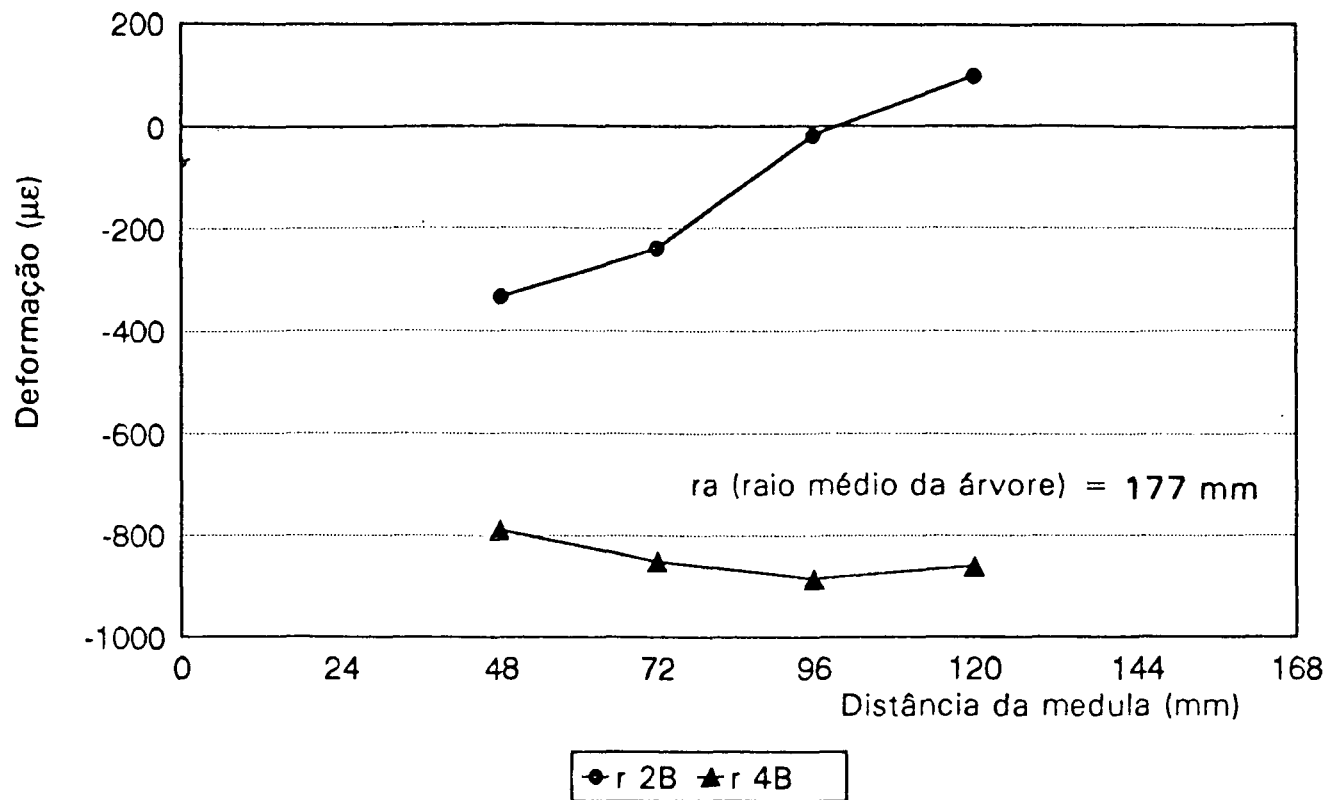
FIGURA 64. DISTRIBUIÇÃO RADIAL DAS DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS ($1\mu\epsilon = 10^{-6}\text{mm/mm}$) DECORRENTES DA LIBERAÇÃO DE TENSÕES NO DESDOBRO DE TORAS DE *Eucalyptus grandis* HILL. EX MAIDEN EM PRANCHAS. a. TORA N° 1; b. TORA N° 2; c. TORA N° 5.



a. Tora n° 1



b. Tora n° 2



e. Tora n° 5

Embora ao desdobro de toras em sarrafos corresponda maior liberação de tensões do que no de pranchas em sarrafos, as magnitudes das deformações registradas no segundo caso, em valores absolutos, podem ser maiores do que no primeiro, fato este explicado pelas redistribuições e interações de tensões que ocorrem dentro da prancha. Por este mesmo motivo, em alguns casos, ocorreram inversões de deformações de tração para compressão e vice-versa (Figura 62, 63 e 64).

Da mesma forma que observado por POST (1979a), nenhum tipo de relacionamento pode ser visualizado entre as deformações ocorrentes, em função do desdobro de pranchas em sarrafos, com as demais determinações realizadas.

A variabilidade entre ambos os resultados, referentes ao desdobro de toras em pranchas e estas em sarrafos, é também bastante elevada.

4.3 Deformações de crescimento transversais

4.3.1 Deformações tangenciais

De acordo com a metodologia descrita no item 3.3.3.1, a qual foi também utilizada por JACOBS (1945) e BOYD (1950a), as deformações de crescimento transversais compressivas periféricas foram determinadas em um disco de madeira, conforme apresentado nas duas primeiras linhas da Tabela 18. Somente com a finalidade de verificação, mediram-se também as deformações ocorrentes na porção central do disco, as quais estão incluídas nas duas últimas linhas da referida Tabela.

TABELA 18. DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO TANGENCIAIS DETERMINADAS EM UM DISCO DE MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* HILL. EX MAIDEN.

Identificação das Distâncias Medidas ⁽¹⁾	Diâmetros (mm)				Deformações específicas ($\mu\epsilon$)	
	Antes do Corte		Após o Corte		Disco	Porção Central
	Disco D_i	Porção Central M_i	Anel D_i'	Porção Central M_i'	$\frac{D_i - D_i'}{D_i'} \cdot 10^6$	$\frac{M_i - M_i'}{M_i'} \cdot 10^6$
1-2	302,92	-	303,28	-	-1.187	-
3-4	290,72	-	291,38	-	-2.265	-
5-6	-	189,20	-	189,34	-	-739
7-8	-	190,38	-	190,40	-	-105
Média					-1.726	-422

(1) Figura 55.

A média dos valores obtidos, sendo considerada a fim de minimizar erros devidos às distorções, principalmente nos anéis circulares cortados, fornece o valor da deformação específica periférica compressiva de $1.726\mu\epsilon$. Para a deformação também compressiva na porção central o disco, obtém-se a média de $422\mu\epsilon$.

O valor da deformação tangencial compressiva ($1.726\mu\epsilon$) equipara-se aos máximos determinados por BOYD (1950a) para *Eucalyptus* spp. (diâmetro variando de 140,0 a 337,0mm), os quais apresentam variação de 1.600 a $2.300\mu\epsilon$, estando mais próximos dos mínimos determinados por JACOBS (1945) para *Eucalyptus gigantea* (800 a $4.000\mu\epsilon$). Também pode ser comparável ao de $1.250\mu\epsilon$ obtido nos estudos de OKUYAMA & KIKATA (1975c).

A magnitude desta deformação tangencial compressiva ($1.726\mu\epsilon$), é bem maior do que as das deformações longitudinais de tração periférica e mais comparável às longitudinais compressivas que ocorrem no centro da árvore, as quais, têm valores médios, determinados neste experimento, iguais a 390 e $1.131\mu\epsilon$, respectivamente.

A deformação compressiva medida na porção central do disco ($422\mu\epsilon$) deveu-se a um aumento de suas dimensões após o corte (Tabela 18), contrariando as observações de JACOBS (1945), que registra uma diminuição dessas dimensões (Figura 20a), explicada como sendo devida ao estado de tração radial. Este estado de tração, comprovado pelo modelo teórico de KUBLER (1959a) - Figura 30 e pelos experimentos de OKUYAMA & KIKATA (1975c) - Figura 34, conduz a uma diminuição da porção central do disco. Entretanto,

nenhuma consideração foi realizada pelos autores citados quanto à interação das deformações causadas pela ocorrência das tensões de tração radiais e tangenciais na porção central, com as tensões de compressão tangenciais na parte externa do disco. Efeito análogo de interações de tensões é observado e discutido na análise das deformações de crescimento longitudinais ocorrentes no desdobro de pranchas em sarrafos (Item 4.2.5.2).

Considerando que as experiências realizadas para estudo das deformações tangenciais de crescimento são bastante limitadas (Itens 2.2.2.1, 2.3.2 e 2.4.3), e que os resultados obtidos baseiam-se em apenas um disco de madeira, não se pode aprofundar qualquer discussão sobre o assunto.

O presente experimento comprova a existência de um estado de compressão periférico tangencial e fornece detalhes sobre as metodologias utilizadas até então, de tal forma a facilitar a realização de futuros experimentos.

4.3.2 Deformações radiais

De forma similar à conduzida por BOYD (1950a), os experimentos realizados (Item 3.3.3.2) conduziram aos resultados apresentados na Tabela 19, baseando-se em um disco de madeira.

TABELA 19. DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO RADIAIS DETERMINADAS EM UM DISCO DE MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* HILL. EX MAIDEN.

Identificação das Distâncias Medidas ⁽¹⁾	Distâncias Medidas (mm)			Deformação Específica Radial ($\mu\epsilon$) ⁽³⁾ $\frac{A_i - (A_i' \text{ ou } A_i'')}{(A_i' \text{ ou } A_i'')}$
	Nº Disco ⁽¹⁾	Na Seção em Forma de "V" ⁽¹⁾	Na Subdivisão da Seção em Forma de "V" ⁽²⁾	
		A_i	A_i'	
1-2	51,12	51,18	51,00	+2.353
2-3	50,60	50,62	-	-395
3-4	50,58	50,60	50,60	-395
1-5	51,48	51,36	51,38	+2.336
5-6	50,60	50,60	-	0
6-7	51,22	51,22	51,20	+390

(1) Figura 57; (2) Figura 58; (3) Utilizou-se o menor valor entre A_i' e A_i'' .

Contrariamente às observações de BOYD (1950a), discutidas no item 2.2.2.2, com a subdivisão da figura em forma de “V” (cunha ilustrada na Figura 58) ocorreu a liberação de tensões adicionais em alguns casos (Tabela 19).

Em oposição a todos os experimentos analisados bibliograficamente, os quais reportam deformações específicas radiais de tração, na atual análise, obtiveram-se dois valores negativos e um nulo.

A explicação para tal fato pode residir na precisão do instrumento utilizado para medição (paquímetro com precisão de 0,02mm) em comparação com o microscópio de medição com graduação de 1×10^{-3} mm utilizado por BOYD (1950a).

Somente a precisão do paquímetro pode conduzir a um erro aproximado de $400\mu\epsilon$, ao considerar-se o comprimento de medição de 50,00mm $\left[\frac{0,02}{50,00} \times 10^6 = 400 \right]$.

Por outro lado, como a distribuição das deformações radiais apresentam variações significantes (KUBLER, 1987), a medição em um único disco pode conduzir a resultados errôneos.

A respeito da existência de um gradiente crescente de deformação radial, a partir do valor zero na casca até um valor máximo na medula, conforme modelo teórico proposto por KUBLER (1959a) e ilustrado na Figura 30, os resultados obtidos indicam a ocorrência do valor máximo próximo à medula com magnitude variando de 2.336 (Pontos 1 -5) a 2.353 $\mu\epsilon$ (Pontos 1-2), cuja média é de 2.345 $\mu\epsilon$.

Também o valor zero na casca pode ser considerado, uma vez que os 390 $\mu\epsilon$ determinados nesta posição é inferior à precisão mínima do instrumento de medição.

Alguns autores consultados encontraram resultados divergentes. Assim, as deformações radiais determinadas por BOYD (1950a) são aproximadamente constantes ao longo de todo o raio (1.200 a 1.400 $\mu\epsilon$) e na periferia é registrado um valor de 600 $\mu\epsilon$. SWACZYNA (1979b) também se refere à constância desses valores (2.000 $\mu\epsilon$), exceto próximo à medula, onde ocorreu um pico de 4.500 $\mu\epsilon$ (Item 2.4.3).

Apesar do presente experimento ter sido prejudicado pela precisão do instrumento de medição, tanto no que se refere à exatidão obtida nas medidas quanto à eficácia do apoio

dos bicos do paquímetro em pequenas hastes de pregos, a magnitude do valor central é equiparável ao valor de $2.000\mu\epsilon$, citados por OKUYAMA & KIKATA (1975c), para *Eucalyptus* sp.

A variação máxima verificada na revisão bibliográfica situa-se entre $600\mu\epsilon$, determinados na periferia (BOYD, 1950a), a um pico de $4.500\mu\epsilon$ próximo à medula (SWACZYNA, 1979b).

4.4 Tensões de crescimento

Considerando-se todos os valores de deformações de crescimento longitudinais determinados nesta tese e os diversos módulos de elasticidade (MOE) indicados, a Tabela 20 fornece uma idéia da magnitude das tensões envolvidas, obtidas através da Lei de Hooke ($\sigma = \epsilon E$).

TABELA 20. MAGNITUDE DAS DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS DETERMINADAS E CORRESPONDENTES TENSÕES PARALELAS ÀS FIBRAS, OBTIDAS PELA LEI DE HOOKE PARA *Eucalyptus grandis* HILL. EX MAIDEN.

	Tração Periférica			Compressão na Medula			MOE
	Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima	
Deformação ⁽¹⁾ ($\mu\epsilon$)	2	390	1.025	353	1.131	2.089	-
Tensão (kg/cm^2)	0,3	52,7	138,4	47,7	152,7	280,8	2
	0,3	54,6	143,5	49,4	158,3	291,2	3
	0,2	29,6	77,9	26,8	86,0	158,1	4

(1) Tabela 15

(2) $135 \cdot 10^3 \text{ kg}/\text{cm}^2 = \text{MOE na flexão estática - Tabela A1.9 (HILLIS & BROWN, 1978)}$

(3) $140 \cdot 10^3 \text{ kg}/\text{cm}^2 = \text{MOE na compressão paralela às fibras para } Eucalyptus \text{ sp. (OKUYAMA & KIKATA, 1975c)}$.

(4) $76 \cdot 10^3 \text{ kg}/\text{cm}^2 = \text{MOE na flexão estática determinado nesta tese (Tabela 12 - Item 4.1.4)}$

A importância das tensões de crescimento como causa de deformações é evidenciada ao comparar o valor médio da resistência máxima na compressão paralela às fibras ($255 \text{ kg}/\text{cm}^2$ - Tabela 12), com os valores constantes na Tabela 20.

Em termos de tensões de compressão máximas no limite proporcional (280,8; 291,2

e $158,1 \text{ kg/cm}^2$ - Tabela 20) é razoável supor que as tensões de crescimento provocam, em alguns casos, deformações plásticas e até mesmo a ruptura da madeira.

Utilizando-se os valores dos módulos de elasticidade nas direções tangencial ($8,03 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$) e radial ($10,5 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$), determinados para *Eucalyptus* sp. (OKUYAMA & KIKATA, 1975a), às deformações de crescimento tangencial periférica ($1.726 \mu\epsilon$ - Tabela 18) e radial máxima na proximidade da medula ($2.345 \mu\epsilon$ - Tabela 19) obtidas correspondem as tensões de $13,9$ e $24,6 \text{ kg/cm}^2$, respectivamente.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Uma Revisão de Literatura significativamente extensa e detalhada é apresentada, incluindo os principais aspectos concernentes aos estudos de tensões de crescimento na madeira. Ao mesmo tempo em que situa o autor e os leitores na complexidade do tema, deixa clara a necessidade do desenvolvimento de outras pesquisas correlatas, tais como, sobre: a origem das tensões, a influência de deformações plásticas e de recuperações visco-elásticas, a relação existente com outros fatores ou propriedades da madeira, de tal forma a facilitar o seu entendimento e sua própria estimativa não destrutiva, bem como o desenvolvimento de métodos mais eficazes para a precisa determinação de sua magnitude e distribuição, etc.

Da mesma forma que foi abordado no item 4 - “Resultados e Discussão”, são abordadas, a seguir, as conclusões alcançadas e as recomendações pertinentes à pesquisa desenvolvida, sob os três temas principais: caracterização da madeira (Item 4.1), deformações de crescimento longitudinais (Item 4.2) e deformações de crescimento transversais (Item 4.3).

5.1 Caracterização da madeira

5.1.1 Caracteres gerais da árvore e da madeira

- a. Os caracteres gerais da madeira das cinco árvores estudadas de *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden, da família Myrtaceae, incluindo também algumas observações anatômicas macroscópicas de maior relevância, são apresentados

no item 4.1.2.

- b. As árvores da espécie, de caráter dominante na área do reflorestamento, foram consideradas como de rápido crescimento em diâmetro (3,3cm/ano) em comparação com outras da mesma espécie, reflorestadas em diferentes regiões geográficas do Brasil (2,0 cm/ano) e da República da África do Sul (1,7 a 2,3cm/ano), fato este não considerado como de influência na magnitude das deformações de crescimento.
- c. A idade de 11 anos considerada não pôde ser confirmada com precisão pela contagem dos anéis de crescimento. Estes, considerados pouco distintos e cerca de quatro vezes mais largos na madeira juvenil, em comparação com a adulta, comprovam o acentuado crescimento inicial.

5.1.2 Propriedades físicas

- a. Em termos médios, os teores de umidade mínimos determinados variaram de 71,3 a 155,7%, comprovando o estado “verde” da madeira utilizada e, conseqüentemente, a não influência de outros fatores nos resultados obtidos, principalmente das contrações oriundas da secagem.
- b. Os valores das densidades médias verde (0,87g/cm³), seca (0,46g/cm³) e básica (0,39g/cm³) obtidos, comparam-se bem com outros registros encontrados nas referências bibliográficas consultadas, considerando-se a reconhecida e significativa variabilidade existente, tanto dentro como entre árvores de uma mesma espécie de Eucaliptos e, em particular, para *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden.

Para a densidade saturada (1,13g/cm³) não encontrou-se parâmetro comparativo.

A despeito desta variabilidade, os coeficientes de variação determinados são

inferiores aos médios publicados como referenciais para madeiras de Angiospermas, exceto para a densidade verde.

A quantidade de árvores ensaiadas satisfaz as exigências estatísticas de estimativa dos valores médios verdadeiros da população, dentro de intervalos de confiança de $\pm 5\%$ e $\pm 10\%$ dos valores médios estimados, a um nível de confiança de 98%, exceto para a densidade verde, caso em que uma árvore adicional deve ser ensaiada. A amostragem realizada para esta última garante que o seu valor verdadeiro encontra-se dentro de um intervalo de confiança de $\pm 15\%$, a um nível de confiança de 95%, precisão esta indicada como adequada para propósitos de investigações preliminares.

Tanto os valores médios da densidade básica quanto da verde, determinados para cada árvore, não apresentam diferenças significantes a um nível de 1% de probabilidade e, desta forma, as médias aritméticas obtidas para cada uma delas são consideradas representativas da madeira estudada.

O contraditório aumento ou diminuição da densidade básica em função da altura ao longo do fuste da árvore não é confirmado pelos resultados encontrados, os quais não apresentam nenhuma tendência dentro da pequena faixa de 2,32m de comprimento analisada, mas o menor valor determinado para a madeira do lenho juvenil, em comparação com o adulto, confirma o gradiente crescente de variação existente no sentido medula-casca.

5.1.3 Propriedades mecânicas

- a. As propriedades mecânicas de *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden são pouco estudadas, inclusive a nível de Brasil. Seus valores médios determinados (Tabelas 12 e A1.9) são cerca de 1,1 a 2,3 vezes menores do que os mínimos e máximos publicados por HILLIS & BROWN (1978).

Apesar desta diferença, a madeira da espécie em estudo tem resistências comparáveis (Tabela 12) às de espécies amazônicas de mesma faixa de densidade básica.

- b. Os valores obtidos apresentam baixa variabilidade em comparação com os coeficientes de variação médios, publicados para angiospermas, exceto no caso da dureza.
- c. A análise da confiabilidade de suas médias, como representativas da população a que se referem, estabelece que as mesmas devem ser consideradas apenas como valores indicativos, obtidos em uma pré-amostragem. Exceção é feita para a resistência máxima à tração perpendicular e ao módulo de elasticidade na flexão estática, onde a média verdadeira da população está incluída em um intervalo de confiança de $\pm 15\%$ e $\pm 10\%$ dos valores médios estimados, respectivamente, no nível de confiança de 98%.
- d. A resistência do lenho adulto, sendo maior do que a do lenho juvenil (Tabela 12), reflete a relação direta existente com os valores de suas respectivas densidades.

5.2 Deformações de crescimento longitudinais

5.2.1 Abate das árvores

Os três sistemas de cortes utilizados para obtenção da madeira experimental (anelamento circunferencial, chanfro e corte transversal direto, e perfuração ou traspasamento do tronco com a motosserra anteriormente à derruba), sugeridos na bibliografia consultada, como forma de redução de ocorrência de rachas, não demonstraram nenhuma influência significativa.

A ocorrência destas rachas implica na obtenção de deformações de crescimento de

menores magnitudes, devido à liberação de tensões anteriormente às medições.

Entretanto, como estas observações basearam-se em apenas cinco árvores, não se pode invalidar as referidas sugestões.

A existência de tensões de crescimento compressivas de significantes magnitudes, foi verificada em uma árvore em pé, através do desprendimento da parte central do seu tronco, perfurado com o sabre de uma motosserra em um dia anterior ao abate.

5.2.2 Desdobro para obtenção de amostras

- a. O desdobro de toras em pranchas e estas em sarrafos, com reduzidas seções transversais (20,0 x 20,0mm) e relativos grandes comprimentos (2.320,0mm) conforme exigido para a medição das deformações de crescimento longitudinais, constitui-se em uma das fases do experimento de maior dificuldade de execução.

O equipamento disponível com apenas uma serra, e o encurvamento da tora provocado pela liberação de tensões à medida que novas pranchas iam sendo retiradas, inviabilizaram a correta utilização do processo de desdobro de "cortes alternados", aconselhado para o processamento de toras com significantes tensões de crescimento.

- b. A recolocação da tora no carro porta-toras, após o seu volteamento, constituiu-se na maior dificuldade encontrada quando da utilização do desdobro em "cortes alternados", indicando, desta forma, que o desdobro em "cortes simultâneos" poderia trazer certa facilidade. Entretanto, a existência de pregos nas extremidades dos sarrafos de reduzidas dimensões e a conicidade da tora podem trazer dificuldades maiores.
- c. O processo de desdobro deve ser conduzido sem interrupções prolongadas, de forma a minimizar o aumento da formação das rachas e empenamentos, em

função da alteração das distribuições das tensões provocada por cada novo corte.

5.2.3 Adequabilidade da amostra

- a. O comprimento padrão de 2.320,0mm das amostras (sarrafos) é compatível com os utilizados por outros autores (1.016 a 2.500mm) em experimentos similares.

A razão média entre estes comprimentos e o diâmetro das respectivas toras ($l/d = 6,6$) é maior do que a calculada através dos dados bibliográficos ($l/d = 6,1$).

Este fato contribui para a menor influência da redistribuição de tensões provocada pelos cortes transversais (“efeito de topo”), o qual diminui a magnitude das deformações ou tensões de crescimento medidas.

- b. As seções transversais dos sarrafos (s), da mesma forma, apresentam uma melhor relação com o diâmetro (d).

O valor médio determinado ($s/d = 0,06$), em comparação com a média calculada entre experimentos realizados por diferentes autores ($s/d = 0,09$), permitiu a obtenção de sarrafos com esbeltez adequada, ao mesmo tempo que possibilitou a determinação da variação radial das deformações de crescimento. Sarrafos de maiores dimensões são mais fáceis de serem serrados, mas prejudicam o conhecimento da referida variação radial.

- c. A variação de cada uma das dimensões das seções transversais dos sarrafos (16,3 a 24,5mm), em relação à seção inicialmente escolhida (20,0 x 20,0mm) é considerada satisfatória, devido à enorme dificuldade encontrada no desdobro e por ser menor do que outros valores registrados na bibliografia.
- d. Os defeitos (nós, rachas, esmoados e bolsa de goma ou kino) ocorrentes em

cada sarrafo são relacionados no Anexo 2.

Independentemente da ocorrência destes defeitos, todos os sarrafos foram utilizados nas medições realizadas, uma vez que não foi identificada nenhuma influência específica dos mesmos nos resultados obtidos.

A inclinação da grã somente foi analisada para um número limitado de sarrafos, embora significantes variações das deformações de crescimento possam ser atribuídas à grande influência deste fator.

- e. Os pregos galvanizados, tendo suas cabeças esmeriladas, comprimento variáveis da 14,52 a 15,68mm e diâmetros de 1,20 a 1,28mm, atenderam perfeitamente aos propósitos do experimento, permanecendo firmes em suas posições e propiciando uma superfície limpa, homogênea e constante, para o contacto dos fusos dos relógios comparadores, durante as repetidas medições realizadas.

5.2.4 Medição das deformações

5.2.4.1 Variação de temperatura e umidade relativa do ar

- a. Durante as medições dos comprimentos dos sarrafos dentro da tora (S_t), da prancha (S_p) e isoladamente (S_s), a temperatura apresentou uma variação máxima de 20,0°C a 33°C. Em termos médios ponderados, em função do número de medições realizadas, aos valores de S_t , S_p e S_s corresponderam 28,9, 23,1 e 23,5°C, respectivamente. E, para o conjunto de medições realizadas, a média ponderada passou a ser 25,8°C, bastante similar à de aferição do aparelho de medição fabricado (26,4°C).

Associado a este fato e considerando-se que a resposta de dilatação ou contração térmica de um material depende do tempo de sua exposição (que no

caso da madeira pode alcançar até duas horas), que as variações médias são relativamente baixas, e que existe uma compensação de erros ocorridos quando da determinação das deformações de crescimento (obtidas através de diferenças de medidas de comprimentos tomadas sucessivamente em temperaturas sempre descendentes), a influência da variação térmica ocorrida não foi introduzida nos cálculos.

A exata influência da variação de temperatura não pôde ser determinada, devido à inexistência ou ao desconhecimento dos parâmetros necessários relativos a cada material envolvido nas medições: calor específico, calor específico médio, coeficiente de temperatura e de dilatação térmica.

Em futuros experimentos, é sugerido o emprego de materiais homogêneos quanto aos parâmetros térmicos, bem como sua execução em ambiente dotado de controle de temperatura e umidade relativa, a fim de minorar os seus efeitos discutidos no item 4.2.4.1.

- b. A umidade relativa apresentou uma variação de 45,5 a 87,0%, durante o período total de execução do experimento, não interferindo nas condições necessárias de teor de umidade da madeira, a qual se manteve no "estado verde" (Item 5.1.2).

5.2.4.2 Intervalo de tempo de medição

Em fase anterior ao experimento, a análise do tempo necessário para a liberação das tensões de crescimento longitudinais e conseqüentes deformações indicou que os valores máximos destas últimas ocorreram nos cinco primeiros minutos transcorridos após o desdobro de sarrafos localizados em zonas de compressão.

Para sarrafos tracionados, as análises pré-experimentais foram inconclusivas, em função da pequena quantidade de dados disponíveis.

Bibliograficamente, o período de tempo citado, de 15 minutos de espera, para fins de obtenção de valores máximos representativos da liberação de deformações visco-elásticas, limitando o tempo do experimento a aproximadamente oito horas, encontram maior coerência na prática de execução.

Os espaços de tempo mínimo, médio e máximo (9, 57 e 153 minutos, respectivamente) transcorridos desde o desdobro dos sarrafos a partir da prancha, até o momento da medição de suas deformações, no atual experimento, atendem aos períodos acima apresentados, incorporando aos resultados os efeitos de recuperações elásticas e visco-elásticas.

As medições das deformações, tendo sido realizadas em um período de 9 a 12 horas, na sua maioria durante a noite, minimizaram eventuais efeitos de secagem.

5.2.4.3 Reprodutibilidade de medições

- a. O desempenho do aparelho fabricado para medição do comprimento de peças de madeira, ou das deformações de crescimento longitudinais, pôde ser considerado satisfatório, principalmente quanto ao seu manuseio. A operacionalidade de medições, tanto com o paquímetro quanto com os relógios comparadores, não apresentou nenhuma dificuldade. Tais conclusões são válidas ao considerar-se o aspecto temporário de utilização para o qual foi fabricado. Neste sentido, apenas o seu elevado peso representou dificuldade, o que poderia ter sido resolvido pela simples utilização de rodízios.
- b. Embora o aparelho de medição possua princípio de funcionamento semelhante ao adotado em experimentos similares, sua comparação não foi possível devido a inexistência de dados bibliográficos.
- c. A precisão dos instrumentos de medições utilizados (0,01mm para os relógios comparadores e 0,02mm para os paquímetros) foi considerada satisfatória. Medições de deformações de crescimento longitudinais de magnitudes iguais

a $4,3\mu\epsilon$ puderam ser determinadas com os referidos instrumentos, considerando-se o comprimento padrão utilizado de 2.320,0mm e apenas dois valores determinados são inferiores em ordem de grandeza.

A precisão de 1mm da trena de aço utilizada na medição do comprimento padrão inicial de 2.320,0mm, não influenciou nos resultados alcançados.

O rigor estabelecido para a obtenção dos resultados finais foi, no mínimo, igual aos de outros experimentos similares já executados.

- d. A forma mais comum, indicada na bibliografia consultada, para aferição do aparelho de medição, através da consideração das diferenças obtidas, quando de repetidas medições realizadas em uma mesma peça de madeira ou de aço, não foi considerada de execução viável.

Alternativamente, fez-se uso de uma “coluna de aferição” utilizada pela WEG Motores S.A. para calibrações diversas, como o único procedimento destinado à verificação da reprodutibilidade de medições.

Constatada a existência de irregularidades nas leituras realizadas, duas equações foram propostas para o ajustamento dos dados obtidos em cada uma das hastes do aparelho de medição separadamente, sendo os resultados finais apresentados no Anexo 4.

A análise de possíveis erros ocorrentes, incluindo: irregularidades existentes nas hastes e nas suas canaletas, por onde é deslocada a peça de fixação dos relógios comparadores para possibilitar a realização de medidas em diferentes alturas; assentamento das peças de fixação nestas canaletas; e precisão de leituras dos relógios comparadores indicou a possibilidade de ocorrência de uma variação máxima igual a $21\mu\epsilon$ nas deformações de crescimento longitudinais determinadas. Esta variação é muito menor do que os $35\mu\epsilon$ aceitos por POST (1979a) e significativamente inferior à maioria das deformações de crescimento longitudinais determinadas, motivos pelos quais foi aceita.

5.2.5 Magnitude e distribuição

5.2.5.1 Deformações de crescimento ocorrentes no desdobro de toras em sarrafos

- a. As deformações de crescimento longitudinais, resultantes da liberação de tensões, que ocorrem no desdobro de toras em sarrafos, correspondem aos seus valores totais residuais possíveis de serem medidos.
- b. A existência de um gradiente de deformação no sentido casca (tração)/medula (compressão) é claramente confirmado.
- c. A transição do estado de compressão longitudinal central ao de tração longitudinal periférica, considerando a distância radial (r) a partir da medula, em relação ao raio (r_a) da árvore, ocorre em termos médios a $0,61 r_a$, conforme determinado nesta tese para *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden, comparando-se muito bem com a variação de $0,41$ a $0,75 r_a$, constantes nos registros bibliográficos para diferentes espécies de madeira.
- d. A magnitude média das deformações de tração determinada, igual a $390\mu\epsilon$, é cerca de 45% inferior aos valores registrados bibliograficamente para a tração periférica de *Eucalyptus* spp. (Tabela 1), fato explicado em função dos dados obtidos situarem-se a uma distância variável de 7,0 a 53,0mm da casca e, portanto, não corresponderem exatamente a valores periféricos.

Nesta situação, o referido gradiente de tração/compressão existente diminui a magnitude do valor de tração em direção à medula.

A variabilidade encontrada para os dados individuais obtidos (2 a $1025\mu\epsilon$) pode ser justificada da mesma forma, além das diferenças eventualmente existentes entre espécies.

Para o único valor de deformação de tração periférica citado na bibliografia consultada para *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden ($200\mu\epsilon$), o resultado médio determinado é cerca de duas vezes maior.

- e. O valor máximo da deformação compressiva, que ocorre na medula, dificilmente pode ser determinado para a espécie, devido à freqüente ocorrência de rachas nesta posição, o que inviabiliza a obtenção do sarrafo necessário à sua medição. Os valores máximos determinados nas camadas mais internas da madeira, apresentando uma média de $1.131\mu\epsilon$ e variação de 353 a $2.089\mu\epsilon$, têm melhor correspondência com os valores de *Eucalyptus* spp., constantes nas referências bibliográficas consultadas.

A enorme variabilidade existente é confirmada e inviabiliza a determinação de um estudo estatístico apropriado. Desvios padrão superiores às próprias magnitudes das deformações são freqüentemente mencionados.

O valor médio determinado pode ser situado em um intervalo aproximadamente central, com referência aos dados registrados por outros autores, sendo muito superior aos $194\mu\epsilon$, citado para árvores de nove anos de idade da mesma espécie (Tabelas 3, 4 e 5).

- f. Em função de sua ampla utilização em experimentos similares, o modelo teórico proposto por KUBLER (1959b) foi selecionado para comparação com os dados obtidos.

Os valores determinados para a tração periférica, tidos como constantes, não puderam ser utilizados, conforme previsto no modelo teórico, por não corresponderem a suas posições próximo à casca e, portanto, apresentarem magnitudes menores. Em substituição, utilizou-se o valor de $800\mu\epsilon$ proposto por BOYD (1950b).

As comparações realizadas separadamente para cada árvore, utilizando o raio médio de cada uma, indicaram que os valores estimados pelo modelo de KUBLER são bem maiores quando próximos ao centro da árvore, relativamente maiores quando próximos à casca e apresentam melhor nível de comparação quando suas estimativas são analisadas nas zonas intermediárias. Embora POST (1979a) também tenha mencionado a existência de diferenças,

em comparação similar, utilizando magnitudes de deformações obtidas para uma tora de *Fraxinus americana*, as suas conclusões somente coincidem com as apresentadas acima, no que se refere aos valores centrais.

As diferenças observadas, entretanto, não podem ser tomadas como definitivas, face a quantidade relativamente pequena de dados disponíveis neste experimento e muito menor por parte de POST (1979a). Por certo, a enorme variabilidade encontrada para as magnitudes das deformações de crescimento exige uma maior quantidade de informações para basear qualquer conclusão definitiva.

Para a tora nº 3 testada, foram encontradas exceções às conclusões apresentadas neste item "f.". Esta tora apresentou um comportamento atípico, em quase todas as análises efetuadas, em comparação com as outras quatro incluídas. Em função da variabilidade referida, não se pode desconsiderar seus resultados, muito embora diferenças metodológicas no seu processamento tenham sido anotadas.

- g. Não foi verificada nenhuma relação específica entre defeitos da madeira (nós, pequenas rachas, bolsa de goma ou "kino" e pequenos esmoados) e magnitudes das deformações medidas, de tal forma que os resultados alcançados são considerados como representativos da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden, considerando-se os defeitos normais nela encontrados.
- h. Aos valores das deformações de crescimento determinados correspondem os valores de tensões calculados na Tabela 20, os quais, em termos de tensões de crescimento longitudinais de compressão indicam a possibilidade de ocorrência de deformações plásticas e mesmo de ruptura da madeira.
- i. Confirmada a magnitude e distribuição das deformações de crescimento residuais longitudinais no interior de troncos de árvores de *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden, é evidente que o processo de "desdobro simultâneo", ("gang sawing") melhor se adequa aos Eucaliptos, por contribuir com a manutenção

do equilíbrio das tensões existentes anteriormente aos cortes, ou de outra forma, por diminuir os efeitos de concentrações localizadas de tensões.

Em função da indisponibilidade de equipamento de serras múltiplas, o processo de desdobro de "cortes alternados" constitui-se na melhor opção substitutiva do desdobro através de "cortes simultâneos", por favorecer o retorno do gradiente de deformações, alterado por cada corte, ao seu estado normal.

Desta forma, diminuindo a tendência de encurvamento da tora e das peças de madeira serrada, em função da liberação das tensões, os processos de desdobros citados acima contribuirão para a obtenção de uma maior precisão do corte, uma maior uniformidade de dimensões e uma menor ocorrência de rachas nas peças de madeira serradas.

5.2.5.2 Deformações de crescimento ocorrentes no desdobro de toras em pranchas e de pranchas em sarrafos

- a. A distribuição radial das deformações de crescimento longitudinais, devido ao desdobro das toras em pranchas, apresenta o mesmo gradiente de tração periférica e compressão central característico do tronco da árvore, conforme analisado quando das deformações de crescimento ocorrentes no desdobro da tora em sarrafos.

Esta determinação experimental está em desacordo com as análises teóricas apresentadas e com os resultados dos experimentos realizados por POST (1979a) em uma prancha diametral.

Nenhuma explicação foi encontrada para esta diferença de comportamento, exceto quanto ao fato de diferentes espécies estarem envolvidas e de não terem sido feitas referências em relação ao tempo transcorrido entre o desdobro e as medições, o qual influência na liberação das deformações visco-elásticas.

No atual experimento, as medições foram realizadas logo após o desdobro.

- b. A comparação das magnitudes das deformações referentes ao desdobro de toras em pranchas e posteriormente em sarrafos mostra a possibilidade de alterações de ordens de grandezas, considerando-as em valores absolutos, como também de inversão de valores de compressão para tração e vice-versa. Este fato pode ser explicado pela redistribuição de tensões no interior da prancha, provocando a interação de um determinado ponto (considerado para medição) sobre outros.
- c. Nenhuma correlação é visualizada entre as deformações decorrentes do desdobro de pranchas em sarrafos com as demais medições realizadas.
- d. A variabilidade entre os resultados obtidos, para ambos os casos de desdobro, tem elevada ordem de grandeza.

5.3 Deformações de crescimento transversais

5.3.1 Deformações tangenciais

Determinou-se o valor de $1.726\mu\epsilon$ para a deformação de crescimento tangencial compressiva periférica em um disco da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden.

Este valor compara-se perfeitamente bem com os determinados para diferentes espécies de Eucaliptos, considerando-se a grande variabilidade registrada nas referências bibliográficas consultadas. Sua magnitude é muito maior do que as deformações longitudinais periféricas e equipara-se melhor às deformações longitudinais compressivas determinadas experimentalmente.

A correspondente tensão estimada, entretanto, é igual a apenas $13,9 \text{ kg/cm}^2$, devido ao fato de que a madeira é muito menos resistente transversalmente.

A deformação compressiva ($422\mu\epsilon$) medida na porção central do disco, não comprova o estado de tração tangencial e, mesmo, radial existente. Entretanto, como nenhuma

análise é apresentada, pelos autores consultados, sobre a interação destas deformações de tração com a deformação compressiva tangencial periférica (efeito análogo ao observado na análise das deformações de crescimento longitudinais ocorrentes no desdobro de pranchas em sarrafos) não se pode afirmar sobre a não validade do dado obtido.

O experimento realizado, baseado em apenas um disco, impede qualquer discussão adicional.

5.3.2 Deformações radiais

Similarmente à determinação das deformações tangenciais de crescimento, o experimento realizado em um disco de madeira somente objetivou fornecer uma primeira idéia da aplicação metodológica e da provável ordem de grandeza do valor em questão.

Apesar dos resultados obtidos terem sido sensivelmente afetados pela precisão do paquímetro utilizado (0,02mm) como também pela forma de apoio fornecida pelas hastes de pequenos pregos, os resultados máximos encontrados, próximos à medula, para a deformação e a tensão radiais de tração ($2.345\mu\epsilon$ e $24,6\text{kg/cm}^2$, respectivamente) estão em concordância com a bibliografia utilizada.

O valor zero para a deformação periférica pode ser considerado como tendo sido determinado ao desprezar-se o possível erro de precisão de leitura do instrumento de medição.

Anexos

Anexo 1
Caracterização da Madeira
(Propriedades e Análises Estatísticas)

TABELA A1.1 VALORES DAS DENSIDADES VERDE, SATURADA, SECA E BÁSICA DA MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* HILL. EX MAIDEN DETERMINADAS POR AMOSTRA.

Número da Amostra ⁽¹⁾	Densidade (g/cm ³)			
	Verde	Saturada	Seca	Básica
1-25-1A	0,96	1,15	0,50	0,41
1-25-2A	0,98	1,14	0,49	0,40
1-25-3A	0,99	1,15	0,50	0,41
2-60-1A	0,97	1,15	0,51	0,42
2-60-2A	0,81	1,14	0,47	0,40
2-60-3A	0,78	1,10	0,46	0,39
2-34-1J	0,78	1,13	0,46	0,38
2-34-2J	0,73	1,13	0,45	0,38
2-34-3J	0,68	1,13	0,43	0,38
3-36-1A	0,99	1,15	0,50	0,42
3-36-2A	1,02	1,19	0,50	0,43
3-36-3A	0,98	1,15	0,47	0,40
3-30-1J	0,72	1,11	0,41	0,36
3-30-2J	0,66	1,08	0,42	0,38
3-30-3J	0,63	1,07	0,41	0,37
4-68-1A	0,98	1,16	0,53	0,44
4-68-2A	1,00	1,17	0,55	0,46
4-68-3A	0,97	1,15	0,50	0,41
4-40-1J	0,94	1,13	0,47	0,37
4-40-2J	0,92	1,13	0,46	0,38
4-40-3J	0,86	1,13	0,44	0,37
5-65-1A	0,95	1,14	0,45	0,38
5-65-2A	0,91	1,12	0,44	0,37
5-65-3A	0,94	1,13	0,47	0,38
5-21-1J	0,83	1,12	0,41	0,33
5-21-2J	0,82	1,12	0,39	0,33
5-21-3J	0,63	1,11	0,37	0,32

A = Lenho adulto; J = Lenho juvenil

(1) De acordo com o item 3.2.4.

TABELA A1.2 COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DOS COEFICIENTES DE VARIAÇÃO DETERMINADOS PARA AS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE *Eucalyptus grandis* HILL. EX MAIDEN COM AQUELES REPORTADOS EM REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Propriedade	Coeficiente de Variação (%)					
	<i>Eucalyptus grandis</i> Hill. ex Maiden ⁽¹⁾	U.S. FOREST PRODUCTS LABORATORY ⁽²⁾	LISBÓA (s.d.) ⁽³⁾	BHAT et al. (1990) ⁽⁴⁾	STÖHR & MACKAY (1983) ⁽⁴⁾	
Básica	8	10	9	2-9	-	
Densidade	Seca	9	10	-	-	3-9
	Saturada	2	10	-	-	-
	Verde	14	10	-	-	-
Flexão Estática	MOR	15	16	15	-	-
	MOE	8	22	14	-	-
Compressão	Paralela	18	18	16	-	-
	Perpendicular	23	28	27	-	-
Dureza	Paralela	32	17	18	-	-
	Perpendicular	33	20	19	-	-
Tração Perpendicular	12	25	28	-	-	
Cisalhamento	15	14	17	-	-	
Fendilhamento	22	-	-	-	-	

Todos os valores apresentados são baseados em madeiras livres de defeitos e em propriedades mecânicas na condição verde.

Valores obtidos no presente experimento (1); médios (2); médios para madeiras da região amazônica (3); e para *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden (4).

TABELA A1.3 NÚMERO DE ÁRVORES A SEREM AMOSTRADAS AO ACASO PARA ESTIMATIVA DOS VALORES MÉDIOS DAS DENSIDADES DE *Eucalyptus grandis* HILL. EX MAIDEN, CONSIDERANDO DIFERENTES INTERVALOS NOS NÍVEIS DE 98 E 95%.

Nível de Confiança (%)	Intervalo de Confiança da Média -P (%) ⁽¹⁾	Número de Árvores (n) ⁽¹⁾			
		Densidade			
		Verde	Saturada	Seca	Básica
98	± 2	343	11	116	91
	± 5	55	2	19	15
	± 10	14	-	5	4
	± 15	6	-	2	2
95	± 2	238	7	80	63
	± 5	38	1	13	10
	± 10	9	-	3	3
	± 15	4	-	1	1

(1) $n = \frac{t^2 \cdot s^2}{(\bar{x} - p)^2}$ (Item 3.3.1), baseado nos resultados obtidos para cinco árvores selecionadas ao acaso, com três amostras ensaiadas para uma delas e quatro para as demais.

TABELA A1.4 VALORES DA DENSIDADE BÁSICA MÉDIA POR ÁRVORE, CORRESPONDENTES DESVIOS PADRÃO E COEFICIENTES DE VARIAÇÃO.

Número da Árvore	Número de Amostras Ensaçadas	Densidade Básica Média (g/cm ³)	Desvio Padrão (g/cm ³)	Coefficiente de Variação (%)
1	3	0,41	0,006	1
2	6	0,39	0,016	4
3	6	0,39	0,028	7
4	6	0,40	0,038	9
5	6	0,35	0,028	8

TABELA A1.5 ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS VALORES DA DENSIDADE BÁSICA MÉDIA DETERMINADA PARA CADA ÁRVORE.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrados Médios	F	Nível de Significância (%)
Entre Árvores	4	0,0102721	0,002568	3,48 ^{NS}	2,40
Dentro da Árvore	22	0,0162448	0,0007384		
Total	26				

Análise de variância realizada utilizando o pacote estatístico "STATGRAPHICS".

NS - Não significativo ao nível de 1% de probabilidade ($F_{\text{calc.}} = 3,48 < F_{\text{tab.}}(4; 22; 0,01) = 4,31$).

TABELA A1.6 VALORES DA DENSIDADE VERDE MÉDIA POR ÁRVORE, CORRESPONDENTES DESVIOS PADRÃO E COEFICIENTES DE VARIAÇÃO.

Número da Árvore	Número de Amostras Ensaçadas	Densidade Verde (g/cm ³)	Desvio Padrão (g/cm ³)	Coefficiente de Variação (%)
1	3	0,98	0,015	2
2	6	0,79	0,099	13
3	6	0,83	0,182	22
4	6	0,95	0,051	5
5	6	0,85	0,119	14

TABELA A1.7 ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS VALORES DA DENSIDADE VERDE MÉDIA DETERMINADA PARA CADA ÁRVORE.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrados Médios	F	Nível de Significância (%)
Entre árvores	4	0,1159000	0,0289750	2,14 ^{NS}	11,03
Dentro da árvore	22	0,2983667	0,0135621		
Total	26				

Análise de variância realizada utilizando o pacote estatístico "STATGRAPHICS".

NS - Não significativo ao nível de 1% de probabilidade ($F_{\text{calc.}} = 2,14 < F_{\text{tab.}}(4; 22; 0,01) = 4,31$).

TABELA A1.8 NÚMERO DE ÁRVORES A SEREM AMOSTRADAS AO ACASO PARA ESTIMATIVA DOS VALORES MÉDIOS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE *Eucalyptus grandis* HILL. EX MAIDEN, CONSIDERANDO-SE DIFERENTES INTERVALOS DE CONFIANÇA NOS DE 98 E 95%.

Nível de Confiança (%)	Intervalo de Confiança da Média -p (%) ⁽¹⁾	Número de Árvores por Propriedade (n) ⁽¹⁾								
		Flexão Estática		Compressão		Tração	Dureza		Cisalhamento	Fendilhamento
		MOR	MOE	Paralela	Perpendicular	Perpendicular	Paralela	Perpendicular		
98	±2,0	468	124	676	1.008	276	1.995	2.230	459	941
	±5,0	75	20	108	161	44	319	357	74	151
	±10,0	19	5	27	40	11	80	89	18	38
	±15,0	8	2	12	18	5	35	40	8	17
Balanço ⁽²⁾	-	+ 3	- 3	+ 7	+ 13	0	+ 30	+ 35	+ 3	+ 13
95	±2,0	301	80	435	648	177	1.283	1.434	295	587
	±5,0	48	13	70	104	28	205	229	47	94
	±10,0	12	3	17	26	7	51	57	12	23
	±15,0	5	1	8	12	3	23	25	5	10
Balanço ⁽²⁾	-	0	- 4	+ 3	+ 7	- 2	+ 18	+ 20	0	+ 5

(1) $n = \frac{t^2 \cdot s^2}{(x \cdot p^2)}$ (Item 3.3.1), considerando-se o ensaio de duas amostras por árvore; (2) Os números positivos indicam a quantidade de árvores (duas amostras por árvore) que necessitam ser ensaiadas com fins à obtenção de um intervalo de confiança da média igual a 15%, nos níveis de confiança de 98 e 95%, respectivamente. Os números negativos indicam a quantidade de árvores ensaiadas em excesso sob as mesmas condições.

TABELA A1.9 VALORES MÍNIMOS E MÁXIMOS DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE *Eucalyptus grandis* HILL. EX MAIDEN, PUBLICADOS POR HILLIS & BROWN (1978).

Teor de Umidade	Propriedades Mecânicas ⁽¹⁾					Dureza Perpendicular às Fibras (kg)
	Flexão Estática		Máxima Resistência			
	Módulo de Ruptura (kg/cm ²)	Módulo de Elasticidade (1.000kg/cm ²)	Compressão Paralela às Fibras (kg/cm ²)	Cisalhamento (kg/cm ²)	Fendilhamento (kg/cm)	
Verde	790-880	130-140	390-440	90-100	60-70	520-570
12%	1.130-1.260	160-180	630-700	130-140	80-90	730-820

(1) Valores aproximados.

Anexo 2

Deformações de Crescimento Longitudinais
(Resultados Experimentais - Itens 3.2.2 e 3.3.2.2)

E = Leitura obtida no relógio comparador nº 1, colocado na haste vertical nº 1 do aparelho de medição (mm);

F = Leitura obtida no relógio comparador nº 2, colocado na haste vertical nº 2 do aparelho de medição (mm);

H = Altura do relógio nº 1 ao longo da haste vertical nº 1 do aparelho de medição (mm); e

I = Altura do relógio nº 2 ao longo da haste vertical nº 2 do aparelho de medição (mm);

– Os sufixos “t”, “p” e “s” referem-se às medições obtidas na tora, prancha e no sarrafo, respectivamente.

Defeitos nos sarrafos:

1. nó pequeno com diâmetro menor ou aproximadamente igual a 10,0mm;
2. nó grande com diâmetro bem maior que 10,0mm;
3. nó que ocupa toda a seção transversal do sarrafo;
4. racha nos extremos do sarrafo;
5. bolsa de goma ou kino; e
6. esmoado.

TABELA A2.1 MEDIDAS OBTIDAS NO APARELHO DE MEDIÇÃO - TORA 1

Número do Sarrafo	Medidas Obtidas no Aparelho de Medição (mm)								Defeito
	Et	Ft	Ht	It	Ep	Fp	Es	Fs	
1	26,745	45,813	317,54	307,60			25,549	45,161	1
14	24,890	47,652	315,60	308,00	26,672	44,485	33,720	37,120	2
15	25,480	47,288	292,96	283,22	27,929	44,160	33,505	38,309	2
16	25,520	46,923	268,60	258,98	27,949	44,311	30,952	41,222	2
17	23,779	47,505	264,00	254,20	27,442	44,279	35,482	36,668	2
18	24,062	47,311	239,54	230,10	26,571	45,670	30,663	42,835	2
22	23,800	45,580	142,94	134,70	32,190	38,340	31,670	39,000	2
23	23,660	44,849	118,68	111,38	33,485	36,245	25,340	44,183	2
24	23,559	44,475	95,32	86,76	35,519	33,740	32,130	36,250	2
25	23,552	44,069	71,28	61,88	41,369	25,555	31,574	35,920	
26	23,403	44,100	45,28	38,86	28,172	38,412	30,272	35,652	
27	29,868	42,879	317,06	306,90	39,871	31,870	36,345	34,734	
32	29,609	40,461	216,20	205,70	39,380	31,169	37,060	34,691	2
33	29,582	40,147	192,06	183,14	40,272	29,982	28,144	43,471	
38	29,159	38,002	71,06	61,78	41,199	25,460	26,485	40,431	2
39	29,528	37,289	46,74	39,62	32,172	33,520	27,660	38,260	2
40	26,605	41,080	42,42	46,00	36,000	30,675	35,245	31,590	
41	26,739	41,933	65,70	69,50			31,875	36,305	
42	27,477	42,362	89,48	93,96			36,798	33,040	
43	27,768	41,569	103,94	117,62	38,703	30,440	30,572	39,319	
44	28,140	41,460	139,96	141,54			32,330	38,480	1
45	26,838	44,220	236,40	237,50			31,468	42,337	2
46	26,389	45,048	260,28	261,06			31,541	41,499	2
47	26,270	46,211	284,82	285,10			29,161	43,825	2
48	25,549	47,400	308,68	308,20			23,619	49,021	2
49	25,405	48,880	313,06	313,62			35,395	37,670	2
50	26,738	39,429	42,64	47,42	35,753	29,148	27,035	38,241	2
51	27,219	40,630	66,06	70,50			24,817	42,555	2
52	27,621	40,882	89,76	94,10			37,680	30,871	2
53	27,979	40,965	114,08	117,18	38,492	30,308	21,470	48,078	2
54	28,482	40,820	139,80	141,30			33,850	36,500	2
55	26,879	43,575	236,58	236,86	31,393	40,992	36,575	36,091	2
56	26,723	44,222	261,08	260,30	31,971	40,181	41,090	31,250	2
57	26,528	45,381	285,78	283,82	33,715	38,657	37,569	34,855	2
58	25,792	46,739	290,70	289,60	35,071	37,121	39,279	32,831	2
59	25,618	48,200	313,24	313,70	37,131	35,441	30,859	41,700	
60	27,713	40,591	42,48	46,80	36,202	30,990	39,375	27,942	
61	27,971	41,682	66,66	70,70			28,570	40,420	
62	28,641	41,471	89,58	94,42			30,890	39,030	2
63	28,842	40,462	114,56	118,10	38,413	30,512	35,930	33,580	2
64	29,300	40,775	139,92	142,16			31,915	39,042	2
66	27,448	43,730	260,32	261,28			41,535	30,782	
67	27,552	45,235	285,28	285,28			41,865	31,088	1
68	27,140	46,522	309,22	308,90			34,805	38,302	2
69	27,060	47,865	313,40	313,74			39,595	33,945	2

TABELA A2.2 MEDIDAS OBTIDAS NO APARELHO DE MEDIÇÃO - TORA 2

Número do Sarrafo	Medidas Obtidas no Aparelho de Medição (mm)								Defeito
	Et	Ft	Ht	It	Ep	Fp	Es	Fs	
2	41,527	11,033	178,90	178,76			5,000	47,357	
3	35,365	18,652	310,00	320,60			23,750	29,540	
4	35,468	19,665	286,18	298,62			17,165	38,313	
5	35,600	21,250	261,84	275,12			22,510	31,001	2
8	34,962	24,488	189,06	200,80			22,420	41,739	2
9	34,991	25,340	165,00	177,70			39,970	24,455	2
10	34,631	26,360	140,58	153,76			34,382	29,774	2
11	34,360	26,949	116,62	129,36			16,592	46,640	2
12	34,062	27,758	91,30	105,18			38,899	23,752	23
13	33,492	28,227	68,68	82,10			19,415	42,315	2
14	33,400	29,582	45,80	56,78			14,525	48,105	25
16	41,209	12,182	154,56	155,78			13,381	39,700	
17	36,415	18,755	309,16	322,00			17,500	37,000	
20	35,678	22,079	236,88	248,78	24,43	34,63	24,402	35,835	2
23	35,135	24,901	164,00	177,42			29,980	33,605	2
24	34,565	25,998	140,64	154,18			30,990	32,318	2
25	34,398	26,299	116,20	129,32			34,720	27,530	1
26	34,000	27,116	92,32	104,42			26,478	35,339	2
27	33,435	27,900	69,10	81,32			30,030	31,448	2
28	33,418	29,593	44,94	56,52			23,500	39,340	5
30	42,115	9,903	202,30	204,82			19,532	32,292	2
31	37,613	15,270	309,28	322,04			23,300	28,725	2
32	37,980	15,916	285,96	298,44			15,268	38,435	2
33	38,000	16,205	260,82	273,78			15,690	40,022	2
34	38,176	17,589	236,76	248,62	23,725	33,028	27,111	31,300	
37	37,839	21,265	164,24	177,90			14,545	47,882	2
38	38,120	22,158	140,50	153,60			18,265	44,590	2
39	37,808	23,009	116,56	128,90			19,535	43,353	2
40	37,240	24,172	92,16	105,02			24,030	38,670	2
41	36,830	25,050	68,72	80,52			24,100	38,025	
42	38,612	24,965	44,64	57,52			20,487	42,607	15
53	41,098	11,743	329,30	329,22	21,629	30,303	18,725	33,820	
54	39,432	12,903	305,06	305,40	21,265	30,735	23,990	27,538	2
55	38,848	14,666	281,54	281,00	22,674	30,89	18,464	34,675	1
56	38,551	15,861	257,58	256,54	24,305	30,541	20,295	34,884	2
57	37,602	17,682	233,72	233,00	24,282	31,821	26,655	30,660	2
58	34,715	22,396	137,00	136,04	27,787	34,938	24,885	34,405	2
59	34,075	23,269	114,44	111,18	23,524	35,751	25,330	33,205	1
60	33,355	23,731	90,34	87,56	23,469	35,67	20,505	37,190	
61	33,082	24,290	68,10	63,96			18,505	38,855	
62	33,512	20,461	193,54	211,42			21,770	31,640	
63	37,325	17,315	307,58	304,42			17,755	35,972	2
64	36,578	18,971	284,16	281,08			16,520	39,460	2
65	35,610	20,800	260,32	255,30			18,335	39,270	2
67	32,469	25,989	139,88	136,06			29,278	31,545	24
69	30,720	27,140	93,30	85,76			24,505	33,835	24
70	30,838	27,635	68,56	63,04			16,462	42,000	24

TABELA A2.3 MEDIDAS OBTIDAS NO APARELHO DE MEDIÇÃO - TORA 3

Número do Sarrafo	Medidas Obtidas no Aparelho de Medição (mm)								Defeito
	Et	Ft	Ht	It	Ep	Fp	Es	Fs	
11	15,320	40,349	67,42	65,44			23,450	30,312	1
12	15,952	39,932	43,86	41,86			23,665	29,822	14
13	18,272	41,210	307,70	309,00			25,846	31,522	
14	17,772	40,555	284,80	284,68			24,389	32,650	
18	18,930	36,688	188,46	188,44			18,061	38,215	23
20	20,110	35,432	140,00	139,64			30,901	24,612	2
21	21,220	35,172	116,02	113,28			24,322	31,071	1
22	21,825	34,252	92,20	89,46			21,612	32,659	
23	22,935	33,382	65,66	67,64			24,925	29,735	
24	23,621	33,088	43,66	42,36			19,581	34,895	
28	27,800	29,719	236,30	234,34			26,147	31,611	23
29	27,850	28,942	212,00	210,10			31,810	25,961	23
30	27,432	28,108	187,48	186,30			23,862	32,913	
34	30,000	24,965	92,02	89,60			25,593	28,050	2
35	30,830	24,576	67,74	66,76			32,789	20,903	
36	32,010	24,049	44,12	41,66			29,101	24,907	
37	44,092	15,820	73,64	76,10			28,489	29,285	23
38	43,143	15,570	97,38	99,52			18,739	38,531	23
42	38,819	17,133	264,88	268,14			30,050	25,592	23
43	38,461	17,582	288,76	291,52			29,779	25,308	23
44	38,767	18,638	312,70	317,46			22,113	33,140	2
45	35,288	20,980	191,58	194,28			18,893	35,630	
46	34,851	21,052	194,04	197,82			27,632	25,929	
51	35,309	21,860	162,72	174,16			22,645	34,601	23
52	33,065	21,910	259,52	269,32			25,109	29,519	2
53	33,139	22,832	283,46	294,82			28,203	26,491	2
54	33,047	24,025	306,80	318,52			24,392	30,623	2
55	34,225	22,346	215,84	218,34			24,999	30,150	23
56	34,142	22,019	217,44	222,04			29,411	24,576	
57	39,440	18,525	75,00	76,08			23,745	32,248	1
58	37,855	19,504	96,72	99,32			22,822	33,129	1
59	37,123	19,072	120,64	123,40			19,315	35,893	2
60	36,560	19,088	144,80	147,46			22,887	32,073	2
61	36,132	19,490	169,46	171,44			17,469	38,272	2
62	35,810	20,793	264,68	269,24			20,518	35,434	23
63	35,429	21,506	288,84	292,94			21,502	33,927	1
64	35,675	21,662	312,04	316,54			18,519	36,521	2
65	35,928	20,165	167,26	170,28			16,990	37,141	
66	35,719	20,782	172,00	175,54			17,408	36,779	

TABELA A2.4 MEDIDAS OBTIDAS NO APARELHO DE MEDIÇÃO - TORA 4

Número do Sarrafo	Medidas Obtidas no Aparelho de Medição (mm)								Defeito
	Et	Ft	Ht	It	Ep	Fp	Es	Fs	
1	35,669	39,182	311,00	297,20			37,535	36,533	
2	35,069	37,062	286,26	274,42			26,406	46,430	1
3	34,618	37,000	262,18	248,96			26,010	46,378	2
4	35,173	36,333	238,06	223,74			30,655	41,978	2
9	32,975	32,648	117,96	104,48			22,290	45,638	2
10	32,700	31,751	95,36	80,48			26,415	39,405	2
11	32,564	32,035	70,70	56,08			27,620	38,470	1
12	32,000	31,688	46,98	31,74			18,545	45,065	1
13	38,092	36,418	312,80	297,50			33,152	40,421	1
16	36,998	33,905	239,00	223,00			29,405	43,130	24
17	36,828	33,208	213,74	199,90			27,600	44,945	2
19	35,662	31,635	167,00	151,70			24,708	47,125	24
20	35,135	30,927	142,72	126,66			24,355	45,920	2
21	35,121	30,634	119,20	102,54			31,372	37,700	2
22	35,800	30,218	94,70	78,52			24,475	42,630	25
23	35,690	29,971	71,34	54,32			22,940	44,060	2
24	35,788	29,420	46,00	30,66			22,760	42,305	2
25	41,141	32,412	311,10	296,50			38,915	34,025	1
26	40,802	31,385	287,22	273,50			32,550	39,800	2
27	40,492	31,172	262,30	248,18			32,060	39,635	2
28	40,239	30,692	238,00	224,54			27,722	44,680	1
29	39,490	29,925	214,30	200,00			38,460	33,245	2
31	39,241	28,111	166,50	152,14			27,340	43,265	24
32	39,040	27,477	142,66	127,62			26,162	42,700	2
33	38,966	27,501	119,20	104,28			33,200	35,630	245
37	41,048	32,544	326,00	320,50			26,985	45,615	5
38	39,975	32,150	302,94	296,74			31,855	39,815	1
39	40,619	31,601	279,40	271,10			31,765	41,045	1
40	39,905	30,823	254,96	247,46			31,255	41,188	
41	39,637	29,802	230,84	222,60			25,895	46,275	2
44	39,816	28,090	86,16	78,54			39,478	29,935	
45	38,715	28,424	63,00	55,00			27,190	39,885	
46	31,753	33,641	37,84	31,18			29,285	35,162	
47	43,029	29,855	327,36	318,30			33,660	38,182	
48	42,698	29,648	303,60	293,92			37,490	34,430	2
49	42,132	29,397	278,96	270,28			39,550	33,515	2
52	33,902	32,948	134,08	125,00			21,657	48,572	1
53	33,928	33,589	110,00	103,10			27,605	42,330	1
54	33,550	33,793	86,32	83,00			26,150	41,800	
57	44,782	30,391	329,20	320,70			29,170	44,040	
58	43,398	30,081	305,24	297,74			31,070	43,115	2
59	42,834	29,042	281,16	273,40			25,295	46,990	25
60	43,329	27,942	254,80	248,50			32,610	39,965	2
61	43,023	27,308	230,70	224,30			31,610	40,770	2
62	43,188	25,974	134,70	127,10			38,748	32,355	2
63	42,850	26,239	111,00	102,52			40,015	30,310	2
64	41,428	26,176	88,24	79,50			27,482	40,562	
65	41,360	26,308	63,44	54,82			33,718	34,095	
66	40,475	26,118	40,00	31,64			38,610	27,545	2
67	35,425	36,218	231,64	225,46			29,025	43,660	1
68	35,569	36,279	256,16	249,64			33,962	37,000	
70	39,628	26,677	150,50	140,00			28,832	39,355	25
71	37,399	27,305	133,54	136,18			18,980	46,010	2
72	37,416	26,130	122,76	122,76			29,112	34,162	

TABELA A2.5 MEDIDAS OBTIDAS NO APARELHO DE MEDIÇÃO - TORA 5

Número do Sarrafo	Medidas Obtidas no Aparelho de Medição (mm)								Defeito
	Et	Ft	Ht	It	Ep	Fp	Es	Fs	
1	30,142	24,561	32,68	23,56			18,429	35,472	
2	27,578	29,945	326,18	318,34			21,341	35,259	
3	27,853	29,743	302,06	293,64			25,530	31,717	1
4	28,784	29,545	277,40	269,74			26,949	31,690	2
5	30,065	29,632	253,86	245,52			24,585	36,112	24
6	31,599	27,982	229,64	220,60			22,101	39,238	2
7	32,924	27,486	206,78	196,68			34,732	28,115	2
10	35,292	26,813	133,42	124,12			33,512	30,609	2
11	37,670	26,108	108,76	100,00			20,249	44,494	1
12	38,728	26,074	85,70	75,60			20,699	44,429	1
13	38,968	26,178	62,56	52,04			27,811	37,062	1
14	41,657	24,854	38,00	28,84			27,390	38,449	1
16	25,082	30,018	326,18	317,64			27,718	26,903	1
17	26,232	29,499	302,06	293,60			22,682	32,432	
18	27,463	30,219	277,28	269,62			21,459	36,205	2
19	28,492	30,221	253,82	245,76			23,768	35,449	2
20	29,483	30,183	229,22	220,78			24,561	35,919	2
21	30,812	29,609	206,00	196,82			24,731	37,448	
25	36,608	28,022	108,78	99,38			27,565	37,539	1
26	37,378	27,495	84,74	76,36			24,062	40,759	
27	38,213	26,219	60,80	53,00			33,739	30,357	1
28	40,586	26,712	37,20	29,00			25,451	41,151	156
29	33,749	21,872	35,70	26,62			17,659	36,888	2
30	25,550	31,919	315,68	308,20			23,339	33,209	2
31	26,867	31,440	301,86	293,02			25,551	31,462	2
32	28,088	31,025	277,72	269,28			25,442	33,962	2
33	28,838	30,432	253,06	244,72			23,512	36,921	
37	33,717	29,122	156,56	148,36			29,020	37,728	2
38	35,180	29,056	133,00	124,72			30,649	36,185	2
39	36,389	28,526	108,58	100,12			24,611	41,738	1
40	37,236	28,388	85,46	75,88			31,522	34,625	1
42	39,421	27,842	37,42	28,24			26,269	40,532	5
43	34,782	32,102	325,16	331,36			27,471	37,812	1
44	33,785	30,458	300,76	306,00			27,312	36,762	1
45	33,450	30,038	276,10	281,78	34,973	30,000	25,540	38,118	2
46	33,769	30,290	251,92	257,24	36,749	29,018	24,140	41,242	2
47	32,879	30,362	227,46	233,42	37,682	27,291	28,700	36,758	2
48	32,882	30,202	204,08	210,10	39,169	25,566	27,822	38,243	2
49	31,738	29,948	108,00	113,60	42,452	19,942	27,100	35,317	1
50	32,069	29,000	86,00	89,40	42,241	19,334	27,829	33,349	1
51	33,058	29,100	61,60	65,78	42,039	20,133	27,384	34,581	1
52	33,253	27,818	35,70	42,00	41,009	19,813	20,891	39,608	1
54	36,158	29,830	291,30	297,82			30,311	35,228	1
55	36,592	28,061	276,08	281,92			30,679	33,978	
56	36,926	28,499	253,44	258,40			34,379	31,931	
57	36,146	28,902	229,30	233,34			26,629	40,305	24
60	35,411	27,368	84,04	89,54			22,868	40,138	
61	35,778	26,891	60,46	65,10			34,198	28,429	
62	36,311	25,558	36,14	41,40			27,609	32,735	
63	35,699	29,474	313,50	319,12			33,512	30,501	1
64	34,519	28,369	304,74	301,36			19,010	43,648	1
65	34,225	29,016	275,86	280,56			30,391	33,192	
66	34,961	28,903	252,16	256,18			19,769	45,260	2
71	33,809	26,779	60,82	63,80			30,748	29,739	2
72	34,799	25,575	36,12	39,62			21,500	38,159	1
76	38,750	26,385	241,30	239,34			30,211	36,737	2
77	40,042	27,081	272,84	275,14			23,660	43,778	2
78	40,498	26,431	298,56	299,00			36,519	29,509	2

Anexo 3
Deformações de Crescimento Longitudinais
(Reprodutibilidade de Medições)

Para verificação da reprodutibilidade de medições realizadas com os relógios comparadores, acoplados no aparelho de medição fabricado, utilizou-se uma “coluna” ou “cilindro” de aferição de emprego similar pela WEG Motores S.A., conforme ilustrado na Figura 49 - Item 3.3.2.1.

Na coluna de aferição foi marcada uma linha vertical de 0,80mm de espessura, ao longo da sua altura, utilizando-se um pincel atômico e um torno.

Nesta linha vertical foram assinalados pontos de contacto para o fuso do relógio comparador, numerados de 1 a 17, a partir da base inferior da coluna.

O ponto 1 foi locado a 10,0mm de altura (altura de medição dos comprimentos dos sarrafos dentro da prancha), o ponto 2 a 15,0mm (altura de medição do comprimento dos sarrafos isolados, uma vez que os mesmos são colocados dentro de uma cantoneira para correção de empenamentos - Item 3.3.2.2), o ponto 3 a 20,0mm e os demais, a partir do nº 3 até o nº 17, eqüidistantes de 20,0mm.

A coluna foi colocada sobre a plataforma do aparelho de medição a uma distância aproximada de 60,0mm de uma de suas hastes e, posteriormente, da outra.

Observações visuais indicaram que a coluna apoiou-se perfeitamente sobre a plataforma do aparelho e os fusos dos relógios comparadores deslocaram-se exatamente sobre a linha vertical traçada durante a movimentação dos mesmos através de suas peças de fixação, ao longo das canaletas das hastes verticais (Figuras 47 e 48).

Devido à coluna de aferição ser cilíndrica e a linha traçada ter 0,80mm de espessura, a observação visual não permitiu verificar se ocorreu variação transversal do ponto de contacto do fuso do relógio comparador através desta espessura. Considerando-se que esta variação tenha ocorrido, o fuso foi comprimido a menor ou a maior de 0,002mm, conforme cálculos efetuados. Sendo esta diferença menor do que a precisão dos relógios (0,01mm), a mesma não será considerada.

Em cada um dos pontos numerados de 1 a 17 realizaram-se três leituras para

verificação da reprodutibilidade de medições nos relógios comparadores n^{os} 1 e 2, colocados nas respectivas hastes (1 e 2) do aparelho, obtendo-se os resultados apresentados na Tabela A3.1.

A variação da temperatura e da umidade relativa do ar, durante a obtenção de medidas variaram apenas em 0,5°C e 0,5%, respectivamente.

TABELA A3.1 REPRODUTIBILIDADE DE MEDIÇÕES OBTIDAS NO APARELHO DE DETERMINAÇÃO DE DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS.

Ponto de Medição		Relógio Comparador N ^o 1			Relógio Comparador N ^o 2		
N ^o	Altura (mm)	Leituras (mm)			Leituras (mm)		
		1	2	3	1	2	3
1	10	25,480	25,481	25,482	24,682	24,679	24,680
2	15	25,490	25,490	25,486	24,680	24,679	24,680
3	20	25,499	25,496	25,495	24,681	24,679	24,678
4	40	25,544	25,542	25,541	24,678	24,671	24,678
5	60	25,569	25,570	25,570	24,655	24,653	24,654
6	80	25,604	25,600	25,601	24,619	24,617	24,615
7	100	25,633	25,632	25,632	24,611	24,611	24,610
8	120	25,636	25,635	25,637	24,612	24,602	24,605
9	140	25,656	25,656	25,654	24,621	24,620	24,626
10	160	25,659	25,665	25,659	24,639	24,636	24,646
11	180	25,685	25,679	25,685	24,652	24,652	24,650
12	200	25,701	25,695	25,699	24,658	24,652	24,654
13	220	25,720	25,721	25,718	24,665	24,663	24,665
14	240	25,729	25,731	25,729	24,681	24,678	24,681
15	260	25,750	25,750	25,750	24,759	24,749	24,755
16	280	25,773	25,769	25,769	24,922	24,925	24,927
17	300	25,801	25,800	25,800	25,069	25,070	25,060

A Tabela A3.2 analisa os dados da Tabela A3.1, considerando-se a soma de leituras dos relógios comparadores n^{os} 1 e 2 de maneira similar à adotada na obtenção dos valores de $G = E + F$, utilizados nas fórmulas de determinação dos comprimentos dos sarrafos (Item 3.3.2.2).

TABELA A3.2 REPRODUTIBILIDADE DE MEDIÇÕES: DIFERENÇAS MÁXIMAS E MÍNIMAS ENTRE AS LEITURAS APRESENTADAS NA TABELA A3.1.

Ponto de Medição		Leituras nos Relógios Comparadores (mm)						Diferença Máxima (mm) D1 = G2 - G1	Diferença de Leituras em Relação ao Ponto N° 2 (mm)	
N°	Altura (mm)	Mínimas			Máximas				Máxima D2 = 50,165 - G2	Mínima D3 = 50,170 - G1
		n° 1 E1	n° 2 F1	Soma G1 = E1 + F1	n° 1 E2	n° 2 F2	Soma G2 = E2 + F2			
1	10,0	25,480	24,679	50,159	25,482	24,682	50,164	0,005	+0,001	+0,011
2	15,0	25,486	24,679	50,165	25,490	24,680	50,170	0,005	-0,005	+0,005
3	20,0	25,495	24,678	50,173	25,499	24,681	50,180	0,007	-0,015	-0,003
4	40,0	25,541	24,671	50,212	25,544	24,678	50,222	0,010	-0,057	-0,042
5	60,0	25,569	24,653	50,222	25,570	24,655	50,225	0,003	-0,060	-0,052
6	80,0	25,600	24,615	50,215	25,604	24,619	50,223	0,008	-0,058	-0,045
7	100,0	25,632	24,610	50,242	25,633	24,611	50,244	0,002	-0,079	-0,072
8	120,0	25,635	24,602	50,237	25,637	24,612	50,249	0,012	-0,084	-0,067
9	140,0	25,654	24,620	50,274	25,656	24,626	50,282	0,008	-0,117	-0,104
10	160,0	25,659	24,636	50,295	25,665	24,646	50,311	0,016	-0,146	-0,125
11	180,0	25,679	24,650	50,329	25,685	24,652	50,337	0,008	-0,172	-0,159
12	200,0	25,695	24,652	50,347	25,701	24,658	50,359	0,012	-0,194	-0,177
13	220,0	25,718	24,663	50,381	25,721	24,665	50,386	0,005	-0,221	-0,211
14	240,0	25,729	24,678	50,407	25,731	24,681	50,412	0,005	-0,247	-0,237
15	260,0	25,750	24,749	50,499	25,750	24,759	50,509	0,010	-0,344	-0,329
16	280,0	25,769	24,922	50,691	25,773	24,927	50,700	0,009	-0,535	-0,521
17	300,0	25,800	25,060	50,860	25,801	25,070	50,871	0,011	-0,706	-0,690

As diferenças máximas entre as leituras realizadas ($D_1 = G_2 - G_1$) nas mesmas alturas (pontos) das hastes do aparelho de medição, encontram-se dentro da faixa de precisão dos relógios (0,01mm), comprovando a eficiência do aparelho, quando utilizado nesta situação. Este é o caso da obtenção dos valores dos comprimentos dos sarrafos dentro da prancha (S_p), à altura de 10,0mm e dos sarrafos isolados (S_s), a aproximadamente 15,0mm.

Entretanto, quando da determinação dos comprimentos dos sarrafos dentro da tora (S_t), as leituras nos relógios comparadores n° 1 e 2 são realizadas a diferentes alturas (Figura 52) e, posteriormente, correlacionadas com as do ponto 2, onde se determinam os comprimentos dos sarrafos isolados através da fórmula $\varepsilon_{ts} = \left[\frac{(S_t - S_s)}{S_s} \right] \times 10^6$ (Item 3.3.2.2).

Nesta situação, as diferenças entre as leituras obtidas a diferentes alturas devem ser referidas aos valores mínimos e máximos do ponto 2, conforme apresentado nas duas últimas colunas da Tabela A3.2. As diferenças determinadas (D_2 e D_3) encontram-se, na sua grande maioria, acima da precisão desejada de 0,01mm, indicando que as hastes do aparelho não se encontram

perfeitamente alinhadas.

Como as leituras do ponto 2 são as mais importantes nos estudos propostos e encontram-se dentro da precisão desejada, decidiu-se por corrigir todos os outros valores referentes, a diferentes alturas, em função da média no referido ponto 2, o que equivale considerar que todas as medições foram realizadas neste ponto.

A referida correção, ou ajustamento de valores, foi conseguida correlacionando as alturas de medições com as diferenças individuais entre a média do ponto 2 e cada leitura obtida a diferentes alturas (Tabela A3.3). Este procedimento, quando adotado para os relógios (ou as hastes do aparelho) nº 1 e 2 separadamente, atende à forma de execução do experimento, onde o comprimento de um mesmo sarrafo dentro da tora é determinado através de medições realizadas a diversas alturas. Nesta análise, o ponto nº 1 não é considerado, uma vez que nenhuma leitura de S_1 foi realizada neste local.

TABELA A3.3 DIFERENÇA ENTRE A MÉDIA DAS MEDIÇÕES OBTIDAS NO APARELHO DE DETERMINAÇÃO DE DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS A 15,0mm (ALTURA DE MEDIÇÃO DOS SARRAFOS ISOLADAMENTE) E AS DEMAIS MEDIDAS REALIZADAS A DIFERENTES ALTURAS.

Ponto de Medição		Relógio Comparador N° 1 (Leit. Média no Ponto 2=25,489 mm)			Relógio Comparador N° 2 (Leit. Média no Ponto 2=24,680 mm)		
N°	Altura (mm)	Número de Leituras (mm)			Número de Leituras (mm)		
		1	2	3	1	2	3
2	15	-0,001	-0,001	0,003	0,000	0,001	0,000
3	20	-0,010	-0,007	-0,006	-0,001	0,001	0,002
4	40	-0,055	-0,053	-0,052	0,002	0,009	0,002
5	60	-0,080	-0,081	-0,081	0,025	0,027	0,026
6	80	-0,115	-0,111	-0,112	0,061	0,063	0,065
7	100	-0,144	-0,143	-0,143	0,069	0,069	0,070
8	120	-0,147	-0,146	-0,148	0,068	0,078	0,075
9	140	-0,167	-0,167	-0,165	0,059	0,060	0,054
10	160	-0,170	-0,176	-0,170	0,041	0,044	0,034
11	180	-0,196	-0,190	-0,196	0,028	0,028	0,030
12	200	-0,212	-0,206	-0,210	0,022	0,028	0,026
13	220	-0,231	-0,232	-0,229	0,015	0,017	0,015
14	240	-0,240	-0,242	-0,240	-0,001	0,002	-0,001
15	260	-0,261	-0,261	-0,261	-0,079	-0,069	-0,075
16	280	-0,284	-0,280	-0,280	-0,242	-0,245	-0,247
17	300	-0,312	-0,311	-0,311	-0,389	-0,390	-0,380

O ajustamento dos valores obtidos na haste vertical nº 1 do aparelho (relógio comparador nº 1) é da forma linear, segundo a equação:

$$y_1 = -0,0193772 - 9,6460600 \cdot 10^{-4} \cdot H$$

onde,

y_1 = valor a ser adicionado ao medido nas diferentes alturas da haste nº 1 do aparelho de medição para torná-lo equivalente à sua obtenção no ponto 2 de altura $H = 15,0\text{mm}$; e

H = altura de obtenção da leitura no relógio comparador nº 1.

Para a haste vertical nº 2 (relógio comparador nº 2) a equação que melhor se adequa aos valores em análise é da forma polinomial:

$$y_2 = -0,0749420 + 0,0042060 \cdot I - 0,0000510 \cdot I^2 + 2,6877390 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 5,2522900 \cdot 10^{-10} \cdot I^4$$

onde,

y_2 = valor a ser adicionado ao medido nas diferentes alturas da haste nº 2 do aparelho de medição para torná-lo equivalente à sua obtenção no ponto 2 de altura $I = 15,0\text{mm}$; e

I = altura de obtenção da leitura no relógio comparador nº 2.

As análises estatísticas referentes a estes modelos matemáticos foram realizadas utilizando-se o pacote estatístico "STATGRAPHICS". Nestas análises são envolvidos: o relacionamento entre as alturas de medições na haste vertical nº 1 do aparelho de determinação do comprimento de peças de madeira com as diferenças entre a média das leituras provenientes do relógio comparador nº 1 para o ponto nº 2 (altura = 15,0mm) e as leituras individuais obtidas no mesmo relógio, em suas correspondentes alturas de medições (Tabela A3.3).

O mesmo procedimento é adotado com relação à haste vertical e o seu correspondente relógio comparador nº 2.

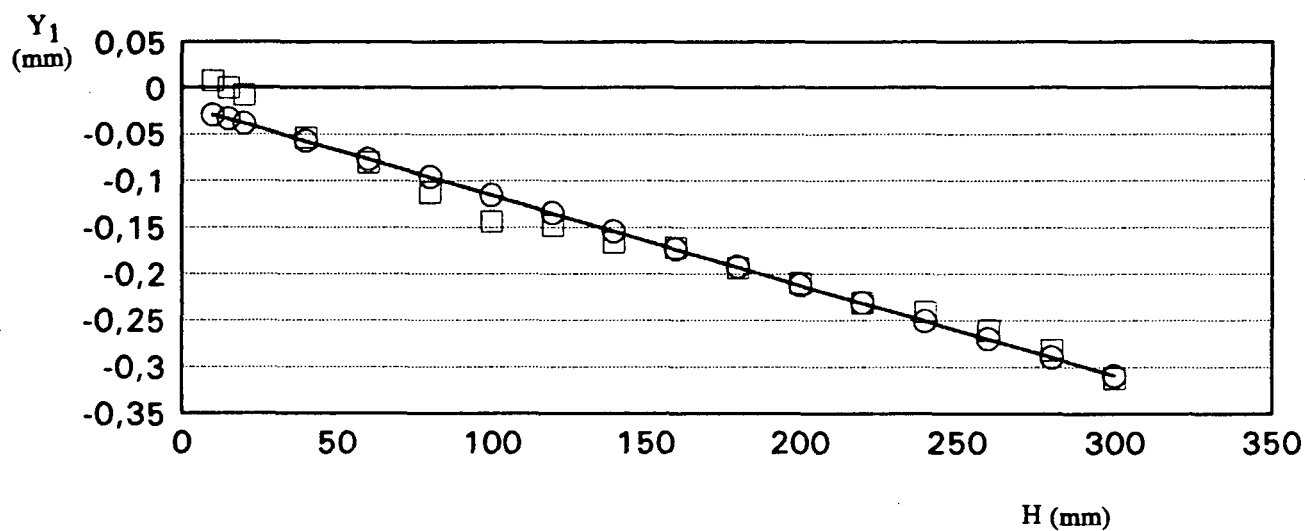
As análises de variância realizadas nas Tabelas A3.4 e A3.5, os correspondentes gráficos ilustrativos das equações determinadas nas Figuras A3.1 e A3.2, e os parâmetros verificativos de validade das equações (coeficientes de determinação - R^2 , de correlação - R ,

valores de F calculados - F_c e níveis de significância), apresentados em conjunto, comprovam a validade dos respectivos modelos adotados.

TABELA A3.4 ANÁLISE DE VARIÂNCIA REFERENTE ÀS LEITURAS OBTIDAS NO RELÓGIO COMPARADOR Nº 1 (HASTE VERTICAL Nº 1 DO APARELHO DE MEDIÇÃO) - TABELA A3.3.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrados Médios	F	Nível de Significância (%)
Modelo	1	0,331800	0,331800	1.611,64	0
Resíduo	44	0,009058	0,000206		
Total	45				

FIGURA A3.1 AJUSTAMENTO DAS LEITURAS OBTIDAS NO RELÓGIO COMPARADOR Nº 1 A DIFERENTES ALTURAS NA HASTE VERTICAL Nº 1 DO APARELHO DE MEDIÇÃO EM RELAÇÃO À ALTURA DE 15,0mm.



□ Diferenças de Leituras nºs 1, 2 e 3

○ Valor Ajustado

$$y_1 = -0,0193772 - 9,6460600 \cdot 10^{-4} \cdot H$$

$$R^2 = 0,9734$$

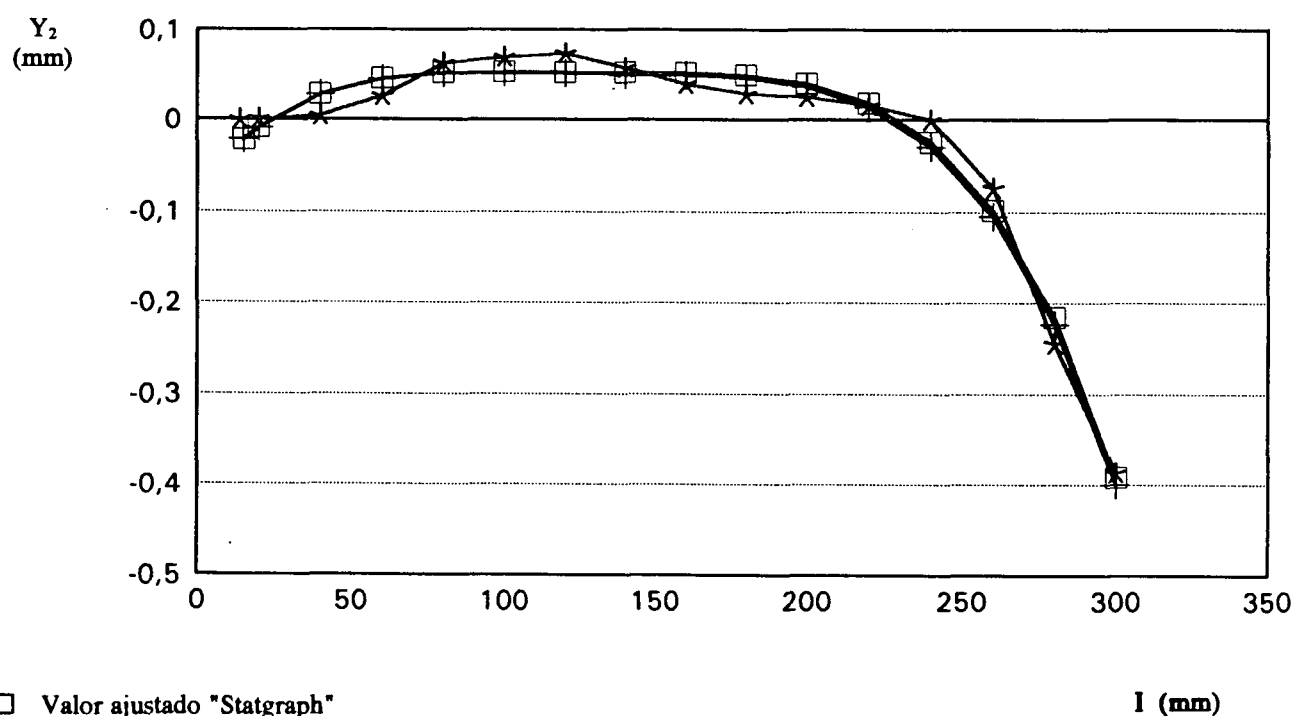
$$R = 0,9866$$

$$F_c = 1.611,64$$

TABELA A3.5 ANÁLISE DE VARIÂNCIA REFERENTE ÀS LEITURAS OBTIDAS NO RELÓGIO COMPARADOR N° 2 (HASTE VERTICAL N° 2 DO APARELHO DE MEDIÇÃO) - TABELA A3.3.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrados Médios	F	Nível de Significância (%)
Modelo	4	0,6760480	0,169012	462,99	0
Resíduo	41	0,0149667	0,000365042		
Total	45				

FIGURA A3.2 AJUSTAMENTO DAS LEITURAS OBTIDAS NO RELÓGIO COMPARADOR N° 2 A DIFERENTES ALTURAS NA HASTE VERTICAL N° 2 DO APARELHO DE MEDIÇÃO EM RELAÇÃO À ALTURA DE 15,0mm.



$$y_2 = -0,0749420 + 0,0042060 \cdot I - 0,0000510 \cdot I^2 + 2,6877390 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 5,2522900 \cdot 10^{-10} \cdot I^4$$

$$R^2 = 0,9783$$

$$R = 0,9890$$

$$F_c = 462,99$$

Utilizando-se as equações de ajustamento propostas, os novos valores de medições correspondentes aos originais apresentados na Tabela A3.1 são determinados na Tabela A3.6.

TABELA A3.6 REPRODUTIBILIDADE DE MEDIÇÕES OBTIDAS NO APARELHO DE DETERMINAÇÃO DE DEFORMAÇÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS, AJUSTADAS ÀS MEDIÇÕES OBTIDAS A UMA ALTURA DE 15,0mm (ALTURA DE MEDIÇÃO DO COMPRIMENTO DOS SARRAFOS ISOLADAMENTE).

Ponto de Medição		Relógio Comparador N° 1			Relógio Comparador N° 2		
N°	Altura (mm)	Leituras (mm)			Leituras (mm)		
		1	2	3	1	2	3
1	10	25,451	25,452	25,453	24,644	24,641	24,642
2	15	25,456	25,456	25,452	24,658	24,657	24,658
3	20	25,460	25,457	25,456	24,672	24,670	24,669
4	40	25,486	25,484	25,483	24,706	24,699	24,706
5	60	25,492	25,493	25,493	24,700	24,698	24,699
6	80	25,507	25,503	25,504	24,670	24,668	24,666
7	100	25,517	25,516	25,516	24,663	24,663	24,662
8	120	25,501	25,500	25,502	24,663	24,653	24,656
9	140	25,502	25,502	25,500	24,671	24,670	24,676
10	160	25,485	25,491	25,485	24,688	24,685	24,695
11	180	25,492	25,486	25,492	24,698	24,698	24,696
12	200	25,489	25,483	25,487	24,694	24,688	24,690
13	220	25,488	25,489	25,486	24,679	24,677	24,679
14	240	25,478	25,480	25,478	24,651	24,648	24,651
15	260	25,480	25,480	25,480	24,654	24,644	24,650
16	280	25,484	25,480	25,480	24,698	24,701	24,703
17	300	25,492	25,491	25,491	24,668	24,669	24,659

Exemplificando o procedimento adotado para o ajustamento de valores da leitura n° 1 do ponto 10, tem-se:

$$H = I = 160\text{mm} = \text{altura de colocação dos relógios comparadores}$$

$$y_1 = -0,0193772 - 9,6460600 \cdot 10^{-4} \cdot H \text{ (Relógio n° 1)}$$

$$y_1 = -0,0193772 - 9,6460600 \cdot 10^{-4} \cdot 160$$

$$y_1 = -0,174\text{mm}$$

$$E_1 = 25,659\text{mm (Tabela A3.1)}$$

$$E_1' = 25,659 - 0,174 = 25,485$$

$$E_1' = 25,485\text{mm (Tabela A3.6)}$$

$$y_2 = -0,0749420 + 0,0042060 \cdot I - 0,0000510 \cdot I^2 + 2,6877390 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 5,2522900 \cdot 10^{-10} \cdot I^4 \text{ (Relógio nº 2)}$$

$$y_2 = -0,0749420 + 0,0042060 \cdot 160 - 0,00005 \cdot (160)^2 + 2,6877390 \cdot 10^{-7} \cdot (160)^3 - 5,2522900 \cdot 10^{-10} \cdot (160)^4$$

$$y_2 = 0,049\text{mm}$$

$$F_2 = 24,639 \text{ (Tabela A3.1)}$$

$$F_2' = 24,639 + 0,049 = 24,688$$

$$F_2' = 24,688\text{mm (Tabela A3.6)}$$

Analisando os dados ajustados da Tabela A3.6 quanto à soma das leituras mínimas e máximas obtidas nos dois relógios, de maneira similar à adotada na Tabela A3.2 referente aos dados originais, obtém-se a Tabela A3.7.

TABELA A3.7 REPRODUTIBILIDADE DE MEDIÇÕES: DIFERENÇAS MÁXIMAS E MÍNIMAS ENTRE AS LEITURAS AJUSTADAS APRESENTADAS NA TABELA A3.6.

Ponto de Medição	Leitura Ajustada dos Relógios Comparadores (mm)							Máxima Diferença	Diferença em Relação a média original no Ponto 2 (mm)	
	Mínimo			Máximo					50,168-C	50,168-F
Nº	Altura	A	B	C = A+B	D	E	F= D+E	G= F-C		
1	10	25,451	24,641	50,092	25,453	24,644	50,097	0,005	0,076	0,071
2	15	25,452	24,657	50,109	25,456	24,658	50,114	0,005	0,059	0,054
3	20	25,456	24,669	50,125	25,460	24,672	50,132	0,007	0,043	0,036
4	40	25,483	24,699	50,182	25,486	24,706	50,192	0,010	-0,014	-0,024
5	60	25,492	24,698	50,190	25,493	24,700	50,193	0,003	-0,022	-0,025
6	80	25,503	24,666	50,170	25,507	24,670	50,178	0,008	-0,002	-0,010
7	100	25,516	24,662	50,178	25,517	24,663	50,180	0,002	-0,010	-0,012
8	120	25,500	24,653	50,153	25,502	24,663	50,165	0,012	0,015	0,003
9	140	25,500	24,670	50,170	25,502	24,676	50,178	0,008	-0,002	-0,010
10	160	25,485	24,685	50,170	25,491	24,695	50,186	0,016	-0,002	-0,018
11	180	25,486	24,696	50,182	25,492	24,698	50,190	0,008	-0,014	-0,022
12	200	25,483	24,688	50,171	25,489	24,694	50,183	0,012	-0,003	-0,015
13	220	25,486	24,677	50,163	25,489	24,679	50,168	0,005	0,005	0,000
14	240	25,478	24,648	50,126	25,480	24,651	50,131	0,005	0,042	0,037
15	260	25,480	24,644	50,124	25,480	24,654	50,134	0,010	0,044	0,034
16	280	25,480	24,698	50,178	25,484	24,703	50,187	0,009	-0,010	-0,019
17	300	25,491	24,659	50,151	25,492	24,669	50,162	0,011	0,017	0,006

A comparação entre os dados das colunas $D_1 = G_2 - G_1$ (referentes às diferenças entre as leituras máximas e mínimas obtidas nos relógios colocados em uma mesma altura na haste do aparelho de medição) das Tabelas A3.2 e A3.7 revelam as mesmas diferenças consideradas satisfatórias, uma vez que todos os valores originais correspondentes foram ajustados da mesma forma.

No que se refere às diferenças entre as médias de medições no ponto 2 e as leituras individuais em diferentes alturas nas hastes verticais (últimas duas colunas da Tabela A3.7), a variabilidade torna-se muito mais aceitável do que aquelas referentes aos dados originais (últimas duas colunas da Tabela A3.2), excetuando-se os pontos nº 1 e 2. Estes dois pontos não foram considerados para fins de ajustamento. O nº 2 foi utilizado como base do ajuste, funcionando como se todas as medições houvessem sido nele realizadas e o nº 1 não foi utilizado nas medições de S_p , conforme mencionado anteriormente.

O relacionamento entre eles é de interesse nas análises das deformações de crescimento na transformação de pranchas em sarrafos (E_p) e a variabilidade original máxima de 0,005mm (Tabela A3.2) é bastante aceitável.

O intervalo de variação de -0,003 a -0,706mm (pontos 3 e 17 da Tabela A3.2) passa a ser de -0,025 a +0,044mm (pontos 3 e 15 da Tabela A3.7), a que corresponde uma diminuição de $-0,706 - (-0,003) = -0,703$ mm para $+0,044 - (-0,025) = 0,069$ mm.

Mais importante do que o intervalo de variação, entretanto, é a diminuição da magnitude da variação individual. Sendo a maior diferença observada nos valores ajustados de +0,044mm, somando-se a variação de 0,005mm, existente na determinação do valor médio no ponto 2, obtém-se o valor máximo de 0,049mm.

Considerando-se o comprimento padrão de 2.320,0mm, adotado no experimento, é possível ocorrer um erro máximo de $21\mu\epsilon \left[\left(\frac{0,049}{2.320} \right) \times 10^6 \right]$.

Este valor é bem inferior aos 0,127mm (0,005") aceitos por POST (1979a) em seus experimentos, utilizando sarrafos de comprimentos padrão de 3.632,2mm (143"), correspondendo uma variabilidade de $\left(\frac{0,127}{3.632} \right) \times 10^6 = 35\mu\epsilon$.

Ainda com referência às possíveis fontes de influência nos resultados finais das deformações de crescimento longitudinais devem ser mencionadas:

- a. A coluna de aferição possuindo 303,54mm de altura (Figura 49) não alcançou toda a extensão da haste vertical do aparelho que é de 404,0mm (Figura 47). Também não foi suficiente para alcançar as alturas máximas de medições de 317,54; 329,30; 316,54; 327,36 e 331,36mm das toras numeradas de 1 a 5, respectivamente.
Desta forma, a utilização das equações determinadas para o ajustamento dos dados extrapolaram seus intervalos de abrangência.
- b. A análise de reprodutibilidade apresentada independe do comprimento de medição, referindo-se às seguintes fontes de possíveis variações:
 - Precisão dos relógios comparadores, a qual perfaz um valor de $\pm 0,02$ mm para os dois relógios utilizados na determinação do comprimento de cada peça de madeira. Em relação ao comprimento padrão, a esta precisão corresponde uma variabilidade de $\frac{0,02}{2.320} = 8,6\mu\epsilon$.
 - Ajuste das peças de fixação dos relógios comparadores nas hastes verticais do aparelho, uma vez que após cada leitura o relógio comparador era deslocado ao longo da mesma.
 - Planicidade, perpendicularidade e paralelismo das hastes verticais e de suas canaletas de deslocamento das peças de fixação dos relógios comparadores.
- c. Não constituem fontes de variações significantes aquelas decorrentes da medição do comprimento padrão inicial de 2.320,0mm, com precisão de 1,0mm, e da obtenção da diferença de altura dos relógios comparadores (Figura 52), com um paquímetro de precisão igual a 0,02mm. No primeiro caso, a determinação das deformações de crescimento longitudinais, quando é relativa à diferença de dois comprimentos dependentes da mesma precisão de 1mm, praticamente elimina seu efeito. Ao paquímetro, sendo utilizado duas vezes em cada medição, corresponde uma variação possível de $\pm 0,04$ mm, a

qual influencia apenas o valor de “J”, constante na equação de determinação do comprimento do sarrafo dentro da tora: $S_i = \sqrt{(A + G - D) + J^2}$ (Item 3.3.2.2), sendo, portanto, a variabilidade decorrente bastante reduzida.

Anexo 4

Deformações de Crescimento Longitudinais
(Resultados Experimentais Ajustados)

G = Soma das leituras E e F obtidas nos dois relógios comparadores identificados pelos n^{os} 1 e 2, respectivamente (mm);

J = Diferença entre as alturas H e I ($J = H - I$), de colocação dos relógios comparadores n^{os} 1 e 2, ao longo das hastes verticais n^{os} 1 e 2, respectivamente, do aparelho de medição (mm);

S_t = Comprimento do sarrafo dentro da tora (mm);

S_p = Comprimento do sarrafo dentro da prancha (mm); e

S_s = Comprimento do sarrafo isoladamente (mm).

– Os sufixos "t", "p" e "s" referem-se às medições obtidas na tora, prancha e no sarrafo, respectivamente.

TABELA A4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS AJUSTADOS - TORA 1

Número do Sarrafo	Resultados experimentais ajustados (mm)														
	Et	Ft	Gt	Ht	It	Jt	St	Ep	Fp	Gp	Sp	Es	Fs	Gs	Ss
1	26,419	45,327	71,746	317,54	307,60	9,94	2330,379					25,549	45,161	70,71	2329,322
14	24,566	47,161	71,727	315,60	308,00	7,60	2330,351	26,672	44,485	71,157	2329,769	33,720	37,120	70,840	2329,452
15	25,178	47,040	72,218	292,96	283,22	9,74	2330,850	27,929	44,160	72,089	2330,701	33,505	38,309	71,814	2330,426
16	25,242	46,823	72,064	268,60	258,98	9,62	2330,696	27,949	44,311	72,260	2330,872	30,952	41,222	72,174	2330,786
17	23,505	47,425	70,930	264,00	254,20	9,80	2329,563	27,442	44,279	71,721	2330,333	35,482	36,668	72,150	2330,762
18	23,812	47,306	71,117	239,54	230,10	9,44	2329,748	26,571	45,670	72,241	2330,853	30,663	42,835	73,498	2332,110
22	23,643	45,630	69,273	142,94	134,70	8,24	2327,900	32,190	38,340	70,530	2329,142	31,670	39,000	70,670	2329,282
23	23,526	44,900	68,427	118,68	111,38	7,30	2327,050	33,485	36,245	69,730	2328,342	25,340	44,183	69,523	2328,135
24	23,448	44,527	67,975	95,32	86,76	8,56	2326,602	35,519	33,740	69,259	2327,871	32,130	36,250	68,380	2326,992
25	23,464	44,115	67,579	71,28	61,88	9,40	2326,210	41,369	25,555	66,924	2325,536	31,574	35,920	67,494	2326,106
26	23,340	44,126	67,466	45,28	38,86	6,42	2326,087	28,172	38,412	66,584	2325,196	30,272	35,652	65,924	2324,536
27	29,543	42,401	71,944	317,06	306,90	10,16	2330,578	39,871	31,870	71,741	2330,353	36,345	34,734	71,079	2329,691
32	29,381	40,492	69,873	216,20	205,70	10,50	2328,509	39,380	31,169	70,549	2329,161	37,060	34,691	71,751	2330,363
33	29,377	40,192	69,569	192,06	183,14	8,92	2328,198	40,272	29,982	70,254	2328,866	28,144	43,471	71,615	2329,227
38	29,071	38,048	67,119	71,06	61,78	9,28	2325,750	41,199	25,460	66,659	2325,271	26,485	40,431	66,916	2325,528
39	29,464	37,316	66,780	46,74	39,62	7,12	2325,403	32,172	33,520	65,692	2324,304	27,660	38,260	65,920	2324,532
40	26,545	41,114	67,659	42,42	46,00	-3,58	2326,274	36,000	30,675	66,675	2325,287	35,245	31,590	66,835	2325,447
41	26,656	41,982	68,638	65,70	69,50	-3,80	2327,253			0,000		31,875	36,305	68,180	2326,792
42	27,371	42,414	69,785	89,48	93,96	-4,48	2328,402			0,000		36,798	33,040	69,838	2328,450
43	27,648	41,620	69,268	103,94	117,62	-13,68	2327,921	38,703	30,440	69,143	2327,755	30,572	39,319	69,891	2328,503
44	27,986	41,510	69,496	139,96	141,54	-1,58	2328,108			0,000		32,330	38,480	70,810	2329,422
45	26,591	44,197	70,787	236,40	237,50	-1,10	2329,400			0,000		31,468	42,337	73,805	2332,417
46	26,119	44,938	71,056	260,28	261,06	-0,78	2329,668			0,000		31,541	41,499	73,040	2331,652
47	25,976	45,948	71,924	284,82	285,10	-0,28	2330,536			0,000		29,161	43,825	72,986	2331,598
48	25,232	46,906	72,138	308,68	308,20	0,48	2330,750			0,000		23,619	49,021	72,640	2331,252
49	25,084	48,318	73,401	313,06	313,62	-0,56	2332,013			0,000		35,395	37,670	73,065	2331,677
50	26,677	39,465	66,142	42,64	47,42	-4,78	2324,759	35,753	29,148	64,901	2323,513	27,035	38,241	65,276	2323,888
51	27,136	40,679	67,815	66,06	70,50	-4,44	2326,431			0,000		24,817	42,555	67,372	2325,984
52	27,515	40,934	68,449	89,76	94,10	-4,34	2327,065			0,000		37,680	30,871	68,551	2327,163
53	27,850	41,016	68,866	114,08	117,18	-3,10	2327,480	38,492	30,308	68,800	2327,412	21,470	48,078	69,548	2328,160
54	28,328	40,870	69,198	139,80	141,30	-1,50	2327,810			0,000		33,850	36,500	70,350	2328,962
55	26,631	43,553	70,185	236,58	236,86	-0,28	2328,797	31,393	40,992	72,385	2330,997	36,575	36,091	72,666	2331,278
56	26,452	44,115	70,567	261,08	260,30	0,78	2329,179	31,971	40,181	72,152	2330,764	41,090	31,250	72,340	2330,952
57	26,233	45,128	71,361	285,78	283,82	1,96	2329,974	33,715	38,657	72,372	2330,984	37,569	34,855	72,424	2331,036
58	25,492	46,438	71,931	290,70	289,60	1,10	2330,543	35,071	37,121	72,192	2330,804	39,279	32,831	72,110	2330,722
59	25,296	47,637	72,933	313,24	313,70	-0,46	2331,545	37,131	35,441	72,572	2331,184	30,859	41,700	72,559	2331,171
60	27,653	40,626	68,279	42,48	46,80	-4,32	2326,895	36,202	30,990	67,192	2325,804	39,375	27,942	67,317	2325,929
61	27,887	41,731	69,619	66,66	70,70	-4,04	2328,234			0,000		28,570	40,420	68,990	2327,602
62	28,535	41,523	70,058	89,58	94,42	-4,84	2328,675			0,000		30,890	39,030	69,920	2328,532
63	28,712	40,513	69,225	114,56	118,10	-3,54	2327,840	38,413	30,512	68,925	2327,537	35,930	33,580	69,510	2328,122
64	29,146	40,825	69,971	139,92	142,16	-2,24	2328,584			0,000		31,915	39,042	70,957	2329,569
66	27,178	43,619	70,796	260,32	261,28	-0,96	2329,408			0,000		41,535	30,782	72,317	2330,929
67	27,257	44,971	72,228	285,28	285,28	0,00	2330,840			0,000		41,865	31,088	72,953	2331,565
68	26,822	46,020	72,842	309,22	308,90	0,32	2331,454			0,000		34,805	38,302	73,107	2331,719
69	26,738	47,301	74,039	313,40	313,74	-0,34	2332,651			0,000		39,595	33,945	73,540	2332,152

TABELA A4.2. RESULTADOS EXPERIMENTAIS AJUSTADOS - TORA 2

Número do Sarrafo	Resultados experimentais ajustados (mm)															
	Et	Ft	Gt	Ht	It	Jt	St	Ep	Fp	Gp	Sp	Es	Fs	Gs	Ss	
2	41,335	11,079	52,414	178,90	178,76	0,14	2307,657			0		5,000	47,357	52,357	2307,600	
3	35,047	17,991	53,038	310,00	320,60	-10,60	2308,305			0		23,750	29,540	53,290	2308,533	
4	35,173	19,279	54,451	286,18	298,62	-12,44	2309,728			0		17,165	38,313	55,478	2310,721	
5	35,328	21,060	56,388	261,84	275,12	-13,28	2311,669			0		22,510	31,001	53,511	2308,754	
8	34,760	24,523	59,284	189,06	200,80	-11,74	2314,557			0		22,420	41,739	64,159	2319,402	
9	34,812	25,386	60,199	165,00	177,70	-12,70	2315,477			0		39,970	24,455	64,425	2319,668	
10	34,476	26,409	60,886	140,58	153,76	-13,18	2316,166			0		34,382	29,774	64,156	2319,399	
11	34,228	26,999	61,228	116,62	129,36	-12,74	2316,506			0		16,592	46,640	63,232	2318,475	
12	33,955	27,810	61,764	91,30	105,18	-13,88	2317,049			0		38,899	23,752	62,651	2317,894	
13	33,406	28,278	61,685	68,68	82,10	-13,42	2316,967			0		19,415	42,315	61,730	2316,973	
14	33,336	29,625	62,962	45,80	56,78	-10,98	2318,231			0		14,525	48,105	62,630	2317,873	
16	41,041	12,231	53,272	154,56	155,78	-1,22	2308,515			0		13,381	39,700	53,081	2308,324	
17	36,097	18,073	54,171	309,16	322,00	-12,84	2309,450			0		17,500	37,000	54,500	2309,743	
20	35,430	22,020	57,451	236,88	248,78	-11,90	2312,724	24,43	34,63	59,06	2314,303	24,402	35,835	60,237	2315,480	
23	34,957	24,948	59,905	164,00	177,42	-13,42	2315,187			0		29,980	33,605	63,585	2318,828	
24	34,410	26,047	60,457	140,64	154,18	-13,54	2315,740			0		30,990	32,318	63,308	2318,551	
25	34,267	26,349	60,616	116,20	129,32	-13,12	2316,896			0		34,720	27,530	62,250	2317,493	
26	33,892	27,168	61,059	92,32	104,42	-12,10	2316,334			0		26,478	35,339	61,817	2317,060	
27	33,349	27,951	61,300	69,10	81,32	-12,22	2316,576			0		30,030	31,448	61,478	2316,721	
28	33,355	29,636	62,991	44,94	56,52	-11,58	2318,263			0		23,500	39,340	62,840	2318,083	
30	41,900	9,935	51,836	202,30	204,82	-2,52	2307,080			0		19,532	32,292	51,824	2307,067	
31	37,295	14,588	51,883	309,28	322,04	-12,76	2307,161			0		23,300	28,725	52,025	2307,268	
32	37,685	15,532	53,216	285,96	298,44	-12,48	2308,493			0		15,268	38,435	53,703	2308,946	
33	37,729	16,024	53,753	260,82	273,78	-12,96	2309,032			0		15,690	40,022	55,712	2310,955	
34	37,928	17,531	55,459	236,76	248,62	-11,86	2310,733	23,725	33,028	56,753	2311,996	27,111	31,300	58,411	2313,654	
37	37,661	21,311	58,973	164,24	177,90	-13,66	2314,256			0		14,545	47,882	62,427	2317,670	
38	37,965	22,208	60,173	140,50	153,60	-13,10	2315,453			0		18,265	44,590	62,855	2318,098	
39	37,676	23,059	60,736	116,56	128,90	-12,34	2316,012			0		19,535	43,353	62,888	2318,131	
40	37,132	24,224	61,355	92,16	105,02	-12,86	2316,634			0		24,030	38,670	62,700	2317,943	
41	36,744	25,101	61,846	68,72	80,52	-11,80	2317,119			0		24,100	38,025	62,125	2317,368	
42	38,550	25,009	63,558	44,64	57,52	-12,88	2318,837			0		20,487	42,607	63,094	2318,337	
53	40,761	10,946	51,707	329,30	329,22	0,08	2306,950	21,629	30,303	51,932	2307,175	18,725	33,820	52,545	2307,788	
54	39,118	12,443	51,561	305,06	305,40	-0,34	2306,804	21,265	30,735	52	2307,243	23,990	27,538	51,528	2306,771	
55	38,557	14,435	52,992	281,54	281,00	0,54	2308,235	22,674	30,89	53,564	2308,807	18,464	34,675	53,139	2308,382	
56	38,283	15,772	54,055	257,58	256,54	1,04	2309,298	24,305	30,541	54,846	2310,089	20,295	34,884	55,179	2310,422	
57	37,357	17,670	55,027	233,72	233,00	0,72	2310,270	24,282	31,821	56,103	2311,346	26,655	30,660	57,315	2312,558	
58	34,563	22,446	57,010	137,00	136,04	0,96	2312,253	27,787	34,938	62,725	2317,968	24,885	34,405	59,290	2314,533	
59	33,945	23,320	57,266	114,44	111,18	3,26	2312,511	23,524	35,751	59,275	2314,518	25,330	33,205	58,535	2313,778	
60	33,248	23,783	57,031	90,34	87,56	2,78	2312,276	23,469	35,67	59,139	2314,382	20,505	37,190	57,695	2312,938	
61	32,997	24,337	57,334	68,10	63,96	4,14	2312,581			0		18,505	38,855	57,360	2312,603	
62	33,306	20,486	53,792	193,54	211,42	-17,88	2309,104			0		21,770	31,640	53,410	2308,653	
63	37,009	16,866	53,875	307,58	304,42	3,16	2309,120			0		17,755	35,972	53,727	2308,970	
64	36,285	18,739	55,024	284,16	281,08	3,08	2310,269			0		16,520	39,460	55,980	2311,223	
65	35,340	20,716	56,055	260,32	255,30	5,02	2311,304			0		18,335	39,270	57,605	2312,848	
67	32,315	26,039	58,354	139,88	136,06	3,82	2313,600			0		29,278	31,545	60,823	2316,066	
69	30,611	27,192	57,802	93,30	85,76	7,54	2313,058			0		24,505	33,835	58,340	2313,583	
70	30,752	27,682	58,434	68,56	63,04	5,52	2313,684			0		16,462	42,000	58,462	2313,705	

TABELA A4.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS AJUSTADOS - TORA 3

Número do Sarrafo	Resultados experimentais ajustados (mm)											
	Et	Ft	Gt	Ht	It	Jt	St	Es	Fs	Gs	Ss	
11	15,236	40,397	55,632	67,42	65,44	1,98	2310,876	23,450	30,312	53,762	2309,005	
12	15,890	39,962	55,852	43,86	41,86	2,00	2311,096	23,665	29,822	53,487	2308,730	
13	17,956	40,707	58,662	307,70	309,00	-1,30	2313,906	25,846	31,522	57,368	2312,611	
14	17,478	40,296	57,773	284,80	284,68	0,12	2313,016	24,389	32,650	57,039	2312,282	
18	18,729	36,731	55,460	188,46	188,44	0,02	2310,703	18,061	38,215	56,276	2311,519	
20	19,956	35,482	55,438	140,00	139,64	0,36	2310,681	30,901	24,612	55,513	2310,756	
21	21,089	35,223	56,312	116,02	113,28	2,74	2311,557	24,322	31,071	55,393	2310,636	
22	21,717	34,304	56,021	92,20	89,46	2,74	2311,265	21,612	32,659	54,271	2309,514	
23	22,852	33,430	56,283	65,66	67,64	-1,98	2311,527	24,925	29,735	54,660	2309,903	
24	23,560	33,118	56,678	43,66	42,36	1,30	2311,921	19,581	34,895	54,476	2309,719	
28	27,553	29,704	57,257	236,30	234,34	1,96	2312,900	26,147	31,611	57,758	2313,001	
29	27,626	28,969	56,595	212,00	210,10	1,90	2311,839	31,810	25,961	57,771	2313,014	
30	27,232	28,152	55,384	187,48	186,30	1,18	2310,627	23,862	32,913	56,775	2312,018	
34	29,892	25,017	54,909	92,02	89,60	2,42	2310,153	25,593	28,050	53,643	2308,886	
35	30,745	24,624	55,369	67,74	66,76	0,98	2310,613	32,789	20,903	53,692	2308,935	
36	31,948	24,079	56,027	44,12	41,66	2,46	2311,271	29,101	24,907	54,008	2309,251	
37	44,002	15,871	59,872	73,64	76,10	-2,46	2315,117	28,489	29,285	57,774	2313,017	
38	43,030	15,622	58,652	97,38	99,52	-2,14	2313,896	18,739	38,531	57,270	2312,513	
42	38,544	16,986	55,530	264,88	268,14	-3,26	2310,775	30,050	25,592	55,642	2310,885	
43	38,163	17,264	55,427	288,76	291,52	-2,76	2310,672	29,779	25,308	55,087	2310,330	
44	38,446	18,023	56,469	312,70	317,46	-4,76	2311,717	22,113	33,140	55,253	2310,496	
45	35,084	21,020	56,104	191,58	194,28	-2,70	2311,348	18,893	35,630	54,523	2309,766	
46	34,644	21,090	55,734	194,04	197,82	-3,78	2310,980	27,632	25,929	53,561	2308,804	
51	35,133	21,907	57,040	162,72	174,16	-11,44	2312,311	22,645	34,601	57,246	2312,489	
52	32,795	21,756	54,551	259,52	269,32	-9,80	2309,815	25,109	29,519	54,628	2309,871	
53	32,846	22,484	55,330	283,46	294,82	-11,36	2310,601	28,203	26,491	54,694	2309,937	
54	32,732	23,395	56,127	306,80	318,52	-11,72	2311,399	24,392	30,623	55,015	2310,258	
55	33,997	22,362	56,359	215,84	218,34	-2,50	2311,604	24,999	30,150	55,149	2310,392	
56	33,913	22,029	55,942	217,44	222,04	-4,60	2311,190	29,411	24,576	53,987	2309,230	
57	39,348	18,576	57,924	75,00	76,08	-1,08	2313,167	23,745	32,248	55,993	2311,236	
58	37,742	19,556	57,298	96,72	99,32	-2,60	2312,543	22,822	33,129	55,951	2311,194	
59	36,987	19,123	56,110	120,64	123,40	-2,76	2311,355	19,315	35,893	55,208	2310,451	
60	36,401	19,138	55,539	144,80	147,46	-2,66	2310,783	22,887	32,073	54,960	2310,203	
61	35,949	19,538	55,487	169,46	171,44	-1,98	2310,731	17,469	38,272	55,741	2310,984	
62	35,535	20,639	56,175	264,68	269,24	-4,56	2311,422	20,518	35,434	55,952	2311,195	
63	35,131	21,175	56,306	288,84	292,94	-4,10	2311,553	21,502	33,927	55,429	2310,672	
64	35,355	21,060	56,414	312,04	316,54	-4,50	2311,662	18,519	36,521	55,040	2310,283	
65	35,747	20,213	55,960	167,26	170,28	-3,02	2311,205	16,990	37,141	54,131	2309,374	
66	35,534	20,829	56,363	172,00	175,54	-3,54	2311,608	17,408	36,779	54,187	2309,430	

TABELA A4.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS AJUSTADOS - TORA 4

Número do Sarrafo	Resultados experimentais ajustados (mm)											
	Et	Ft	Gt	Ht	It	Jt	St	Ea	Fa	Ga	Sa	
1	35,350	38,810	74,160	311,00	297,20	13,80	2329,444	37,535	36,533	74,068	2329,311	
2	34,773	36,876	71,650	286,26	274,42	11,84	2326,923	26,406	46,430	72,836	2328,079	
3	34,346	36,941	71,287	262,18	248,96	13,22	2326,567	26,010	46,378	72,388	2327,631	
4	34,924	36,340	71,264	238,06	223,74	14,32	2326,551	30,655	41,978	72,633	2327,876	
9	32,842	32,700	65,542	117,96	104,48	13,48	2320,824	22,290	45,638	67,928	2323,171	
10	32,589	31,802	64,391	95,36	80,48	14,88	2319,682	26,415	39,405	65,820	2321,063	
11	32,476	32,078	64,554	70,70	56,08	14,62	2319,843	27,620	38,470	66,090	2321,333	
12	31,935	31,703	63,639	46,98	31,74	15,24	2318,932	18,545	45,065	63,610	2318,853	
13	37,771	36,043	73,814	312,80	297,50	15,30	2329,107	33,152	40,421	73,573	2328,816	
16	36,748	33,914	70,662	239,00	223,00	16,00	2325,960	29,405	43,130	72,535	2327,778	
17	36,602	33,244	69,847	213,74	199,90	13,84	2325,131	27,600	44,945	72,545	2327,788	
19	35,482	31,685	67,166	167,00	151,70	15,30	2322,460	24,708	47,125	71,833	2327,076	
20	34,978	30,978	65,956	142,72	126,66	16,06	2321,254	24,355	45,920	70,275	2325,518	
21	34,987	30,686	65,672	119,20	102,54	16,66	2320,975	31,372	37,700	69,072	2324,315	
22	35,689	30,269	65,958	94,70	78,52	16,18	2321,258	24,475	42,630	67,105	2322,348	
23	35,602	30,013	65,614	71,34	54,32	17,02	2320,920	22,940	44,060	67,000	2322,243	
24	35,724	29,433	65,158	46,00	30,66	15,34	2320,451	22,760	42,305	65,065	2320,308	
25	40,822	32,047	72,869	311,10	296,50	14,60	2328,158	38,915	34,025	72,940	2328,183	
26	40,506	31,205	71,711	287,22	273,50	13,72	2326,994	32,550	39,800	72,350	2327,593	
27	40,220	31,116	71,335	262,30	248,18	14,12	2326,621	32,060	39,635	71,695	2326,938	
28	39,990	30,698	70,688	238,00	224,54	13,46	2325,970	27,722	44,680	72,402	2327,645	
29	39,264	29,961	69,225	214,30	200,00	14,30	2324,512	38,460	33,245	71,705	2326,948	
31	39,061	28,161	67,222	166,50	152,14	14,36	2322,509	27,340	43,265	70,605	2325,848	
32	38,883	27,528	66,411	142,66	127,62	15,04	2321,702	26,162	42,700	68,862	2324,105	
33	38,832	27,553	66,384	119,20	104,28	14,92	2321,675	33,200	35,630	68,830	2324,073	
37	40,714	31,885	72,599	326,00	320,50	5,50	2327,849	26,985	45,615	72,600	2327,843	
38	39,663	31,783	71,446	302,94	296,74	6,20	2326,697	31,855	39,815	71,670	2326,913	
39	40,330	31,436	71,766	279,40	271,10	8,30	2327,024	31,765	41,045	72,810	2328,053	
40	39,640	30,769	70,409	254,96	247,46	7,50	2325,664	31,255	41,188	72,443	2327,686	
41	39,395	29,811	69,206	230,84	222,60	8,24	2324,464	25,895	46,275	72,170	2327,413	
44	39,714	28,141	67,855	86,16	78,54	7,62	2323,110	39,478	29,935	69,413	2324,656	
45	38,635	28,466	67,101	63,00	55,00	8,00	2322,358	27,190	39,885	67,075	2322,318	
46	31,697	33,655	65,352	37,84	31,18	6,66	2320,605	29,285	35,162	64,447	2319,69	
47	42,694	29,228	71,922	327,36	318,30	9,06	2327,182	33,660	38,182	71,842	2327,085	
48	42,386	29,308	71,694	303,60	293,92	9,68	2326,957	37,490	34,430	71,920	2327,163	
49	41,844	29,237	71,081	278,96	270,28	8,68	2326,340	39,550	33,515	73,065	2328,308	
52	33,753	32,999	66,752	134,08	125,00	9,08	2322,013	21,657	48,572	70,229	2325,472	
53	33,803	33,641	67,443	110,00	103,10	6,90	2322,697	27,605	42,330	69,935	2325,178	
54	33,447	33,845	67,292	86,32	83,00	3,32	2322,537	26,150	41,800	67,950	2323,193	
57	44,445	29,729	74,174	329,20	320,70	8,50	2329,433	29,170	44,040	73,210	2328,453	
58	43,084	29,704	72,788	305,24	297,74	7,50	2328,043	31,070	43,115	74,185	2329,428	
59	42,543	28,863	71,406	281,16	273,40	7,76	2326,662	25,295	46,990	72,285	2327,528	
60	43,064	27,884	70,948	254,80	248,50	6,30	2326,200	32,610	39,965	72,575	2327,818	
61	42,781	27,314	70,095	230,70	224,30	6,40	2325,347	31,610	40,770	72,380	2327,623	
62	43,039	26,025	69,063	134,70	127,10	7,60	2324,319	38,748	32,355	71,103	2326,346	
63	42,724	26,291	69,014	111,00	102,52	8,48	2324,273	40,015	30,310	70,325	2325,568	
64	41,324	26,227	67,551	88,24	79,50	8,74	2322,810	27,482	40,562	68,044	2323,287	
65	41,279	26,350	67,629	63,44	54,82	8,62	2322,888	33,718	34,095	67,813	2323,056	
66	40,417	26,133	66,550	40,00	31,64	8,36	2321,808	38,610	27,545	66,155	2321,398	
67	35,182	36,222	71,404	231,64	225,46	6,18	2326,655	29,025	43,660	72,685	2327,928	
68	35,303	36,217	71,520	256,16	249,64	6,52	2326,772	33,962	37,000	70,962	2326,205	
70	39,463	26,727	66,190	150,50	140,00	10,50	2321,457	28,832	39,355	68,187	2323,43	
71	37,251	27,355	64,606	133,54	136,18	-2,64	2319,850	18,980	46,010	64,990	2320,233	
72	37,278	26,181	63,459	122,76	122,76	0,00	2318,702	29,112	34,162	63,274	2318,517	

TABELA A4.5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS AJUSTADOS - TORA 5

Número do Sarrafo	Resultados experimentais ajustados (mm)															
	Et	Ft	Gt	Ht	It	Jt	St	Ep	Fp	Gp	Sp	Es	Fs	Gs	Ss	
1	30,091	24,560	54,651	32,68	23,56	9,12	2309,912				0	18,429	35,472	53,901	2309,144	
2	27,244	29,317	56,561	326,18	318,34	7,84	2311,818				0	21,341	35,259	56,600	2311,843	
3	27,542	29,406	56,948	302,06	293,64	8,42	2312,206				0	25,530	31,717	57,247	2312,490	
4	28,497	29,388	57,885	277,40	269,74	7,66	2313,141				0	26,949	31,690	58,639	2313,882	
5	29,801	29,585	59,386	253,86	245,52	8,34	2314,644				0	24,585	36,112	60,697	2315,940	
6	31,358	27,995	59,353	229,64	220,60	9,04	2314,613				0	22,101	39,238	61,339	2316,582	
7	32,705	27,524	60,230	206,78	196,68	10,10	2315,495				0	34,732	28,115	62,847	2318,090	
10	35,144	26,864	62,008	133,42	124,12	9,30	2317,269				0	33,512	30,609	64,121	2319,364	
11	37,546	26,160	63,706	108,76	100,00	8,76	2318,965				0	20,249	44,494	64,743	2319,986	
12	-38,626	26,125	64,750	85,70	75,60	10,10	2320,015				0	20,699	44,429	65,128	2320,371	
13	38,888	26,218	65,106	62,56	52,04	10,52	2320,373				0	27,811	37,062	64,873	2320,116	
14	41,601	24,864	66,465	38,00	28,84	9,16	2321,726				0	27,390	38,449	65,839	2321,082	
16	24,748	29,400	54,148	326,18	317,64	8,54	2309,407				0	27,718	26,903	54,621	2309,864	
17	25,921	29,162	55,083	302,06	293,60	8,46	2310,342				0	22,682	32,432	55,114	2310,357	
18	27,176	30,063	57,239	277,28	269,62	7,66	2312,495				0	21,459	36,205	57,664	2312,907	
19	28,228	30,173	58,401	253,82	245,76	8,06	2313,658				0	23,768	35,449	59,217	2314,460	
20	29,243	30,195	59,438	229,22	220,78	8,44	2314,696				0	24,561	35,919	60,480	2315,723	
21	30,594	29,647	60,241	206,00	196,82	9,18	2315,502				0	24,731	37,448	62,179	2317,422	
25	36,484	28,074	64,558	108,78	99,38	9,40	2319,820				0	27,565	37,539	65,104	2320,347	
26	37,277	27,546	64,823	84,74	76,36	8,38	2320,081				0	24,062	40,759	64,821	2320,064	
27	38,135	26,260	64,395	60,80	53,00	7,80	2319,651				0	33,739	30,357	64,096	2319,339	
28	40,531	26,722	67,253	37,20	29,00	8,20	2322,511				0	25,451	41,151	66,602	2312,845	
29	33,695	21,878	55,573	35,70	26,62	9,08	2310,834				0	17,659	36,888	54,547	2309,790	
30	25,226	31,425	56,652	315,68	308,20	7,48	2311,907				0	23,339	33,209	56,548	2311,791	
31	26,556	31,109	57,665	301,86	293,02	8,84	2312,925				0	25,551	31,462	57,013	2312,256	
32	27,801	30,871	58,672	277,72	269,28	8,44	2313,930				0	25,442	33,962	59,404	2314,647	
33	28,575	30,387	58,962	253,06	244,72	8,34	2314,220				0	23,512	36,921	60,433	2315,676	
37	33,547	29,172	62,718	156,56	148,36	8,20	2317,976				0	29,020	37,728	66,748	2321,991	
38	35,032	29,107	64,139	133,00	124,72	8,28	2319,397				0	30,649	36,185	66,834	2322,077	
39	36,265	28,578	64,843	108,58	100,12	8,46	2320,101				0	24,611	41,738	66,349	2321,592	
40	37,134	28,439	65,573	85,46	75,88	9,58	2320,836				0	31,522	34,625	66,147	2321,390	
42	39,366	27,851	67,216	37,42	28,24	9,18	2322,478				0	26,269	40,532	66,801	2322,044	
43	34,449	31,268	65,717	325,16	331,36	-6,20	2320,968				0	27,471	37,812	65,283	2320,526	
44	33,476	29,991	63,466	300,76	306,00	-5,24	2318,715				0	27,312	36,762	64,074	2319,317	
45	33,164	29,801	62,965	276,10	281,78	-5,68	2318,215	34,973	30,000	64,973	2320,216	25,540	38,118	63,658	2318,901	
46	33,507	30,197	63,704	251,92	257,24	-5,32	2318,953	36,749	29,018	65,767	2321,01	24,140	41,242	65,382	2320,625	
47	32,640	30,349	62,989	227,46	233,42	-5,96	2318,240	37,682	27,291	64,973	2320,216	28,700	36,758	65,458	2320,701	
48	32,666	30,229	62,895	204,08	210,10	-6,02	2318,145	39,169	25,566	64,735	2319,978	27,822	38,243	66,065	2321,308	
49	31,614	29,999	61,614	108,00	113,60	-5,60	2316,863	42,452	19,942	62,394	2317,637	27,100	35,317	62,417	2317,660	
50	31,967	29,052	61,019	86,00	89,40	-3,40	2316,264	42,241	19,334	61,575	2316,818	27,829	33,349	61,178	2316,421	
51	32,979	29,148	62,127	61,60	65,78	-4,18	2317,374	42,039	20,133	62,172	2317,415	27,384	34,581	61,965	2317,208	
52	33,199	27,848	61,047	35,70	42,00	-6,30	2316,299	41,009	19,813	60,822	2316,065	20,891	39,608	60,499	2315,742	
54	35,858	29,452	65,310	291,30	297,82	-6,52	2320,562				0	30,311	35,228	65,539	2320,782	
55	36,306	27,823	64,129	276,08	281,92	-5,84	2319,380				0	30,679	33,978	64,657	2319,900	
56	36,662	28,401	65,063	253,44	258,40	-4,96	2320,312				0	34,379	31,931	66,310	2321,553	
57	35,905	28,889	64,795	229,30	233,34	-4,04	2320,041				0	26,629	40,305	66,934	2322,177	
60	35,311	27,420	62,731	84,04	89,54	-5,50	2317,980				0	22,868	40,138	63,006	2318,249	
61	35,700	26,938	62,639	60,46	65,10	-4,64	2317,886				0	34,198	28,429	62,627	2317,870	
62	36,257	25,587	61,844	36,14	41,40	-5,26	2317,093				0	27,609	32,735	60,344	2315,587	
63	35,377	28,835	64,212	313,50	319,12	-5,62	2319,462				0	33,512	30,501	64,013	2319,256	
64	34,206	27,954	62,160	304,74	301,36	3,38	2317,405				0	19,010	43,648	62,658	2317,901	
65	33,940	28,788	62,728	275,86	280,56	-4,70	2317,975				0	30,391	33,192	63,583	2318,826	
66	34,698	28,815	63,514	252,16	256,18	-4,02	2318,760				0	19,769	45,260	65,029	2320,272	
71	33,731	26,826	60,557	60,82	63,80	-2,98	2315,802				0	30,748	29,739	60,487	2315,730	
72	34,745	25,602	60,347	36,12	39,62	-3,50	2315,592				0	21,500	38,159	59,659	2314,902	
76	38,498	26,357	64,855	241,30	239,34	1,96	2320,098				0	30,211	36,737	66,948	2322,191	
77	39,759	26,891	66,650	272,84	275,14	-2,30	2321,894				0	23,660	43,778	67,438	2322,681	
78	40,191	26,041	66,231	298,56	299,00	-0,44	2321,475				0	36,519	29,509	66,028	2321,271	

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, O.J.R. de. Método para controle das rachaduras de topo em toras de *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden, visando a produção de lâminas por desenrolamento. Piracicaba, 1986. 91p. Dissertação, Mestre, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo.
- ALBINO, J.C. & TOMAZELLO FILHO, M. Varição da densidade básica da madeira e produtividade de *Eucalyptus spp.* Planaltina, DF, Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados - CPAC, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, 1985. 43p. (Boletim de Pesquisa n° 26).
- ALFONSO, A.A. Identificação do material botânico das árvores utilizadas nesta tese como pertencente a espécie de *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden. São Paulo, S.P. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., 1989. (Correspondência DIMAD/AAIM. 048/89, datada de 01 de junho de 1989).
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM. Standard methods of testing small clear specimens of timber, D 143-52 (72).
- ARCHER, R.R. On the distribution of tree growth stresses - Part II: Stresses due to asymmetric growth strains. Wood Science and Technology, 10 (4): 293-309, 1976.
- ARCHER, R.R. Analysis of residual stresses in orthotropic materials. Costa Rica, Escuela Ingeniera Civil, Universidad de Costa Rica, 1978. (Technical Report).
- ARCHER, R.R. On the distribution of tree growth stresses - Part 3: The case of inclined grain. Wood Science and Technology, 13 (1): 67-78, 1979.
- ARCHER, R.R. On the distribution of tree growth stresses - Part 4: The general case allowing longitudinal and circumferencial variation of growth stresses, Wood Science and Technology, 15 (3): 201-9, 1981.
- ARCHER, R.R. On the distribution of tree growth stresses - Part 5: Asymmetric peripheral growth strains with orthotropic material behavior. Wood Science and Technology, 19 : 259-76, 1985.
- ARCHER, R.R. Growth stresses and strains in trees. 1ª ed., Syracuse, N.Y., U.S.A., Springer-Verlag, 1986a. 240p.
- ARCHER, R.R. Application of a new method for growth stress measurement to *Pinus caribaea*. Proceedings IUFRO Group P 5.01. Meeting Manaus, Brazil, 1986b. p. 19-23.
- ARCHER, R.R. & BYRNES, F.E. On the distribution of tree growth stresses - Part I: An anisotropic plane strain theory. Wood Science and Technology, 8 (3): 184-96, 1974.
- ARCHER, R.R. & WILSON, B.F. Apical control of branch movements in white pine: compression wood action, Wood Science and Tecnology, 16 (3): 181-91, 1982.
- ARMSTRONG, L.D. Short term creep tests on air-dry wooden beams. Austrália, C.S.I.R.O., Division of Forest Products, 1953. (Sub-Proj. T.P. 16-1, Prog. Rep. n° 2).

- ATHERTON, J.C. Experimental techniques for the determination of growth stress in trees. Amherst, Massachusetts, University of Massachusetts, Dept. of Forestry and Wildlife Management, 1978. 23p. (A Senior Honors Thesis).
- BAENA, E.S. A utilização de *Eucalyptus saligna* Smith e *Eucalyptus grandis* Hill. na confecção de sarrafos. Piracicaba, S.P. 1982. 74p. Dissertação, Mestre, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo.
- BAMBER, R.K. Origin of growth stresses. Forpride Digest, 8 (1): 75-9, 1978. (Também: IUFRO Conference ForpriDECOM. Philippines).
- BANDYOPADHYAY, N. & ARCHER, R.R. Relief of growth stresses in planks. Holzforschung, 33 (2): 43-6, 1979.
- BARBER, N.F. & MEYLAN, B.A. The anisotropic shrinkage of wood - A theoretical model. Holzforschung, 18 (5): 146-56, 1964.
- BECK, J.L. Anisotropic theory of growth stresses in tress. Phys. & Eng. Lab., Dept. Sci. & Ind. Res., Lower Hutt, New Zealand, 1974. 32p. (Rept. 452).
- BEGE, P. Détermination de la distribution des contraintes de croissance dans les essences feuillués, analyse des résultats en métropole. Paris, France, Centre Technique Bois, 1982. 108p.
- BERENGUT, G.; PONCE, R.H. & FREITAS, A.R. de. Ensaio de desdobro de *Eucalyptus saligna* Smith. Sivicultura, 8: 81-98, 1973.
- BERT, C.W. & THOMPSON, G.L. A method for measuring planar residual stresses in rectangularly orthotropic materials. J Compos Mater, 2: 244-53, 1968.
- BHAT, K.M.; BHAT, K.V. & DHAMODARAN. Wood density and fiber length of *Eucalyptus grandis* grown in Kerala, India. Wood Fiber Science, 22 (1): 54-61, 1990.
- BODIG, J. & JAYNE, B.A. Mechanics of Wood and Wood Composites. New York, Van Nostrand Reinhold Co., 1982. 712p.
- BOYD, J.D. Tree growth stresses. I. Growth stress evaluation. Australian Journal of Scientific Research, 3 (3): 270-93, 1950a.
- BOYD, J.D. Tree growth stresses. II. The development of shakes and other visual failures in timber. Australian Journal of Applied Science, 1 (3): 296-312, 1950b.
- BOYD, J.D. Tree growth stresses. III. The origin of growth stresses. Australian Journal of Scientific Research, 3 (3): 294-309, 1950c.
- BOYD, J.D. Tree growth stresses - Part V: Evidence of an origin in differentiation and lignification. Wood Science and Technology, 6 (4): 251-62, 1972.
- BOYD, J.D. Compression wood force generation and functional mechanics. New Zealand Journal of Forestry Science, 3 (2): 240-58, 1973a.
- BOYD, J.D. Helical fissures in compression wood cells: causative factors and mechanics of development. Wood Science and Technology, 7 (2): 92-111, 1973b.

- BOYD, J.D. Relating lignification to microfibril angle differences between tangential and radial faces of all wall layers in wood cells. Drevarsky Vyskum, 19 (2): 41-54, 1974.
- BOYD, J.D. Relationship between fibre morphology and shrinkage of wood. Wood Science and Technology, 11 (1): 3-22, 1977a.
- BOYD, J.D. Basic cause of differentiation of tension wood and compression wood. Australian Forest Research, 7 (3): 121-43, 1977b.
- BOYD, J.D. Relationship between fibre morphology, growth strains and physical properties of wood. Australian Forest Research, 10 (4): 337-60, 1980.
- BOYD, J.D. Biophysical control of microfibril orientation in plant cell walls: aquatic and terrestrial plants including trees. Hingham, Massachusetts, USA, Kluwer Academic Publishers, 1985a. n.p.
- BOYD, J.D. The key factor in growth stress generation in trees - Lignification or crystallisation?. IAWA Bulletin, 6 (2): 139-50, 1985b.
- BOYD, J.D. & FOSTER, R.C. Tracheid anatomy changes as responses to changing structural requirements of the tree. Wood Science and Technology, 8 (2): 91-105, 1974.
- BOYD, J.D. & FOSTER, R.C. Microfibrils in primary and secondary wall growth develop trellis configurations. Canadian Journal of Botany, 53 (23): 2687-701, 1975.
- BOYD, J.D. & SCHUSTER, K.B. Tree growth stresses - Part IV: Visco-elastic strain recovery. Wood Science and Technology, 6 (2): 95-120, 1972.
- BRASIL, M.A.M. & FERREIRA, M. Variação da densidade básica e das características das fibras em *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden ao nível do DAP. IPEF (5): 81-90, 1972.
- BRITO NETO, O. de. Desdobro: Equipamentos e métodos. São Paulo, S.P., Associação Brasileira de Preservadores de Madeira, 1985. p. 80-90. (Boletim ABPM nº 36).
- BUCUR, V. Relations between the tangential diameter of increment borer cores and the velocity of ultrasound. Holzforschung, 36 (3): 137-41, 1982.
- BUCUR, V. Elastic constants for wood by an ultrasonic method. Wood Science and Technology, 18: 255-65, 1984.
- BYRNES, F.E. & ARCHER, R.R. Calculation of residual strains in log ends due to crosscutting. Wood Science, 10 (2): 81-4, 1977.
- CARLI, E.M. Metrologia dimensional. SENAI, Curitiba, 1964. 5p. (Traduzido do original francês da coleção "Chevalier" Fascículo 13, 2ª ed. por CHEVALIER, A. & LABURTE, L.).
- CHAFE, S.C. Radial dislocations in the fibre wall of *Eucalyptus regnans* trees of high growth stress. Wood Science and Technology, 11 (1): 69-77, 1977.
- CHAFE, S.C. Wood hardness as a poor indicator of growth stress. Australian Forest Research, 9 (2): 147-8, 1979a.

- CHAFE, S.C. Growth stress in trees. Australian Forest Research, 9 (3): 203-23, 1979b.
- CHAFE, S.C. Variations in longitudinal growth stress, basic density and modulus of elasticity with height in the tree. Australian Forest Research, 11 (1): 79-82, 1981.
- CHAFE, S.C. Variation in longitudinal growth stress with height in trees of *Eucalyptus nitens* Maiden. Australian Forest Research, 15 (1): 51-5, 1985.
- CHARDIN, A.; LAFOND, C.; SALES, C. & THIEL, J. Etude des espèces a fortes contraintes de croissance de la forêt naturelle de Guyane. Nogent-sur-Marne. France, Centre Technique Forestier Tropical, s.d. 17p.
- CHARDIN, A. & SALES, C. Species developing a high level of growth stresses: A method to determine the distribution of longitudinal stresses and its application in French Guyana to the study of wapa (*Eperma* sp.). Proceedings 37th Forest Products Research Society Meeting, Norfolk, Virginia, USA, 1983a. 17p.
- CHARDIN, A. & SALES, C. Species developing a high level of growth stresses: A method of measure and its possible use to study the consequence on wood quality. Proceedings IUFRO-Division V, Madison, Wisconsin, 1983b. 19p.
- CHARDIN, A. & SALES, C. Species developing growth stresses in the forest of French Guyana. Proceedings IUFRO - V.P5 01 00 Meeting Manaus, Brazil, 1984. 12p.
- CLARKE, S.H. Stresses and strains in growing timber. Forestry, 13 (1): 68-79, 1939.
- COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. Maderas: acondicionamiento de las maderas destinadas a los ensayos físicos y mecánicos. COPANT 459, 1972.
- COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. Maderas: método de determinación de la humedad. COPANT 460, 1972a.
- COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. Maderas: método de determinación del peso específico aparente. COPANT 461, 1972b.
- COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. Maderas: método de determinación de la contracción. COPANT 462, 1972c.
- COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. Maderas: método de determinación del cizallamiento paralelo al grano. COPANT 463, 1972d.
- COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. Maderas: método de determinación de la compresión axial o paralela al grano. COPANT 464, 1972e.
- COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. Maderas: método de determinación de la dureza. COPANT 465, 1972f.
- COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. Maderas: método de determinación de la compresión perpendicular al grano. COPANT 466, 1972g.

- COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. Maderas: Descrição Macroscópica, Microscópica e Geral da Madeira - Esquema 1 de Recomendação. COPANT, 30, 1973a.
- COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. Maderas: método de ensayo de flexión estática. COPANT 555, 1973b.
- COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. Maderas: método de ensayo de resistencia al clivaje. COPANT 741, 1975a.
- COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. Maderas: método de ensayo de tracción perpendicular al grano. COPANT 743, 1975b.
- CONRADIE, W.E. Utilization of South African grown *Eucalyptus grandis* (W. Hill. ex Maiden) as veneer logs. Part I. Control of end-splitting in veneer logs. C.S.I.R., 1980. n.p. (Special Report, Hout 206).
- CURRÓ, P. & CIVIDINI, R. Preliminary observations on growth stresses in eucalypts. Proceedings FAO - 2nd world *Eucalyptus* Conference, São Paulo, Brazil, 1961. (Reports and Documents 2: 1123-33).
- DINWOODIE, J.M. Growth stresses in timber - A review of literature. Forestry, 39 (2): 162-70, 1966.
- DOI, O. & KATAOKA, K. Measurement of three principal residual stresses in a polar - anisotropic cylinder: principal residual stresses in a log. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 33 (249): 667-772, 1967.
- ESALQ-USP, Densidade básica - Subsídios para amostragem (1ª Parte). Piracicaba, S.P. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - ESALQ, Universidade de São Paulo - USP, 1983. 4p. (Informações nº 1).
- FAO. El eucalipto en la repoblación forestal. Roma , 1981. 723p.
- FERNANDES, P.S. Variações de densidade da madeira e suas relações com as tensões de crescimento em progênies de *Eucalyptus urophylla* S. t. Blacke. Piracicaba, São Paulo. 1982. 85P. Dissertação, Mestre, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo.
- FERRAND, J.C. Research on practical solutions of problems associated with growth stresses in forest trees. Nancy, France, 1981. n.p. Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Lorraine.
- FERRAND, J.C. Study of growth stresses. I. Measurements method on increment cores. Annales des Sciences Forestières, 39 (2): 109-42, 1982a.
- FERRAND, J.C. A miniature two-ways extensometric sensor. Annales des Sciences Forestières, 39 (2): 143-9, 1982b.
- FERRAND, J.C. Study of growth stresses. 2. Variations of growth stresses of beech. Annales des Sciences Forestières, 39 (3): 187-218, 1982c.

- FERREIRA, M. Variação da densidade básica da madeira de povoamentos comerciais de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden nas idades de 11, 12, 13, 14 e 16 anos. IPEF, (4): 65-89, 1972.
- FERREIRA, C.A.; FREITAS, M. de & FERREIRA, M. Densidade básica da madeira de plantações comerciais de Eucaliptos, na região de Mogi-Guaçu (S.P.) IPEF, (18): 106-17, 1979.
- GILLIS, P.P. Theory of growth stresses. Holzforschung, 27 (6): 197-207, 1973.
- GILLIS, P.P. & HSU, C.H. An elastic, plastic theory of longitudinal growth stresses. Wood Science and Technology, 13 (2): 97-115, 1979.
- GIORDANO, G. & CURRÓ, P. Internal tensions in trees, logs and sawn timber. Bois et Forêts des Tropiques, 145: 39-48, 1972.
- GIORDANO, G. & CURRÓ, P. Observations concerning unusual methods for reducing damage from growth stresses in Eucalyptus sawn timber. Proceedings IUFRO-5 Meeting South Africa, 1973. (Reports and Documents 2: 322-5).
- GIORDANO, G.F.; CURRÓ, P. & GHISI, G. Contribution to the study of internal stresses in the wood of *Eucalyptus*. Wood Science and Technology, 3 (1): 1-13, 1969.
- GIORDANO, G. & GHISI, G. Contribution to the study of growth stresses in Eucalyptus. Proceedings IUFRO-41 Meeting, Melbourne, Australia, 1965. 6p.
- GROZDITS, G.A. & IFJU, G. Development of tensile strength and related properties in differentiating coniferous xylem. Wood Science, 1 (3): 137-47, 1969.
- GUÉNEAU, P. Growth stresses. Method of field measurement sampling, initial results. Internal Report of the Centre Technique du Bois, 1973. n.p.
- GUÉNEAU, P. & CHARDIN, A. Growth stresses. Nogent-sur-Marne, France, Centre Technique Forestier Tropical, 1973. 52p. (Cahiers Scientifiques n°3).
- GUÉNEAU, P. & KIKATA, Y. Contraintes de croissance. Revue Bois et Forêts des Tropiques, 149: 21-30, 1973.
- GUÉNEAU, P. & SAURAT, J. Growth stresses- forest measurement. France, Centre Technique du Bois, 1974. 115p. (Rapport n° 1).
- HALL, G. Some mechanical and nutritional aspects of cambial increment distribution in red pine. New Haven, Connecticut, 1967. n.p. Doctoral dissertation, Yale University.
- HALLOCK, H. Sawing to reduce warp of loblolly pine studs. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1965. 52p. (N. FPL 51).
- HALLOCK, H. Growth stresses and lumber warp in loblolly pine. Forest Products Journal, 16 (2): 48-52, 1966.
- HANS, A.S.; BURLEY, J. & WILLIAMSON, P. Wood quality in *Eucalyptus grandis* (Hill) Maiden, grown in Zambia. Holzforschung, 26 (4): 138-41, 1972.

- HARDIE, D.K. Defects in the wood of fast-grown *Eucalyptus grandis* in Zambia. Commonwealth Forestry Review, 53 (4): 310-7, 1974.
- HASLETT, A.N. & KININMONTH J.A. Utilization of New Zealand - grown Eucalypts. New Zealand, Forest Research Institute, 1984. 4p. (What's New No. 122).
- HILLIS, W.E. Growth stress variation in *Criptocaria erythroxylon* due to seasonal effect. s.d. (Personal Communication to CHAFE, 1979b).
- HILLIS, W.E. & BROWN, A.G. Eucalyptus for wood production. Melbourne, CSIRO, 1978. 434p.
- HUGHES, F.E. Tension wood: A review of literature I. Forestry Abstracts, 26 (1): 2-9, 1965a.
- HUGHES, F.E. Tension wood: A review of literature II. Forestry Abstracts, 26 (2): 179-86, 1965b.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL. Madeiras da Amazônia - características e utilização. Brasília, 1981. 113p. (V.1 - Floresta Nacional do Tapajós).
- INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL. Madeiras da Amazônia - características e utilização. Brasília, 1988. 236p. (V.2 - Estação Experimental de Curuá-Una).
- INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SÃO PAULO. Características físico-mecânicas da madeira de Eucalipto. s.d. p. 1.134-37.
- JACOBS, M.R. The fibre tension of woody stems, with special reference to the genus *Eucalyptus*. Canberra, Australia, by authority: L.F. Johnston, Commonwealth Government Printer, 1938. 39p. (Bulletin n° 22).
- JACOBS, M.R. Further studies on fibre tension. Canberra, Australia, by authority: L.F. Johnston, Commonwealth Government Printer, 1939. 36p. (Bulletin n° 24).
- JACOBS, M.R. The growth of woody stems. Canberra, Australia, by authority: L.F. Johnston, Commonwealth Government Printer, 1945. 67p. (Bulletin n° 28).
- JACOBS, M.R. Silvicultural problems in the mixed eucalypt forests of the east coast of Australia. The Empire Forestry Review, 33 (1): 30-41, 1954.
- JACOBS, M.R. Stresses and strains in tree trunks as they grow in length and width. Canberra, Australia, Forestry and Timber Bureau, 1965. 15p. (Leaflet n° 96).
- JACOBS, M.R. O que o eucalipto pode fazer pelo Brasil. Rio de Janeiro, Projeto de Desenvolvimento e Pesquisa Florestal PNUD/FAO/IBDF/BRA-45, 1973. 23p. (Série Técnica, n° 2).
- JESUS, R.M. de & VITAL, B.R. Comparação entre densidades de matrizes e de clones de *Eucalyptus grandis*. Revista Árvore, 10 (1): 82-90, 1986.
- KIKATA, Y. The effect of lean on level of growth stress in *Pinus densiflora*. Journal of the Japan wood Research Society, 18 (9): 443-9, 1972.

- KIKATA, Y. Growth stress of tropical wood. Mokuzai Kogyo (Wood Industry), 29 (3): 17-9, 1974a.
- KIKATA, Y. Growth stress of tropical wood (2). Mokuzai Kogyo (Wood Industry), 29 (5): 16-9, 1974b.
- KIKATA, Y. Comunicação particular a SAURAT & GUÉNEAU, 1976. 1974c.
- KIKATA, Y. & MIWA, K. A modified hole-drilling technique for determining residual stresses (growth stresses) in tree trunks. Journal of the Society of Materials Science Japan, 26 (284): 429-32, 1977.
- KOEHLER, A. A new hypothesis as to the cause of shakes and rift cracks in green timber. Journal of Forestry, 31 (5): 551-6, 1933.
- KOLLMANN, F.F.P. Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Band I. Berlin, Springer-Verlag, 1951. 1050p.
- KOLLMANN, F.F.P. & COTÉ, J.R., W.A. Principles of wood Science and technology. I. Solid wood. Berlin, Springer Verlag, 1968. 529p.
- KORZENIOWSKY, A.M. Investigation of the longitudinal growth stress magnitude and distribution in *Eucalyptus grandis* stems. Zambia, Division of Forest Products Research, 1970. n.p. (Unpublished Report).
- KRABBE, G. About growth of annual rings and of young wood cells as function of pressure under consideration of stress exerted by bark. Abhandlungen der Königlichen Akademie der wissenschaften zu Berlin, 1-83, 1885.
- KRAHMER, R.L. & SNODGRASS, J.D. Selected physical properties of wood in a forest. Forest Products Journal, 17 (3): 21-9, 1967.
- KRAUS, G. Tissue stresses in stems and their effects. Botanische Zeitung, 25 (14-18): 105-42, 1967.
- KREMPL, H. Studies on spiral grain in spruce. Mitteilungen der Forstlichen Bundes - Versuchsanstalt wien, 89: 55-, 1970.
- KRILOV, A. & ADES, P. Longitudinal growth stresses in a *Eucalyptus grandis* progeny trial. For. Comm. of N.S.W, 1985. (Internal Report 1068).
- KUBLER, H. Studies on growth stresses in trees. I. The origin of growth stresses and the stresses in transverse direction. Holz als Roh-und werkstoff, 17 (1): 1-9, 1959a.
- KUBLER, H. Studies on growth stresses in trees. 2. Longitudinal stresses. Holz als Roh-und Werkstoff, 17 (2): 44-54, 1959b.
- KUBLER, H. Role of moisture in hygrothermal recovery of wood. Wood Science, 5 (3): 198-204, 1973a.
- KUBLER, H. Hygrothermal recovery under stress and release of inelastic strain, Wood Science, 6 (1): 78-86, 1973b.

- KUBLER, H. Growth stresses in trees and related wood properties. Forest Products Abstracts, 10 (3): 61-119, 1987.
- KUBLER, H & CHEN, T.H. How to cut tree disks without formation of checks. Forest Products Journal, 24 (7): 57-59, 1974.
- KUBLER, H.; LIAN, G.L. & CHANG, L.S. Thermal expansion of moist wood. Wood and Fiber, 5 (3): 257-67, 1973.
- LAKE, B.R.; APPL, F.J & BERT, C.W. An investigation of the hole drilling technique for measuring planer residual stress in rectangularly orthotropic materials. Exp Mech, 233-39, 1970.
- LENZ, D. & STRASSLER, H.J. Contribution to the study of the splitting of beech logs (*Fagus sylvatica* L.). Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das Forstliche Versuchswesen, 35 (5): 369-411, 1959.
- LISBÔA, C.D.J. Considerações sobre a determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira. Brasília, D.F., Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, s.d. 82p. Inédito.
- LUTZ, J.F. & PANZER, H.R. Potential of Brazil-nut for use as veneer. Madison, USDA Forest service, 1969. (Unpublished).
- MAEGLIN, R.R. Yellow-poplar studs by S-D-R. Southern Lumberman, 237 (2944): 58-60, 1978.
- MAEGLIN, R.R. & BOONE, R.S. High quality studs from small hardwoods by the S-D-R Process. Proceedings 23rd Annual Joint Meeting of the Midwest and Wisconsin - Michigan wood Seasoning Associations, Michicot, Wisconsin, 1980. p. 36-51.
- MAEGLIN, R.R. & BOONE, R.S. Manufacture of quality yellow-poplar studs using the saw-dry-rip (S-D-R) concept. Forest Products Journal, 33 (3): 10-18, 1983.
- MAEGLIN, R.R.; LIU, J.Y. & BOONE, R.S. High-temperature drying and equalizing: Effects on stress relief in yellow-poplar lumber. Wood and Fiber Science, 17 (2): 240-53, 1985.
- MALAN, F.S. The Control of end splitting in sawlogs: a short literature review. South African Forestry Journal, (109): 14-18, 1979.
- MALAN, F.S. Shrinkage and density of mature *E. grandis* (HILL ex MAIDEN) grown in the Letaba District of Northern Transvaal. Pretoria, South Africa, 1982. 17p. (CSIR Special Report HOUT/251).
- MALAN, F.S. Studies on the phenotypic variation in growth stress intensity and its association with tree and wood properties of South African grown *Eucalyptus grandis* (Hill. ex Maiden). Stellenbosch, South African, 1984. 258p. Doctor of Philosophy thesis, University of Stellenbosch.
- MALAN, F.S. Wood property variation in South grown *Eucalyptus grandis* trees of varying growth stress intensity. Australian C.S.I.R.O. Bulletin, 221: 14-32, 1985.

- MARIAUX, A. Growth stress and fine structure - growth stresses measured on standing trees in relation with fine structure in *Epera* sp. Pl in French Guyana. France, Centre Tech. For. Trop., Nogent-sur-Marne, France, 1981. 23p.
- MARIAUX, A. & VITALIS-BRUN. A Relationship between fine structure in wapa and growth stresses. Bois et Forêts des Tropiques, 199: 43-56, 1983.
- MARTLEY, J.F. Theoretical calculations of the pressure distribution on the basal section of a tree. Forestry, 2 (1): 69-72, 1928.
- MATTHECK, C. & WALTHER, F. A new technique to avoid end-splitting of deciduous trees. Karlsruhe, Germany, Karlsruhe Nuclear Research Centre, Institute for Materials Research II, 1991. 12p.
- MAYER-WEGELIN, H. Tensions and tension splitting in standing and in felled logs. Mitt Österr Ges Holzforsch, 7 (2): 11-17, 1955. (CSIRO Australia Trans. 2749).
- MAYER-WEGELIN, H. & MAMMEN, E. Stresses and splits from stresses in beech logs. Allgemeine Forst-und Jagdzeitung, 125 (9): 287-97, 1954.
- METHAR, J. Determination of initial stresses by measuring the deformation around drilled holes. Trans ASME, 56: 249-54, 1934.
- MEYLAN, B.A. Reaction wood in pseudo-wintera colorata, a vesselless dicotyledon. Wood Science and Technology, 15: 81-92, 1981.
- MILANEZ, F.R. & BASTOS, A. de M. Glossário dos termos usados em anatomia de madeiras. Rio de Janeiro, Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 1960. 27p.
- MONTAGNA, R.G.; ASSINI, J.L. & PONCE, R.H. Desdobro de eucalipto visando a diminuir o efeito das tensões de crescimento. Anais - 6º Congresso Florestal Brasileiro, 3: 712-14, 1990.
- MÜNCH, E. Entstehungsursachen und wirkung des Druck-und Zugholzes der Bäume. Forst. Wochenschr Silva, 15: 337-41, 345-50, 1937.
- MÜNCH, E. Statics and dynamics of the cell wall's spiral structure, especially in compression wood and tension wood. Flora, 32: 357-424, 1938.
- MUÑIZ, G.I.B. Caracterização e desenvolvimento de modelos para estimar as propriedades e o comportamento na secagem da madeira de *Pinus elliotii* Engelm e *Pinus taeda* L. Curitiba, 1993. 236p. Tese, Doutor em Ciências Florestais, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- NATRELLA, M.G. Experimental statistics. Washington, U.S. Government Printing Office, 1966. (National Bureau of Standards Handbook 91).
- NICHOLSON, J.E. A rapid method for estimating logitudinal growth stresses in logs. Wood Science and Technology, 5 (1): 40-8, 1971a.
- NICHOLSON, J.E. A study of longitudinal growth stress in *Eucalyptus regnans*. Australia, 1971b, n.p. Ph.D. Thesis, Australian National University.

- NICHOLSON, J.E. Effect of storage on growth stress in mountain ash logs and trees. Australian Forestry, 36 (2): 114-24, 1973a.
- NICHOLSON, J.E. Growth stress differences in Eucalypts. Forest Science, 19 (3): 169-74, 1973b.
- NICHOLSON, J.E. Investigação sobre a variação das deformações de crescimento longitudinais com a altura da árvore. s.d. (Trabalho não publicado, citado por KUBLER, 1987 - 73).
- NICHOLSON, J.E.; BARNACLE, J.E. & LESSE, P.F. Evidence of residual stress in small sections of ordinary green *Eucalyptus regnans*. Wood Science and Technology, 7 (1): 20-8, 1973.
- NICHOLSON, J.E.; CAMPBELL, G.S. & BLAND, D.E. Association between wood characteristics and growth stress level: A preliminary study. Wood Science, 5 (2): 109-12, 1972.
- NICHOLSON, J.E. & DITCHBURNE, N. Shrinkage prediction based on analysis of three wood properties. Wood Science, 6 (2): 188-9, 1973.
- NICHOLSON, J.E.; HILLIS, W.E. & DITCHBURNE, N. Some tree growth-wood property relationships of eucalypts. Canadian Journal of Forest Research, 5 (3): 424-32, 1975.
- NIKOLOV, S. Biological internal stresses in wood of *Fagus Sylvatica*. Nauchni Trudove, Mekhanichna Tekhnologiya na Durvesinata, Vissh Lesotekhnicheski Institut, Sofiya, 15: 21-3, 1967.
- NIKOLOV, S.; VIDELOV, H. & EVTIMOV, G. Biological internal stresses in the wood of some coniferous species. Nauchni Trudove, Mekhanichna Tekhnologiya na Durvesinata. Vissh Lesotekhnicheski Institut, Sofiya, 16 : 17-24, 1968.
- NOACK, D. Evaluation of properties of tropical timbers. Hamburg, 1970. p. 17-23. (Trabalho apresentado na primeira reunião da IUFRO, no Grupo de Trabalho de "Propriedades e utilização de Madeiras Tropicais").
- OHSAKO, Y. & YAMADA, T. Studies on viscoelastic properties and growth stresses in branch of buna-wood (*Fagus crenata* Blume). Wood Research Institute Kyoto Bulletin, 45: 36-45, 1968.
- OKUYAMA, T.; KAWAI, A.; KIKATA, Y. & SASAKI, Y. Growth stresses and uneven gravitational-stimulus in trees containing reaction wood. Mokuzai Gakkaishi, 29 (3): 190-6, 1983.
- OKUYAMA, T. & KIKATA, Y. The residual stresses in wood logs due to growth stresses. Journal of the Japan wood Research Society, 21 (5): 326-27, 1975a.
- OKUYAMA, T. & KIKATA, Y. The residual stresses in wood logs due to growth stresses. Journal of the Japan wood Research Society, 21 (6): 335-41, 1975b.
- OKUYAMA, T. & KIKATA, Y. The residual stress distributions in wood log measured by "thin layer removal method". Journal of the Society of Materials Science Japan, 24 (264): 845-48, 1975c.

- OKUYAMA, T. & KIKATA, Y. The generation process of the growth stress and residual stress. Proceedings IUFRO Meeting Kyoto, Japan, 1981. 23p. (Voluntary paper).
- OKUYAMA, T. & SASAKI, Y. The residual stresses in wood logs due to growth stresses. IV. The growth stresses piled in the trunk. Mokuzai Gakkaishi, 24 (2): 77-84, 1978.
- OKUYAMA, T. & SASAKI, Y. Crooking during lumbering due to residual stresses in the tree. Mokuzai Gakkaishi, 25 (11): 681 - 7, 1979.
- OKUYAMA, T.; SASAKI, Y.; KIKATA, Y. & KAWAI, N. The seasonal change in growth stress in tree trunk. Mokuzai Gakkaishi, 27 (5): 350-5, 1981.
- OKUYAMA, T.; YAMAMOTO, H.; YOSHIDA, M.; HATTORI, Y. & ARCHER, R.R. Growth stresses in tension wood of some hardwood species. Proceedings IUFRO-5 Meeting Nancy, France, 1992. 12p.
- PERKITNY, T.; WOJCIECHOWSKI, E. & WNUK, M. Splitting of Beech boles and logs. Warsaw, Poland, Prace Instytutu Badawczego Lesnictwa, 1951. 59p. (n° 68).
- PERRIN, J.P. & FERRAND, J.C. Fully automated devices for measurement of wood density, shrinkage and growth strains on increment cores. Annales des Sciences Forestières, 41 (1): 69-86, 1984.
- PLATON, V. Internal stresses in beech wood and means for their reduction. Industria Lemnului, 7 (12): 441-47, 1959.
- POLGE, H. Influence of the thinning regime on growth stresses in beech. Annales des Sciences Forestières, 38 (4): 407-23, 1981.
- POLGE, H. Growth stresses in forest trees. Comptes Rendus des Séances de l'Académie d'Agriculture de France, 68 (17): 1307-16, 1982.
- POLGE, H. & THIERCELIN, F. Growth stress appraisal through increment core measurements. Wood Science, 12 (2): 86-92, 1979.
- PONCE, R.H. Tensões de crescimento. São Paulo, 1987. Entrevista concedida a C.D.J. Lisboa.
- PONCE, R.H. Eucaliptos, alternativa para os moveleiros. SILVICULTURA, 43: 30-2, 1992.
- PONCE, R.H. Eucalipto como madeira serrada. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., 1993. 22p.
- POST, I.L. An investigation of the longitudinal growth stresses in trees. Syracuse, N.Y., 1979a. 108p. Ph.D. thesis, State University of N.Y., College of Environmental Science & Forestry.
- POST, I.L. An incremental longitudinal growth stress distribution model. Holzforschung, 33 (4): 107-11, 1979b.
- POST, I.L.; ATHERTON, C.P.; VENDHAN, C.P. & ARCHER, R.R. An extension of Jacobs method for measuring residual growth strains in logs. Wood Science and Technology, 14 (4): 289-96, 1980.

- PRESTON, R.D. Fine structure of the wall of the conifer tracheid. II. Optical properties of dissected walls of *Pinus insignis*. Proceeding Royal Society, B 134: 202-18, 1947.
- PRIEST, D.T.; KNUFFEL, W.; MALAN, F. & RENSBURG, M. van. The sawmilling and timber properties of 12 and 24 years old plantation grown *E. grandis*. Pretoria, Africa do Sul, National Timber Research Institute, 1981. 34p. (CSIR Special Report HOUT/222).
- PRIEST, D.T.; SINGMIN, M. & NIEKERK, J.P. The influence of sawing techniques on the occurrence of end splitting and heart shake in *E. grandis* sawn timber. Pretoria, South Africa, National Timber Research Institute, 1984. 14p. (CSIR Special Report HOUT/333).
- QUIRK, J.T. & FREESE, F. Effect of mechanical stress on growth and anatomical structure of red pine: compression stress. Canadian Journal of Forest Research, 6 (2): 195-202, 1976.
- RENDLER, N.J. & VIGNESS, I. Hole drilling strain gage method of measuring residual stresses. Exp Mech, 6: 577, 1966.
- SACHS, G. Der Nachweis innerer Spannungen in Stangen und Rohren. Z Metallkunde, 19: 352-57, 1927.
- SALES, C.G. Main results obtained on the study of some Guyana species and consequences for end use. Proceedings IUFRO Meeting Lyubljana, 1986. 15p.
- SASAKI, Y.; OKUYAMA, T. & KIKATA, Y. The evolution process of the growth stress in the tree. The surface stresses on the tree. Mokuzai Gakkaishi, 24 (3): 149-57, 1978.
- SASAKI, Y. OKUYAMA, T. & KIKATA, Y. Determination of the residual stress in a cylinder of inhomogeneous anisotropic material. I. Mokuzai Gakkaishi, 27 (4): 270-6, 1981a.
- SASAKI, Y.; OKUYAMA, T. & KIKATA, Y. Determination of the residual stress in a cylinder of inhomogeneous anisotropic material. II. Mokuzai Gakkaishi, 27 (4): 277-82, 1981b.
- SAURAT, J. Determination of internal stresses in a block of beech. Paris, France, Centre Technique du Bois, 1977. 179p. (Rep CTB Serv Comm Rech Essais, Lab Rheol).
- SAURAT, J. & GUÉNEAU, P. Growth stresses in beech. Wood Science and Technology, 10 (2): 111-23, 1976.
- SCOTT, M.H. The utilization of South African grown *Eucalyptus saligna*. Pretoria, Dept. of Forestry, Govt. Printer Pretoria. South Africa, 1950. 15p. (Bulletin n° 34).
- STOCKMANN, V.E. Developing a hypothesis: native cellulose elementary fibrils are formed with metastable structure. Biopolymers, 11 (1): 251-70, 1972.
- STÖHR, H.P. & MACKAY, D. Wood Characteristics of Young *E. grandis* grown at Wilgeboom plantation Eastern Transvaal. Pretoria, South Africa, Council for Scientific and Industrial Research, 1983. 28p. (CSIR Special Report HOUT/278).
- SWACZYNA, I. The effect of Cross-Cutting on deformation and splits in beech roundwood. Holztechnologie, 19 (3): 151-5, 1978.

- SWACZYNA, I. The effect of conversion and steaming on the deformation of green beech wood. Holztechnologie, 20 (1): 17-22, 1979a.
- SWACZYNA, I. Influence of splitting on the degree and the position of linear deformations in sawing edge-grained boards. Holztechnologie, 20 (3): 158-61, 1979b.
- TANTICHAIBORIBOON, V. & COOK, R.D. Studies on effect of shape of cut on growth-stress induced cracking in cut timber. Part I: Three dimensional stress analysis. Wood Science and Technology, 11 (3): 237-47, 1977a.
- TANTICHAIBORIBOON, V. & COOK, R.D. Studies on effect of shape of cut on growth-stress induced cracking in cut timber. Part II: Optimization of axisymmetric cuts. Wood Science and Technology, 11 (4): 305-12, 1977b.
- TAYLOR, F.W. Within and between tree variability of wood properties in *Eucalyptus grandis* (Hill ex Maiden). Pretoria, South Africa, Council for Scientific and Industrial Research, 1972. 13 p. (CSIR Contract Report C/HOUT 83).
- TAYLOR, F.W. Differences in the wood of *Eucalyptus grandis* grown in different parts of South Africa. Pretoria, South Africa, Council for Scientific and Industrial Research, 1973a. 8p. (CSIR Special Report Hout/75).
- TAYLOR, F.W. Anatomical wood properties of South African grown *Eucalyptus grandis*. South African Forestry Journal, 84: 20-4, 1973b.
- THOMAS, M. Plant Physiology - CHURCHIL: London. 1937.
- TIMELL, T.E. Studies on opposite wood in conifers - Part II: Histology and ultrastructure. Wood Science and Technology, 7: 79-91, 1973.
- TIMELL, T.E. Review of book: xylem cell development. Wood Science Technology, 16: 268, 1982.
- TOIT, A.J. du. Probable causes of compression wood formation. Forestry in South Africa, 4: 25-35, 1964.
- TRENARD, Y. & GUÉNEAU, P. Relation between longitudinal growth stresses and tension wood in *Fagus Sylvatica*. Holzforchung, 29 (6): 217-23, 1975.
- U.S. FOREST PRODUCTS LABORATORY. Wood handbook. Washington, U.S. Department of Agriculture, 1974. (Agriculture handbook, n^o 72).
- VENDHAN, C.P. & ARCHER, R.R. Relief of growth stresses in diametral planks. Holzforchung, 31 (3): 90-6, 1977.
- VENDHAN, C.P. & ARCHER, R.R. Relief of asymmetric growth stresses in logs. Holzforchung, 32 (4): 123-7, 1978.
- VIANNA NETO, J.A.A. Desdobro de *Eucalyptus* spp. Setor de Desenvolvimento Tecnológico. Indústrias Klabin do Paraná, 1986. 28p. (Relatório Técnico - SDT - 007/86).
- VIDELOV, Kh. Investigation of the internal transverse biological stresses in the wood of some conifer species. Nauchni Trudove, Mekhanichnaya Tekhnologiya na Durversinata, Vissh Lesotekhnicheski Institut, Sofiya, 22, 15-24, 1977.

- VUUREN, N.J.J. Van; BANKS, C.H. & STÖHR, H.P. Shrinkage and density of timbers used in the Republic of South Africa. Pretoria, Republic of South Africa, 1978. 55p. (Bulletin n° 57).
- VYK, J.L. van. Hardwood sawmilling can have a bright future in South Africa. South Africa Forestry Journal, (107): 47-53, 1978.
- WARDROP, A.B. The nature of reaction wood. V. The distribution and formation of tension wood in some species of *Eucalyptus*. Australian Journal of Botany, 4: 152-66, 1956.
- WARDROP, A.B. The formation and function of reaction wood. In. CÔTÉ, W.A. Cellular ultrastructure of wood plants. Syracuse, Syracuse University Press., 1965. 373-90.
- WARDROP, A.B. & DADSWELL, H.E. The nature of reaction wood. IV. Variations in cell wall organization in tension wood fibres. Australian Journal of Botany, 3: 177-89, 1955.
- WATANABE, H. Internal stresses in tree stems of sugi and hinoki. Journal of the Japan Forestry Society, 26: 104-5, 1944.
- WATANABE, H. A study of the origin of longitudinal growth stresses in tree stems. Proceedings IUFRO-41 Meeting Melbourne, Australia, 1965. p.3-17.
- WAUGH, G. Reducing growth stresses in standing trees. Australian Forest Research 7 (4): 215-8, 1977.
- WAUGH, G. Growth stress variation in *Cryptocaria erythroxylo*n due to seasonal effect. s.d. (Personal Communication to CHAFE, 1979b).
- WILHELMY, V. & KUBLER, H. Stresses and checks in log ends from relieved growth stresses. Wood Science, 6 (2): 136-42, 1973a.
- WILHELMY, V. & KUBLER, H. Probe for measurement of strains inside solid bodies. Experimental Mechanics, 13 (3): 142-4, 1973b.
- WILKINS, A.P. Nature and origin of growth stresses in trees. Australian Forestry, 49 (1): 56-62, 1986a.
- WILKINS, A.P. The distribution of cell wall deformations in fibres adjacent to rays in *Eucalyptus pilularis*. Wood Science, 20: 229-33, 1986b.
- WILKINS, A.P. & ALEXIOU, P.N. Relationship between fiber cell-wall deformations and longitudinal growth strain: A research note. Wood and fiber Science, 23 (3): 358-62, 1991.
- WILKINS, A.P. & BAMBER, R.K. Dimensional change with time of green increment cores taken for growth stress measurement. Wood and Fiber Science, 18 (4): 593-7, 1986.
- WILSON, B.F. The development of growth strains and stresses in reaction wood. In. BARNETT, J.R. Xylem cell development, Castle House Publ., Kent, 1981. p. 275-90.
- WILSON, B.F. & ARCHER, R.A. Reaction wood: induction and mechanical action. Ann. Rev. Plant Physiol., 28: 23-43, 1977.

YAO, J. Relationships between height and growth stresses within and among white ash, water oak, and shagbark hickory. Wood Science, 11 (4): 246-51, 1979.

ZASADA, J.C. & ZAHNER, R. Vessel element development in the earlywood of red oak (*Quercus rubra*). Canadian Journal of Botany, 47 (10): 1965-71, 1969.