

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

COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS
EM PEÇAS DE MADEIRA

Eng^o Dener Gonçalves Prata
Dissertação apresentada à
Escola de Engenharia de São
Carlos, da Universidade de
São Paulo, como parte dos
requisitos necessários à
obtenção do título de "Mes
tre em Engenharia de Estru
turas".

SÃO CARLOS

COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS
EM PEÇAS DE MADEIRA

Engº Dener Gonçalves Prata

Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos funcionários, professores e colegas do LaMEM de quem recebi dedicação, carinho, estímulo e formação.

Aos Departamentos de Arquitetura e Planejamento (SAP), de Materiais (SMT) e de Estruturas (SET), pela possibilidade de execução dos ensaios na Escola de Engenharia de São Carlos.

À Faculdade de Engenharia de Limeira (FEL-UNICAMP), pelo apoio à realização de ensaios em corpos de prova estruturais.

A Deus, pela permanência em sua fé e pela luz lançada sobre este trabalho.

DEDICATÓRIA

À Elisabete, minha esposa
Helton e Wanda, meus pais

R E S U M O

COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS EM PEÇAS DE MADEIRA

Este trabalho foi desenvolvido com base experimental e visa contribuir para a padronização dos métodos de ensaio e a extensão dos parâmetros obtidos para o cálculo, projeto e execução de peças estruturais de madeira sujeitas às compressão paralela às fibras. São investigadas as influências do tamanho e do comprimento dos corpos de prova em ensaio.

A B S T R A C T

This work was developed in experimental basis and it aims at the standardization of test methods and the extension of attained parameters for the calculus, design and construction of wood structural members subjected to compression parallel to grain. The influences of specimen length and size in the crushing strength were also investigated.

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras romanas minúsculas

a, b_0, b_1, d	dimensões da seção trasnversal de uma barra
f_c	valor da resistência à compressão
f_{cp}	valor da tensão de compressão no limite de proporcionalidade
f_{wc}	resistência à compressão paralela da madeira
f_{wcm}	média das ressitências à compressão paralela obtidos em ensaio
i	raio de giração
l	medida de comprimento
r	medida de aresta da seção na direção radial; raio de esfera
t	medida da aresta da seção na direção tangencial
u	teor de umidade
v	velocidade de ensaio

Letras romanas maiúsculas

A	valor da área da seção transversal
E	módulo de elasticidade
F	razão de variâncias
I	momento de inércia, referido a eixos da seção transversal
M	momento fletor aplicado na seção transversal
N	número de corpos de prova
P	esforço axial de compressão
S	desvio padrão
T	temperatura
X	eixo de referência

Letras gregas minúsculas

γ	coeficiente de ponderação de resistências
ϵ	deformação específica
λ	coeficiente de esbeltez
ν	coeficiente de Poisson
ρ	densidade aparente da madeira
θ	ângulo; variação de temperatura
σ	resistência; tensão normal
ω	coeficiente de ponderação da esbeltez na resistência

Letras gregas maiúsculas

Δ	variação; valor de diferença
----------	------------------------------

SUMÁRIO

Resumo.....	i
Abstract.....	ii
Lista de Símbolos.....	iii
Capítulo 1. INTRODUÇÃO À COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS....	01
1.1. Preliminares.....	01
1.2. Objetivos do Trabalho.....	02
Capítulo 2. REVISÃO DA LITERATURA.....	04
2.1. Estrutura da Madeira.....	04
2.1.1. Microestrutura da Madeira.....	04
2.1.2. Composição Química.....	06
2.1.3. Formação da Parede Celular.....	11
2.2. Métodos de Ensaio.....	12
2.2.1. Preliminares.....	12
2.2.2. As Normas de Ensaio.....	13
2.2.3. Dispositivos de Ensaio.....	20
2.3. Variação do Comprimento e sua Influência na Resistência.....	23
2.4. Variação de Tamanho e sua Influência na Resistência.....	28
2.5. Influência da Umidade e da Densidade na Resistência da Madeira à Compressão Paralela às Fibras.....	35
2.5.1. Umidade e Densidade Aparente.....	35
2.5.2. Relações Entre a Resistência à Compressão Paralela, Umidade e Densidade Aparente.....	36
2.6. Outras Influências Importantes na Resistência da Madeira à Compressão Paralela às Fibras.....	44
2.6.1. Velocidade de Ensaio.....	44
2.6.2. Duração do Carregamento, Fluência e Fadiga.....	46
2.6.3. Variação de Temperatura.....	50
2.6.4. Efeito da Pressão de Confinamento.....	59
Capítulo 3. COMPARAÇÃO ENTRE ALGUNS DISPOSITIVOS PARA O ENSAIO DE COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS.....	62
3.1. Considerações.....	62
3.2. Resultados dos Ensaios.....	65

3.3. Análise Estatística.....	69
3.4. Conclusões.....	90
3.4.1. Valores para Módulos de Elasticidade.....	90
3.4.2. Valores para Limites de Resistência.....	90
3.4.3. Sobre os Dispositivos de Ensaio...	90
3.4.4. A Respeito da Escolha de Dispositivos.....	91
Capítulo 4. VARIACÃO DO TAMANHO DO CORPO DE PROVA E SUA INFLUÊNCIA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS.....	92
4.1. Generalidades.....	92
4.2. Discussão sobre os Métodos.....	93
4.3. Materiais Utilizados.....	94
4.4. Experimentação Complementar.....	113
4.5. Análise dos Resultados.....	114
4.5.1. Análise de Variância-Teste Fischer	114
4.5.2. Avaliação da Influência do Tamanho na Resistência à Compressão Paralela às Fibras.....	116
4.6. Considerações Finais.....	122
Capítulo 5. INVESTIGAÇÃO SOBRE A VARIACÃO DA RESISTÊNCIA E DA ELASTICIDADE DA MADEIRA COM O AUMENTO DE COMPRIMENTO DOS CORPOS DE PROVA.....	123
5.1. Considerações Iniciais.....	124
5.2. Materiais e Métodos Utilizados.....	125
5.3. Resultados dos Ensaios.....	125
5.3.1. Ensaios para Limite da Resistência	125
5.3.2. Ensaios para Módulos de Elasticidade	128
5.4. Análise dos Resultados.....	130
5.4.1. Limites de Resistência.....	130
5.4.2. Módulos de Elasticidade.....	134
5.5. Conclusões.....	136
5.5.1. Limites de Resistência.....	136
5.5.2. Módulos de Elasticidade.....	137
Capítulo 6. ESTUDO DA RESISTÊNCIA DE CORPOS DE PROVA SECCIONADOS.....	138
6.1. Introdução.....	138
6.2. Materiais e Métodos.....	138
6.3. Resultados dos Ensaios.....	139
6.4. Análise dos Resultados.....	140
6.4.1. Valores Relativos.....	140

6.4.2. Análise por Regressão Linear.....	140
6.4.3. Outras Considerações.....	141
6.5. Conclusões.....	143
Capítulo 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES.....	144
LITERATURA CITADA.....	147
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	151
ANEXO I	
ANEXO II	

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO À COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS

1.1. PRELIMINARES

A madeira é um material produzido pela Natureza. São bastante conhecidas as equações químicas que regem a formação da madeira e os elementos que interferem nestas reações.

Em termos de estudo a aplicação dos materiais, a madeira está entre os histórica e quantitativamente mais utilizados. Ainda assim, é dos materiais de descrição analíticas mais complicados, por apresentar nítida anisotropia, tanto opticamente como estruturalmente.

Sinteticamente, a árvore ("fábrica" de madeira) se desenvolve em estratos cônicos superpostos, de espessura e altura variáveis, a cada ciclo do crescimento.

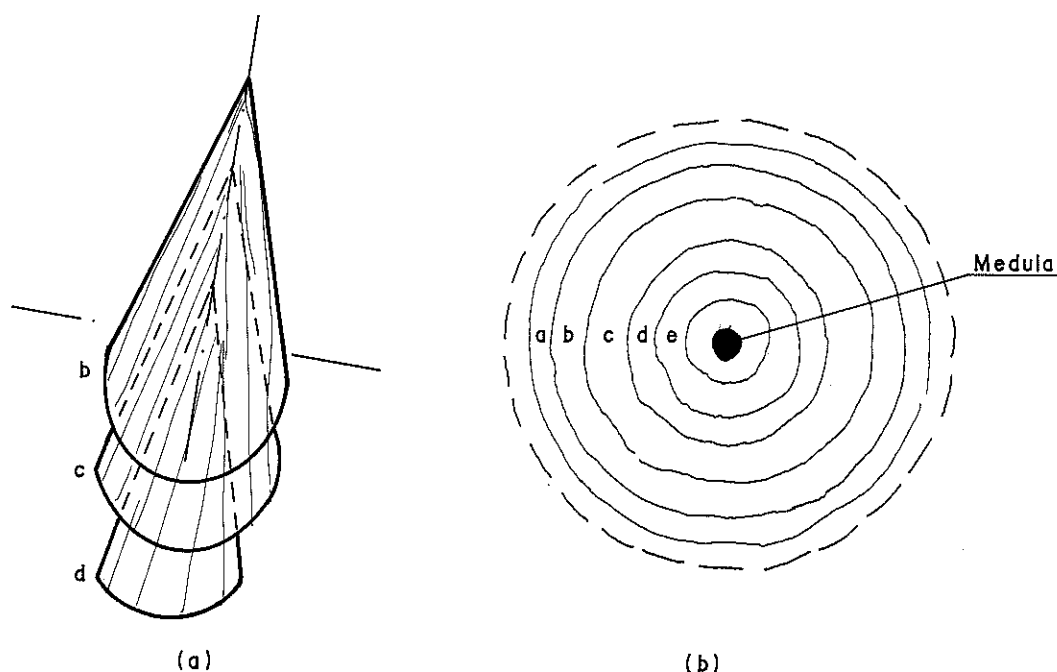


Figura 1.1: Esquema de produção da "fábrica de madeira" - (a) superposição dos cones fibrosos (b) corte transversal dos cones a,b,c...

Na ilustração acima, Figura 1.1(b), vê-se de topo um disco de madeira. Estabelecendo um sistema de coordenadas cilíndricas pode-se

descrever perfeitamente a partir da medula (origem do sistema de eixos) qualquer ponto da árvore, Figura 1.2.(a).⁰²

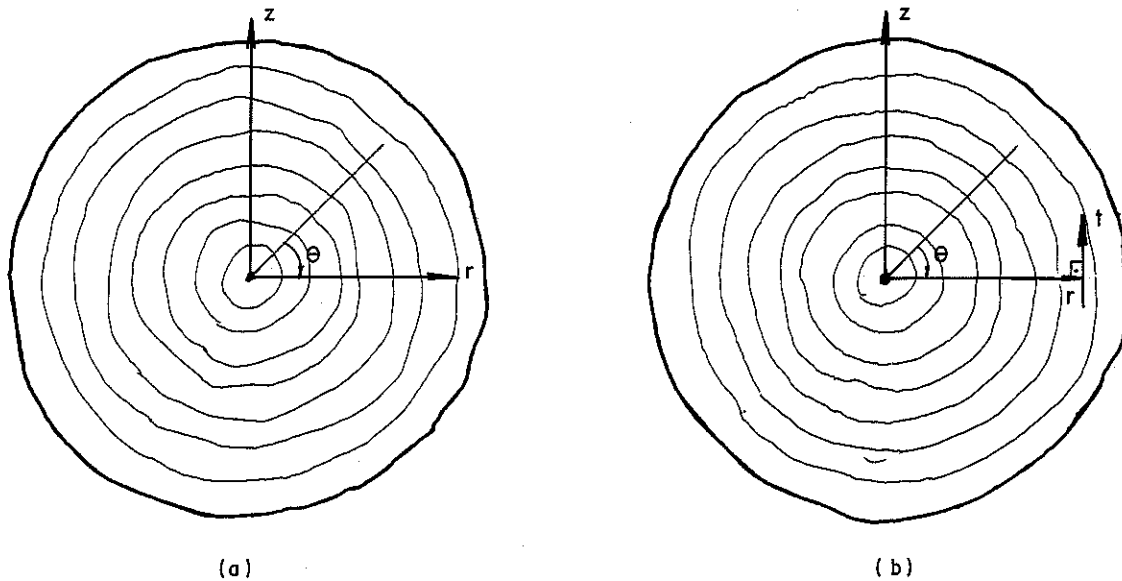


Figura 1.2: Representação da anisotropia da madeira

Medindo-se \underline{r} da medula até a transição entre dois "cones" no corte transversal, encontra-se nesta transição um marcador dos "anéis de crescimento". Colocando-se em uma posição perpendicular a \underline{r} um eixo de referência \underline{t} , obtem-se:

\underline{t} : eixo tangente aos anéis de crescimento

\underline{r} : eixo radial, da medida até os anéis de crescimento

\underline{z} : eixo longitudinal, perpendicular a \underline{r} e a \underline{t}

Em pequenos comprimentos e em "cones" superpostos delgados, o eixo \underline{z} é aproximadamente a direção das fibras. Em comprimentos maiores, é necessário afirmar que a direção das fibras é a direção da geratriz do cone e esta é a situação mais comum de uso da madeira.

Por "compressão paralela às fibras" deve-se, pois, entender compressão desenvolvida na direção das fibras, isto é, da geratriz do "cone".

1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO

É interesse deste trabalho delimitar uma metodologia para a caracterização, em laboratório de ensaio de materiais, do comportamento da madeira submetida à compressão paralela às fibras. Para tanto é necessário:

- (a) Especificar os dispositivos que serão utilizados para o ensaio;
 (b) Determinar um corpo de prova padrão.

Com investigação apoiada em detalhada revisão bibliográfica, normas de ensaio nacionais e internacionais, relatórios de ensaios correntes, estudos de comparação de propriedades, realizam-se lotes de ensaios comparativos para se chegar às especificações mencionadas.

Algumas variações admitidas para as propriedades serão também discutidas, como a influência do tamanho do corpo de prova ensaiado, visando equacionar a variação da resistência à compressão paralela às fibras com a variação de volume de material. Em complementação, é variado apenas o comprimento do corpo de prova e se procura definir a alteração do módulo de elasticidade e da resistência à compressão paralela às fibras com esta variável.

Em particular será analisada a variação da tensão no limite de resistência de peças seccionadas comprimidas. O foco principal é a alteração da resistência pelo contato, em emendas de peças comprimidas.

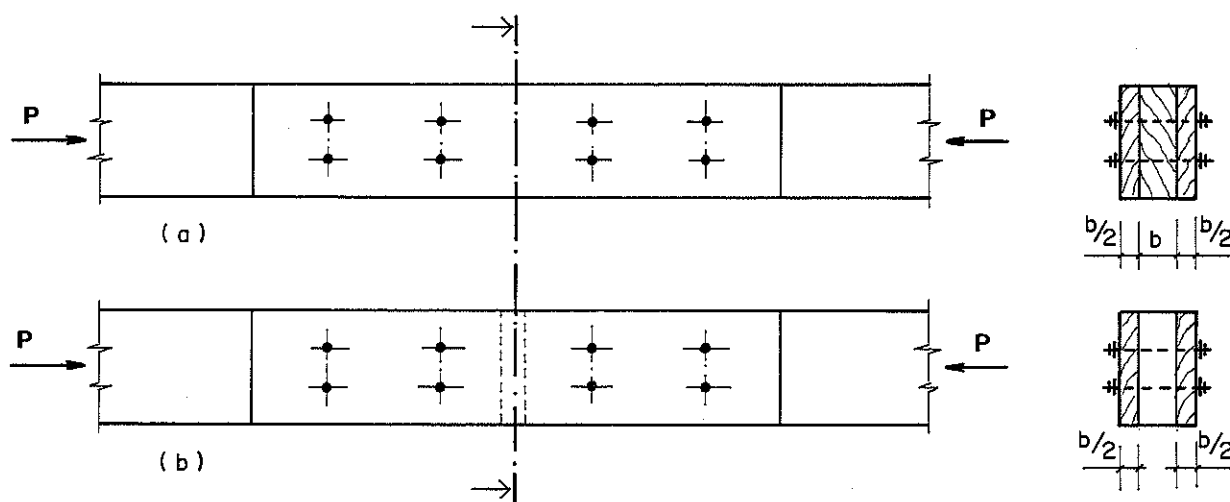


Figura 1.3: Emenda de peça comprimida: (a) em contato pleno
 (b) afastadas

Pelo reforço apresentado pelas cobrejuntas (talas laterais aparafusadas) na região da emenda, na Figura 1.3(a) se prevê que não é necessário que todo o esforço normal P seja transferido à cobrejunta, ocorrendo o contrário na emenda mostrada em 1.3(b).

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. ESTRUTURA DA MADEIRA

A madeira tem ocupado uma posição central nos interesses humanos, desde a sua utilização pelo homem de Neanderthal para fazer fogo e provavelmente fazer utensílios e armas. Hoje a madeira é amplamente utilizada em construção, fabricação de papel e, onde facilmente acessível, como combustível. A madeira é formada nos caules, raízes e ramos de gimnospermas e angiospermas arbóreas. A madeira das gimnospermas coníferas ("madeira mole") é valiosa especialmente na fabricação de papel e construção. A madeira das angiospermas dicotiledôneas ("madeiras duras" ou "madeira de lei") é utilizada em mobília de qualidade e revestimentos. Os termos "madeira mole" e "madeira dura" é embora solidamente estabelecidos, não devem ser tomadas rigorosamente como uma medida da dureza física, pois algumas "madeiras duras", como por exemplo a balsa, são de fato muito menos duras que a maioria das "madeiras moles". [1]

2.1.1. Microestrutura da Madeira

A estrutura secundária da planta, da qual o lenho é o principal componente, é originada de atividades de dois meristemas laterais, o câmbio vascular e o felogênio (câmbio do córtex). O exame do corte do tronco de uma árvore com uma redução de dez vezes dá uma idéia geral (figura 2.1).

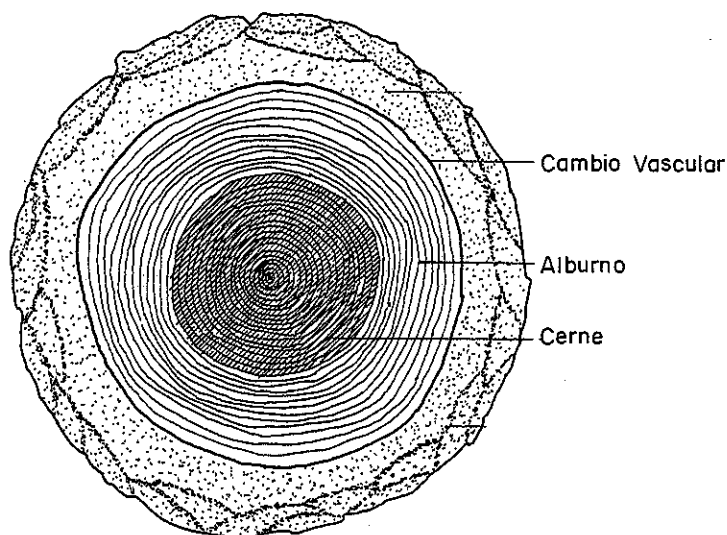


Figura 2.1. Esquema de um corte transversal de um caule lenhoso mostrando os componentes principais do lenho e casca [Fonte: Morey, 1980].

6.4.2. Análise por Regressão Linear.....	140
6.4.3. Outras Considerações.....	141
6.5. Conclusões.....	143
Capítulo 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES.....	144
LITERATURA CITADA.....	147
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	151
ANEXO I	
ANEXO II	

O lenho , que constitui a maior parte do corte, é separado da casca pelo câmbio vascular. Iniciais fusiformes e do raio do câmbio vascular dão origem aos elementos do lenho e ao córtex interno por um processo de divisão tangencial, crescimento e diferenciação das células derivadas [2]. Córtex é um termo não específico, que se refere a todos os tecidos fora do câmbio vascular, incluindo tanto o floema secundário como a periderme ou, onde ocorre mais do que uma periderme, o ritidoma. Somente uma fina camada de floema, aquela mais recentemente diferenciada das derivadas do câmbio vascular, é funcional na condução de assimilados orgânicos. O outro principal componente do córtex, a periderme, é derivada do câmbio do córtex e tem uma função protetora. O lenho de algumas árvores pode ser classificado na base de coloração, em um alburno periférico e um cerne central. O alburno é fisiologicamente ativo no armazenamento de reservas e no movimento de água e sais minerais da raiz para a parte aérea (folhas). O cerne não contém células vivas e sua função é de suporte mecânico para a árvore.

O lenho é composto de dois sistemas interpenetrantes de células, um orientado longitudinalmente e outro radialmente. Membros do sistema longitudinal ou axial das células incluem vasos, traqueídes, fibras e parênquima, sendo todos derivados de iniciais fusiformes. O sistema radial de células, os raios, é derivado do câmbio vascular e é totalmente parenquimatoso, exceto em algumas madeiras "moles", como o pinheiro, onde existem traqueídes do raio.

As madeiras das gimnospermas são estruturalmente homogêneas pelo fato de que 90% dos elementos axiais são traqueídes. As madeiras "duras", ao contrário, são mais heterogêneas, contendo vasos, fibras e, às vezes, traqueídes (exemplo: carvalho). Além da dissimilaridade na composição celular, as madeiras "moles" e "duras" mostram diferenças no desenvolvimento de certas células axiais. Traqueídes de madeiras "moles" têm de três a quatro milímetros de comprimento, enquanto as fibras de madeiras "duras" são muito mais curtas, sendo o mais comum comprimentos de um a um milímetro e meio. Estas diferenças não dizem respeito somente às dimensões finais, mas também ao desenvolvimento destes elementos das iniciais fusiformes. A fibra madura é, no máximo, cinco vezes mais longa que a inicial fusiforme da qual se originou. Já as traqueídes mostram somente ligeiro aumento, 20 a 30% em comprimento em relação às suas iniciais. O alongamento extensivo das fibras durante a diferenciação pode ser explicada pela interação do potencial genético da célula em diferenciação e a sequência de alterações ambientais, principalmente fisiológicas, encontradas nas

proximidades do câmbio vascular.

Durante a crescimento normal da árvore ocorrem algumas mudanças no desenvolvimento de fibras e traqueídes, indicando que o controle genético não é tão rígido a ponto de evitar a ocorrência de variação. A variabilidade estrutural dos elementos do lenho existe não apenas a nível de gênero e espécie, mas também a nível de indivíduo. Assim, dentro de um anel anual de madeira "mole" há variação no comprimento de traqueídes baseada na posição, por exemplo, entre o lenho do tronco e o lenho de ramos. Onde os ramos se inserem no tronco as traqueídes são mais curtas que aquelas imediatamente acima ou abaixo. Mesmo em um dado nível do tronco de uma árvore há um aumento gradual no comprimento de traqueídes desde o primeiro até cerca do sexagésimo anel anual. Subseqüentemente, esta dimensão permanece mais ou menos constante.

2.1.2. Composição Química

A estrutura da madeira e muitas de suas propriedades são baseadas no arranjo característico das células componentes. O desgaste homogêneo das mobílias de ácer resulta de uma distribuição relativamente uniforme dos vasos e fibras na madeira em cada anel anual. Por outro lado, os finos sulcos que eventualmente se desenvolvem em mesas a cadeiras de carvalho - uma característica dessa madeira, que não é de todo desagradável - são causados pela ocorrência localizada de vasos muito largos na porção inicial de cada anel anual. A estrutura da madeira pode, contudo, ser compreendida não só em termos do arranjo de suas células, mas também - e mais fundamentalmente - com base na organização e química das substâncias da parede celular.

Fibras e traqueídes são caracterizadas por paredes celulares heterogêneas, tanto em estrutura como em composição química. Parede celular primária é o termo aplicado à parede cambial original. A parede celular primária é capaz de crescer em área como, por exemplo, quando um vaso aumenta em diâmetro. Derivadas cambiais adjacentes são, neste estágio inicial de diferenciação, separadas somente por duas finas paredes primárias unidas por uma substância intercelular, chamada lamela média. No entanto em traqueídes adultas e fibras, a parede celular primária - agora a porção mais externa da parede celular (figura 2.2) - corresponde somente a uma pequena porcentagem da constituição da parede.

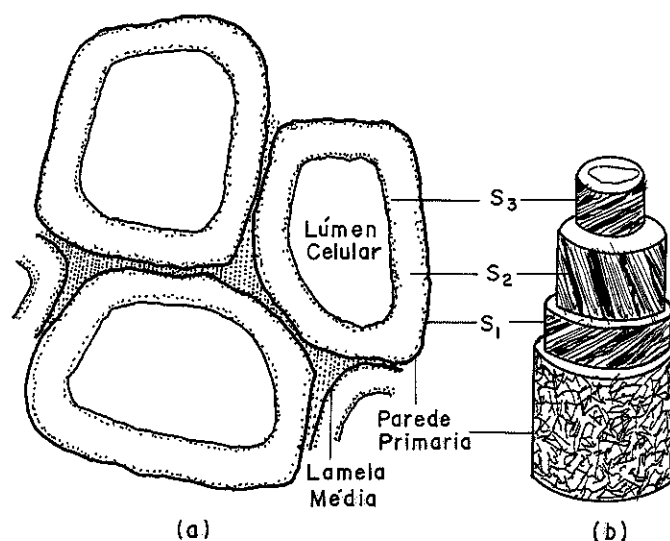


Figura 2.2. Esquema da organização da parede celular de fibras lenhosas. As camadas da parede são identificadas por diferentes alinhamentos das respectivas microfibrilas quando observadas com microscópio de luz polarizada e eletrônica. [Fonte: Morey, 1980]

Uma espessa parede celular secundária se deposita no lado interno da parede primária logo após esta cessar o crescimento em área. A parede celular é fundamentalmente constituída por material da parede celular secundária. As camadas primária e secundária são formadas por três constituintes principais: celulose e hemicelulose, ambos polissacarídeos, e lignina, um polímero aromático constituído por blocos de fenilpropano. A celulose pode ser comparada a um esqueleto que dá forma e estrutura à parede celular. A celulose é, inicialmente, embebida numa matriz porosa, amorfa, de hemicelulose. Mais tarde, estes polissacarídeos são incrustados e aglutinados com lignina, um polímero tridimensional muito estável.

2.1.2.1. Celulose

A substância orgânica natural mais abundante, celulose, há muito tempo foi reconhecida como o principal constituinte da parede de células vegetais e, por esta razão, recebeu este nome. A organização física da parede celular é baseada na celulose. A molécula é longa e linear, consistindo de vários milhares de unidades de glicose unidas pelas extremidades. Moléculas de celulose, em número de até duas mil (2000) unidades, são alinhadas em fileiras paralelas, em fileiras conhecidas com o nome de microfibrilas. Várias centenas

de microfibrilas podem ser alinhadas juntas em unidades discretas, as macrofibrilas, visíveis ao microscópio como estriações finas na parede celular. Macrofibrilas são organizadas lateralmente como lamelas e um certo número delas, por sua vez, compõem a parede celular. Em fibras do lenho, a parede celular secundária consiste em três camadas distintas chamadas, de fora para dentro, de S₁, S₂ e S₃ respectivamente (figura 2.3).

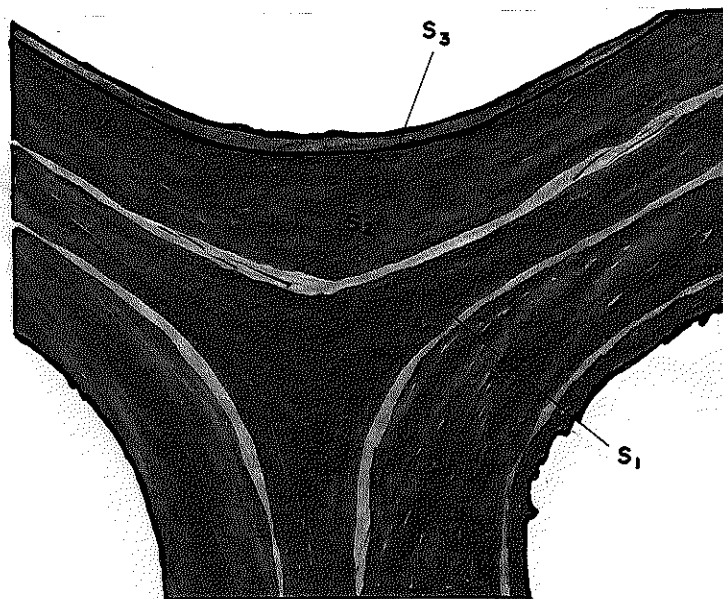


Figura 2.3. Corte transversal de traqueídes de Pinus pungens mostrando as camadas S₁, S₂ e S₃ da parede secundária (Micrografia tirada com microscópio eletrônico por cortesia de W. A. Côté Jr. da Figura 4, pág.13 de Côté e Day, 1969). [Fonte: Morey, 1980]

O arranjo das moléculas de celulose na parede celular é então, de ordem crescente em complexidade, das microfibrilas visíveis apenas em fotomicrografias de microscópio eletrônico, até às macrofibrilas, lamelas e camadas que finalmente compreendem a parede celular secundária de dimensão macroscópica.

Entre os principais constituintes da parede celular, a celulose é o único parcialmente cristalino. As moléculas de celulose, em regiões das microfibrilas conhecidas como micelas, são arranjadas de maneira muito regular, formando uma rede cristalina. As moléculas que compreendem a rede têm arranjos diferentes ao longo de diferentes eixos, tornando a celulose anisotrópica, inclusive opticamente: a celulose apresenta dois planos de polarização. Incidindo uma luz polarizada sobre a celulose, de qualquer ângulo oblíquo, esta luz é transformada em dois componentes vibrando nestes planos. O microscópio de luz polarizada pode ser usado para detectar e determinar a orientação da celulose em fibras e traqueídes, desde que esta seja o

único componente da parede celular opticamente anisotrópico. Num corte transversal entre filtros polarizadores cruzados, a camada S_2 mostra muito pouca anisotropia óptica (figura 2.4.a). No corte longitudinal, porém, quando a mesma camada é colocada paralelamente ao platinado do microscópio, a anisotropia é totalmente observada: a camada S_2 é brilhante. Conclui-se então, que as cadeias de celulose na camada S_2 são orientadas predominantemente na direção axial, num ligeiro ângulo em relação ao eixo longitudinal da célula, sendo de 10° a 30° para fibras e traqueídes (medidas por Roelafsen, 1959). As camadas S_1 e S_3 são, geralmente, brilhantes em corte transversal entre filtros polarizadores cruzados (figura 2.4.a). A celulose nestas camadas faz ângulos de 60° a 90° com o eixo das fibras e traqueídes (figura 2.2.b).

A espessura parede celular de plantas lenhosas é heterogênea em termos de organização de seu esqueleto. A resistência da madeira é baseada, em parte, nesta estrutura laminada, que pode ser comparada a uma placa de madeira compensada, cujas sub-unidades, embora inerentemente fracas, são ligadas para formar um agregado muito forte.

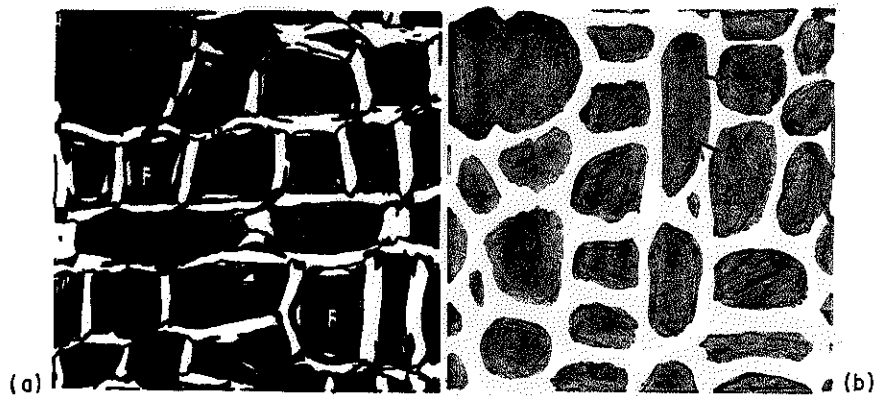


Figura 2.4: (a) Corte transversal de lenho de ácer no microscópio de luz polarizada. Em cada fibra (F) observam-se duas zonas de anisotropia óptica, uma zona externa brilhante correspondente à parede primária mais a camada S_1 e uma zona interna fina, a camada S_3 . Nesta orientação a camada S_2 é escura. (b) Fotomicrografia mostrando fluorescência causada por lignina na mesmo corte. A distribuição de lignina na parede celular pode ser medida pela fluorescência azul ou azul-esverdeada característica emitida em resposta à absorção de luz ultravioleta. Em fibras lenhosas o conteúdo de lignina é alto na lamela média e parede primária. (Fotografias das figs. 2 e 4, pág. 291 de Morey e Cronshaw, 1968).

2.1.2.2. Hemicelulose

A celulose contribui com pouco mais de 50% dos polissacarídeos encontrados na parede celular das plantas lenhosas. Entre os outros polissacarídeos aí presentes, as hemiceluloses são um grupo muito diversificado de polímeros de baixo peso molecular. São insolúveis em água, como as celuloses, e extraíveis em soluções alcalinas aquosas, diferentemente da celulose. Embora constituam moléculas essencialmente lineares, podem ser ramificadas de várias maneiras, fornecendo a matriz porosa encontrada ao redor das microfibrilas de celulose.

Algumas diferenças marcantes ocorrem entre angiospermas e gimnospermas em termos de composição química bruta da madeira. As hemiceluloses estão, usualmente, presentes em maior quantidade em angiospermas do que em gimnospermas, embora mais lignina seja encontrada nas madeiras "moles" do que em madeiras "duras". A celulose, apesar disso, é o único entre os principais componentes da madeira a apresentar valores praticamente constantes, de 40 a 45%, tanto para as madeiras "duras" como para as "moles". Algumas variações nas propriedades de madeira "moles" e "duras" são baseadas em diferenças fundamentais na composição química. Em condições ambientais semelhantes, a madeira de uma angiosperma normalmente contém mais umidade do que a de uma conífera. A hemicelulose é o mais higroscópico entre os principais constituintes da parede celular (Roelofsen, 1959) e, assim, a maior umidade das madeiras "duras" é causada pela relativa maior quantidade deste constituinte.

2.1.2.3. Lignina

Na fase final de diferenciação de uma traqueíde ou fibra de madeira, a parede celular é coberta por lignina e, deste modo, tornada rígida. A lignina é uma substância fundamentalmente aromática e o único não-carboidrato entre os principais constituintes da parede celular; é um polímero rígido e estável.

A presença de lignina nas paredes dos constituintes celulares é registrada fotomicrograficamente, figura 2.5. Cálculos mostram que o conteúdo de lignina na parede primária e na lamela média, em traqueídes jovens, é de 0,50g/g e 0,85g/g respectivamente. Na parede secundária foi calculada uma concentração uniforme, porém menor, de 0,23g/g. Mas se o conteúdo de lignina basear-se no cálculo em porcentagem de lignina total, a parede celular secundária conterá, então,

72%, com menores quantidades na parede primária e na lamela média. Então, a maioria da lignina total da madeira ocorre na espessa parede de celular secundária.

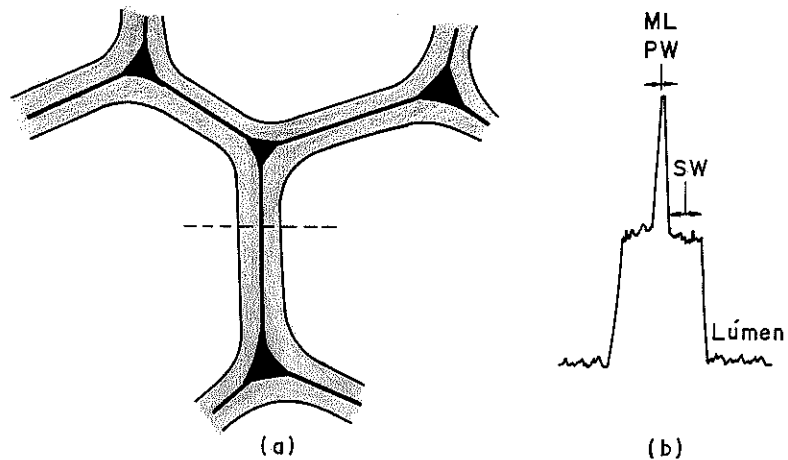


Figura 2.5: (a) Esquema da distribuição de lignina na parede celular de traqueídes quando determinada fotomicrograficamente por absorção de ultra-violeta. (b) Microdensitometria revela uma alta absorbância na lamela média (ML) e parede primária (PW) e uma absorbância inferior, mas constante, na parede secundária (SW). (Baseado nas figs. 1 e 2, págs. 76 e 77, de Scott et ali., 1969). [Fonte: Morey, 1980]

2.1.3. Formação de Parede Celular

Traqueídes, vasos, fibras, células do parênquima axial e do raio, todas se diferenciam das iniciais cambiais de acordo com um processo de desenvolvimento em quatro passos que, de certa forma, se sobrepõem: (1) divisão celular; (2) crescimento em área; (3) espessamento da parede; (4) lignificação.

A divisão de iniciais fusiformes e do raio no plano tangencial produz tanto xilema como floema secundários e também contribui para o arranjo predominante das células diferenciadas em fileiras radiais. À medida que o cilindro lenhoso aumenta, o câmbio vascular cresce em circunferência. Este aumento é acompanhado por divisões no plano radial, levando a um número cada vez maior de iniciais do câmbio.

A parede celular primária das derivadas do câmbio inicia o crescimento em área durante a diferenciação. Fibras de madeira "dura" crescem predominantemente na direção longitudinal, atingindo até cinco vezes o comprimento da inicial da qual elas se originaram. Durante o espessamento da parede celular forma-se a parede celular secundária

com três camadas. Estas fases podem ser simultâneas quando, por exemplo, as fibras crescem por aumento de área de suas extremidades e ao mesmo tempo a parede celular secundária se deposita na região mais proximal da célula.

O passo final é a lignificação, a adesão das diversas camadas e das células entre si.

2.1.4. Descontinuidades do Material

Do que foi até aqui descrito, podem ser anotadas descontinuidades:

- a) longitudinalmente, na conexão entre os elementos anatômicos
- b) longitudinalmente, na conexão entre microfibrilas alinhadas
- c) transversalmente, na adesão entre camadas de crescimento de um elemento anatômico
- d) transversalmente, na interface cerne-alburno, uma vez que o cerne se compõe de elementos inativos fisiologicamente e o alburno, de elementos ativos
- e) longitudinalmente, quando de inserção de ramos no tronco.

A formação de um todo estruturalmente organizado e coeso depende, em essência, da qualidade da lignificação que ocorre nestas diversas transições. Sendo a lignina um polímero muito rígido, não é considerada fator de descontinuidade do material.

2.2. MÉTODOS DE ENSAIO

2.2.1. Preliminares

"As condições de crescimento das árvores de uma dada espécie florestal, variáveis como o clima, a composição e a umidade do solo, a densidade de povoamento, etc., imprimem ao lenho formado diferenças acentuadas na espessura das camadas de crescimento, na porcentagem de madeira de Outono, e noutros aspectos que influenciam a resistência do material lenhoso, determinando por isso uma forte variação das suas características mecânicas. A própria geometria dos anéis de crescimento, de curvatura bastante variável com a distância à medula, e a idade das diferentes camadas, variável também com a distância e com a altura da árvore e estreitamente relacionada com a lignificação das paredes celulares dos elementos lenhosos, impõem igualmente diferenças de resistência que, só por si e

dentro do mesmo indivíduo, amplamente a dispersão dos valores das características. Pode-se dizer que, para uma dada espécie florestal, a resistência média da madeira, qualquer que seja o tipo de solicitação que se considere, varia com a região que a produz, dentro da região com as características do povoamento, dentro do povoamento com o indivíduo, e dentro do indivíduo com a posição que o lenho ocupa em diâmetro e altura.

Caracterizar uma madeira do ponto de vista de sua utilização em estruturas é, assim, um problema que, pode dizer-se, nunca está completamente resolvido, qualquer que seja o número de amostras feitas e o número de ensaios realizados. Atacá-lo é, pois, caminhar no sentido não só da obtenção de valores médios cada vez mais representativos mas, sobretudo, da determinação das flutuações em torno desses valores, pois é esta dispersão de características que, em termos de utilização prática, determina fortemente os valores das tensões de segurança a adotar nos cálculos.

Dada a influência dos vários fatores referidos, os valores médios e a dispersão devem ser determinados, para uma certa característica e uma certa espécie florestal, a partir de uma população de resultados que contenha os valores individuais de corpos de prova extraídos de várias árvores crescendo em condições diferentes e, tanto quando possível, representativas das diversas situações típicas que ocorrem no povoamento; por árvore deverão considerar-se, aproximadamente com igual representação, peças extraídas da base, da parte média e da parte superior do fuste e, em cada uma destas zonas, peças tiradas a diferentes distâncias da medula.

Deste modo se pretende colher e juntar num mesmo grupo os caracteres que imprimem variabilidade à resistência do lenho mas que, ao mesmo tempo, a este conferem a unidade que o individualiza como material de construção. Por outras palavras, pretende-se recolher a variação para se obter a constância. Essa constância é, evidentemente, probabilística, quer seja procurada através de uma média, de um valor mínimo, ou ainda, por exemplo, de um valor que, do lado do material de menor resistência só se verifique uma certa frequência bastante baixa e previamente fixada de acordo com um critério de segurança." [3]

2.2.2. As Normas de Ensaio

"O uso costumeiro da madeira para numerosos propósitos faz manifestar a contínua necessidade de dados sobre suas propriedades

mecânicas. A grande variedade de espécies, a variabilidade do material, as condições de fornecimento continuamente alteradas, os muitos fatores afetando os resultados de ensaio, tudo se combina para fazer a técnica de ensaio em madeiras única em sua complexidade.

Na preparação destes métodos para o teste de pequenas amostras sem defeito, considerou-se tanto a conveniência da adoção de métodos que produziriam resultados comparáveis àqueles já à disposição como à possibilidade de incorporar tantos melhoramentos quanto a experiência tem mostrado ser desejável (...). Estes métodos revelam todo o processo desde a seleção de árvores até a realização dos ensaios, portanto, também os fatores de controle, como tamanho e proporção dos corpos de prova e razão de carregamento, que podem influenciar os resultados.

(...) Qualquer desvio de medidas da seção transversal a partir de $5,0 \times 5,0 \text{ cm}^2$ (2" x 2"), usados nos Métodos Principais, introduz uma variável que afeta apreciavelmente os resultados para certas propriedades e, em consequência, limita a plena comparabilidade desejada para a obtenção de resultados uniformes de espécies diferentes."

[4]

"(...) O corpo de prova de $5,0 \times 5,0 \text{ cm}^2$ (2" x 2") tem a vantagem de englobar um certo número de anéis de crescimento, é menos influenciado por madeira de primavera-verão e suas discrepâncias do que corpos de prova menores, e é grande o suficiente para representar uma considerável proporção do material do tronco.

Por causa do tamanho da seção transversal e o comprimento do corpo de prova requerido para alguns dos ensaios (...), é às vezes difícil se obter corpos de prova em número adequado e completamente livres de defeitos a partir de toras representantes de árvores menores, particularmente daquelas com diâmetro próximo de 30cm até 38cm (12" a 15"). Com a necessidade crescente de avaliação de propriedades de espécies envolvendo árvores menores e a crescente importância da madeira de segundo crescimento, que se espera sejam cortadas muito antes de que alcance os tamanhos atingidos em plantios virgens, foi desenvolvida a necessidade de métodos secundários onde, no maior dos corpos de prova, a seção seja menor que $5,0 \times 5,0 \text{ cm}^2$ (2" x 2"). É axiomático que resultados de ensaio estejam intimamente relacionadas e sejam dependentes acerca dos métodos de ensaio empregados. O problema, de agora em diante, é desenvolver "métodos coadjuvantes" que dêem resultados de ensaio diretamente comparáveis àqueles obtidos pelos "métodos fundamentais" presentes, que empregam $5,0 \times 5,0 \text{ cm}^2$ (2" x 2") de seção transversal para todos os corpos de prova e, ainda,

garantir uma contínua acumulação de dados diretamente comparáveis aos dados extensivamente já disponíveis.

(...)A razão de crescimento extremamente rápida e a correspondente largura dos anéis em muitos materiais de segundo crescimento, junto com a vontade de se incorporar mais de um único anel anual de desenvolvimento em um corpo de prova, trouxe a limitação da seção transversal mínima para estes "Métodos Secundários" para $2,5 \times 2,5\text{cm}^2$ (1" x 1"). Esta seção é estabelecida para ensaios de flexão estática e compressão paralela às fibras.

(...)Pesquisa têm mostrado que, para a maioria das propriedades importantes dos ensaios de flexão estática e compressão paralela às fibras ('módulos de ruptura' e 'módulo de elasticidade' na flexão; 'máxima resistência à compressão' e 'módulo de elasticidade' na compressão paralela), resultados de corpos de prova de $2,5 \times 2,5\text{cm}^2$ (1" x 1") de seção podem ser substituídos diretamente por aqueles obtidos de corpos de prova de $5,0 \times 5,0\text{cm}^2$ (2" x 2") de seção com erro (porém pequeno). Dados atuais indicam que a tensão na fibra no limite de proporcionalidade, na flexão estática e na compressão paralela, pode ser ligeiramente superior para os corpos de prova de $2,5 \times 2,5\text{cm}^2$ (1" x 1") que para os corpos de prova de $5,0 \times 5,0\text{cm}^2$ (2" x 2"), baseando-se nos métodos de ensaio normalizados para os dois tamanhos, mas nenhuma razão especial pela qual isto deveria ser esperado é aparente. (...)No relatório de resultados de ensaio recomenda-se fornecer o tamanho do corpo de prova, ou que os dados sejam referentes aos 'Métodos Primários' ou aos 'Métodos Secundários'." [5]

Esta preocupação de se poder, efetivamente, caracterizar o material que apresenta potencial de uso está disseminada em todos os continentes. Por exemplo a Norma DIN 52185 [6], traz a recomendação: "Para a determinação da resistência à compressão paralela às fibras são empregados corpos de prova de forma paralelepipedica, com possível seção transversal quadrada, cuja medida da aresta importa em $a=20\text{mm}$. Para madeiras com orientação das fibras muito irregular, em especial com grande região de crescimento espiral, são empregados corpos de prova com maiores dimensões transversais (medidas de aresta até 50mm), de modo que seja possível abranger pelo menos cinco anéis de crescimento e as regiões intercaladas. O comprimento do corpo de prova na direção das fibras deve somar $h = 1,5a$ até $h = 3.a$."

A seguir é apresentado um quadro sintético com as dimensões dos corpos de prova adotados em diversos métodos de ensaio, bem como as condições de umidade e informações a respeito do número de ensaios propostos em cada um deles.

NORMA/PAÍS	CORPO DE PROVA ADOTADO (cm) ³	CONDIÇÕES DE UMIDADE	QUANTIDADE DE COR DE PROVA
ABNT:NBR-6230	6 x 6 x 18	madeira verde	12 cp
BRASIL - 1982	2 x 2 x 3	madeira verde e a 15%	40cp cada teor
ASTM:D143-52	5 x 5 x 20	madeira verde e a 12%	1cp de cada teor por barra
ESTADOS UNIDOS 1978	----- 2,5 x 2,5 x 10	madeira verde e a 12%	extraída do tronco
DIN:52185	2 x 2 x 3 [até 6]	madeira seca a 12%	número estatisticamente suficiente de cp (mínimo:10)
ALEMANHA-1976	----- 5 x 5 x 7,5 [até 15]	madeira seca a 12%	idem; usado se as fibras forem muito irregulares
AFNOR:B51007-42	2 x 2 x 6	madeira seca a 15%	10 cp
FRANÇA - 1973			
COPANT:464	5 x 5 x 20	madeira verde	9 cp
- 1972			
LaMEM	5 x 5 x 20	madeira verde e a 12%	1cp cada teor por barra
(proposta) - 1987			extraída do tronco

Quadro 2.1. Apresentação dos diversos métodos de ensaio, para determinação da resistência da madeira submetida à compressão paralela às fibras.

A metodologia do ensaio dos corpos de prova é bastante semelhante em todos os casos, constituindo nas seguintes etapas:

- a - verificação do teor de umidade desejado para o corte;
- b - corte dos corpos de prova, em esquadro, com fibras retas (tolerância até 1%);
- c - medidas das arestas dos corpos de prova;
- d - pesagem dos corpos de prova imediatamente antes de ensaiar;
- e - instalação do corpo de prova em pratos nivelados (e medidores);
- f - ensaio com velocidade estipuladas (de carga ou de deslocamentos);
- g - confecção de gráficos e/ou tabelas sobre o ensaio;
- h - descarte dos corpos de prova defeituosos do lote.

A verificação do teor de umidade do material de onde serão extraídos os corpos de prova pode ser feita por intermédio de testemunhos que acompanham os lotes. Os testemunhos são secos em estufa a $(100 \pm 3)^{\circ}\text{C}$ por 48 (quarenta e oito) horas e possibilitam acompanhar a velocidade de perda de umidade do lote e estipular quando o lote terá a umidade desejada para a preparação dos corpos de prova, cerca de três a cinco por cento superior à umidade de ensaio.

Os corpos de prova são cortados cuidadosamente, em esquadro e respeitando sempre o perfeito alinhamento das fibras, que deve ser paralelo à aresta longitudinal do corpo de prova.

A verificação do teor de umidade dos corpos de prova é feita através do controle de massa de um testemunho de umidade que acompanha cada lote e espécie ou, usando ábacos de secagem, determinando a massa esperada do corpo de prova quando este atingir o nível de umidade necessário ao ensaio (por exemplo, 12%). [7]

As arestas dos corpos de prova são medidas com grande precisão ($\pm 0,05\text{mm}$ na maioria das normas) e são tomadas as médias como as grandezas representativas da cada corpo de prova.

Os corpos de prova são levados a uma balança de precisão ($\pm 0,02\text{g}$) e sua massa é anotada. São instalados os dispositivos para leitura caso sejam feitas medidas de deformações e o corpo de prova é instalado na máquina de ensaio. Controlando-se ou a velocidade de carregamento (Norma Brasileira: $100\text{kgf}/\text{cm}^2/\text{min}$) ou a velocidade de deslocamento do prato da máquina (Norma ASTM D143-52: $0,01\text{mm}/\text{min}$), o ensaio é realizado. Anota-se a máxima carga obtida.

Pelo menos a Norma ASTM D143-52 [8] recomenda anotar a forma de rupturas: "As rupturas serão classificadas de acordo com o surgimento da superfície fraturada (figura 2.6). No caso de dois ou mais ti

pos de fraturas se desenvolverem, todos devem ser descritos na sua ordem de ocorrência; por exemplo, "cisalhamento seguido de formação de rebarbas". A ruptura também será descrita com um esboço em sua posição real na folha de dados.

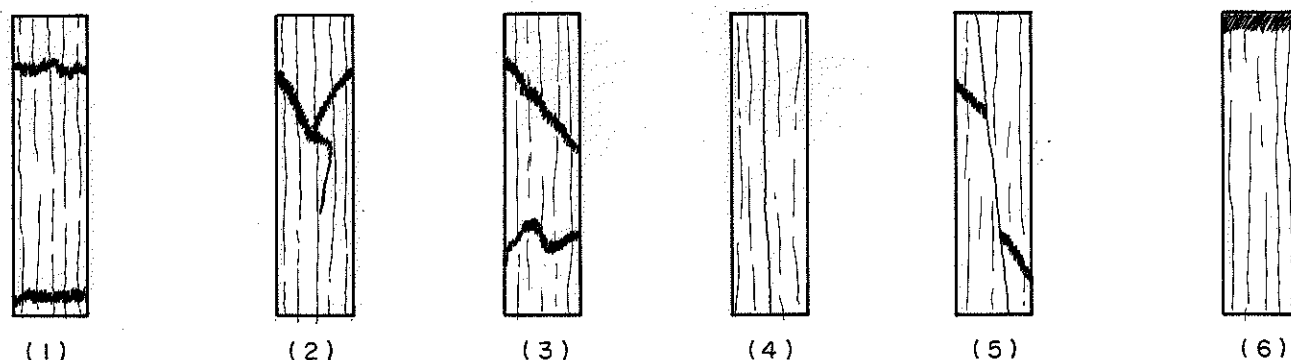
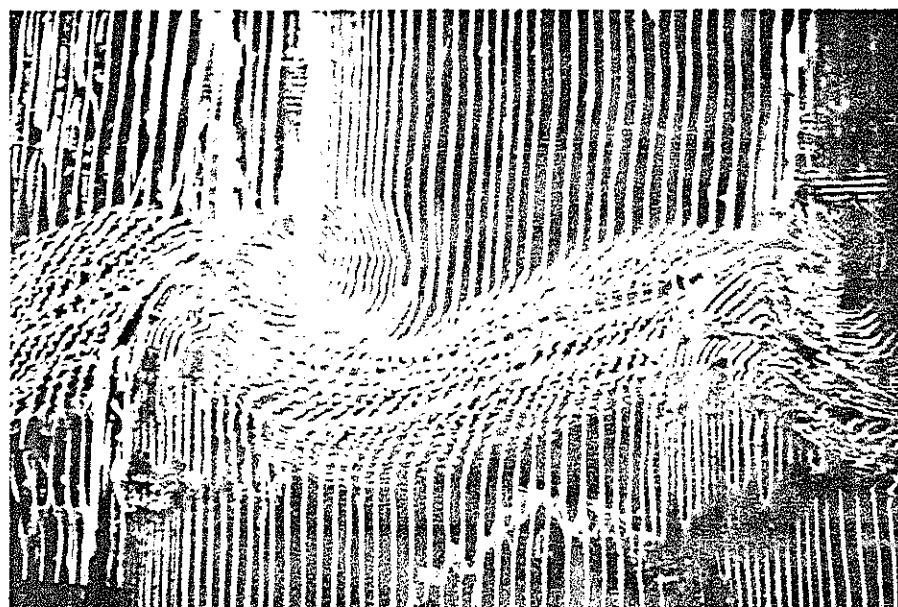


Figura 2.6.: Classificação dos tipos de ruptura [fonte: ASTM D143-52, figura 11], onde:

- (1) "esmagamento": este termo é usado quando a ruptura é aproximadamente horizontal;
- (2) "fenda em cunha": a direção da fenda, se radial ou se tangencial, deve ser observada;
- (3) "cisalhamento": quando a plano de ruptura forma ângulo de 45° ou mais com o topo do corpo de prova;
- (4) "fendilhamento": ocorre geralmente em corpos de prova com defeitos internos e é referênciada para exclusão do corpo de prova;
- (5) "fendilhamento e cisalhamento paralelo às fibras": usual em peças com fibras inclinadas e é eliminatório para o corpo de prova;
- (6) "fibrilação ou rolamento terminal": usualmente associado ao excesso de umidade nos extremos do corpo de prova, corte impróprio ou ambos; não é aceitável e se relaciona a cargas pequenas - os ensaios devem ser reformulados quando esta ruptura ocorrer."

Ilustrando a ocorrência das rupturas tem-se as figuras 2.7(a) e (b), a nível microscópico.



(a)



(b)

Figura 2.7.: Ruptura por esmagamento de *Picea abies*, Karst no plano longitudinal-radial; (a) aumento de 100 vezes (b) aumento de 2000 vezes em madeira juvenil [Fonte: Bodig & Jayne, 1982]

Para evitar a ocorrência de rupturas com fibrilação ou rolamento terminal, Wangaard [9] propõe uma forma especial do corpo de prova, com seção transversal reduzida, para se evitar o esmagamento nas bordas, que não deixam de ocorrer no corpo de prova usual de

5cm x 5cm x 20cm , figura 2.8.

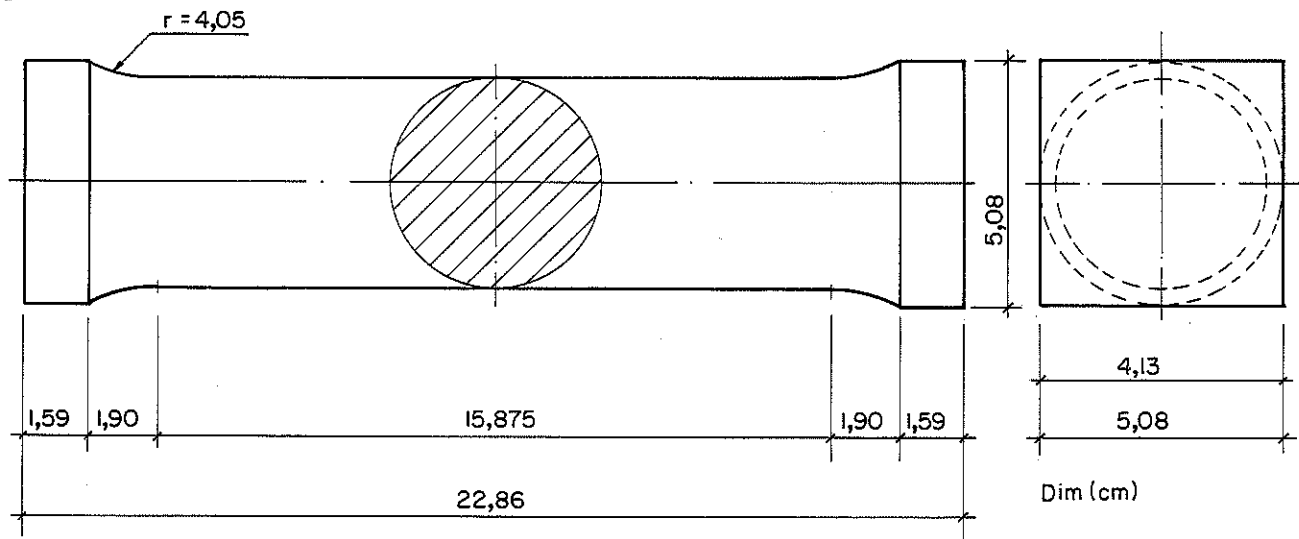


Figura 2.8.: Corpo de prova "especial" para a compressão paralela às fibras [Fonte: Wangaard, fig.75, 1950].

"Para se obter resultados satisfatórios e uniformes, é necessário que as rupturas realizadas se desenvolvam no tronco do corpo de prova. Com os corpos de prova de seção transversal uniforme, este resultado pode ser melhor obtido quando as extremidades estiverem a um teor de umidade ligeiramente inferior ao tronco. Com o material não-climatizado será suficiente empilhar os corpos de prova, cobrir o meio do fuste com um pano molhado ou úmido para evitar a perda de umidade pelas superfícies laterais e expor as superfícies de topo e base por pouco tempo. Para o material seco ao ar, as rupturas podem indicar que uma ligeira secagem das extremidades seja necessária, bastando para isso empilhar o material de forma análoga e colocá-los em em dissecador."

2.2.3. Dispositivos de ensaio

"Cuidado especial deve ser tomado na preparação do corpo de prova para a compressão paralela às fibras, para garantir que as superfícies terminais sejam paralelas entre si e em ângulos retos com o eixo longitudinal. Se considerado necessário, ao menos um prato da prensa deve ser equipado com um suporte esférico para se obter distribuição uniforme da carga sobre as extremidades do corpo de prova. [10]"

Em corpos de prova estruturais (15cm x 15cm x 60cm e até 12" x 12" de seção transversal) há exigências explícitas: "Blocos de suporte serão usados para aplicar a carga uniformemente sobre as duas superfícies de contato e para prevenir carregamento excêntrico no corpo de prova. Ao menos um bloco de suporte esférico será usado para garantir apoio uniforme. Blocos esféricos podem ser usados em uma ou ambas as extremidades do corpo de prova, dependendo de grau de paralelismo das superfícies de apoio. O raio da esfera deve ser tão pequeno quanto praticável, de modo a facilitar o ajuste da placa de suporte ao corpo de prova, e também grande o suficiente para assegurar uma área esférica adequada de suporte. Este raio é, usualmente, de uma a duas vezes a maior dimensão da seção transversal. O centro da esfera estará sobre o plano da superfície de contato do corpo de prova. O tamanho da placa de compressão será maior que a superfície de contato. Tem-se considerado conveniente providenciar um ajuste para movimentação do corpo de prova em sua placa de apoio com relação ao centro de rotação da esfera para garantir carregamento axial. [11]"

Esferas com suporte de encaixe são frequentemente usadas para o ensaio de compressão paralela às fibras. Bodig e Jayne [12] apresentam uma discussão do assunto devido ao desenvolvimento de flexão dos corpos de prova: "Esferas encaixadas em suportes planos são de uso comum; uma repousa na travessa da máquina (figura 2.9), e a outra está acima da cabeça do corpo de prova.

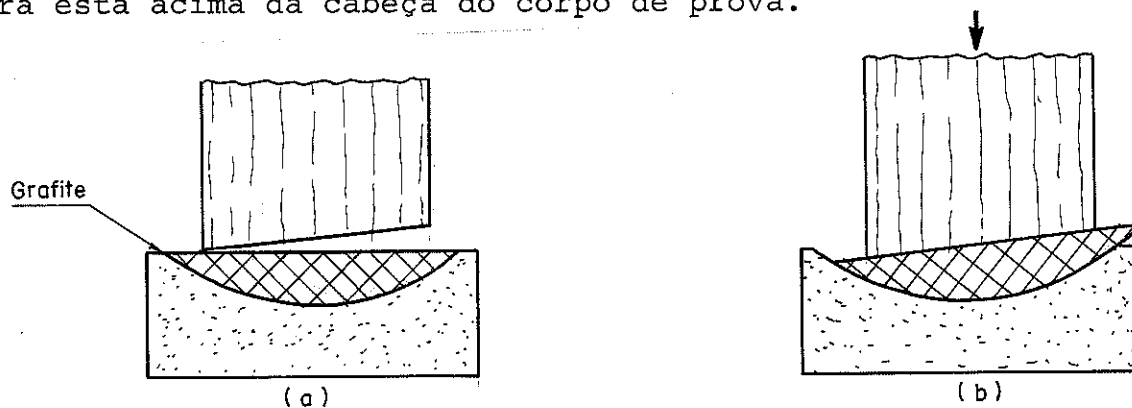


Figura 2.9.: Base de carregamento esférica para melhoria de alinhamento do corpo de prova: (a) corpo de prova desalinhado; (b) alinhamento obtido pelo carregamento [Fonte: Bodig & Jayne, 1982].

Durante o alinhamento, a parte esférica do suporte é algu

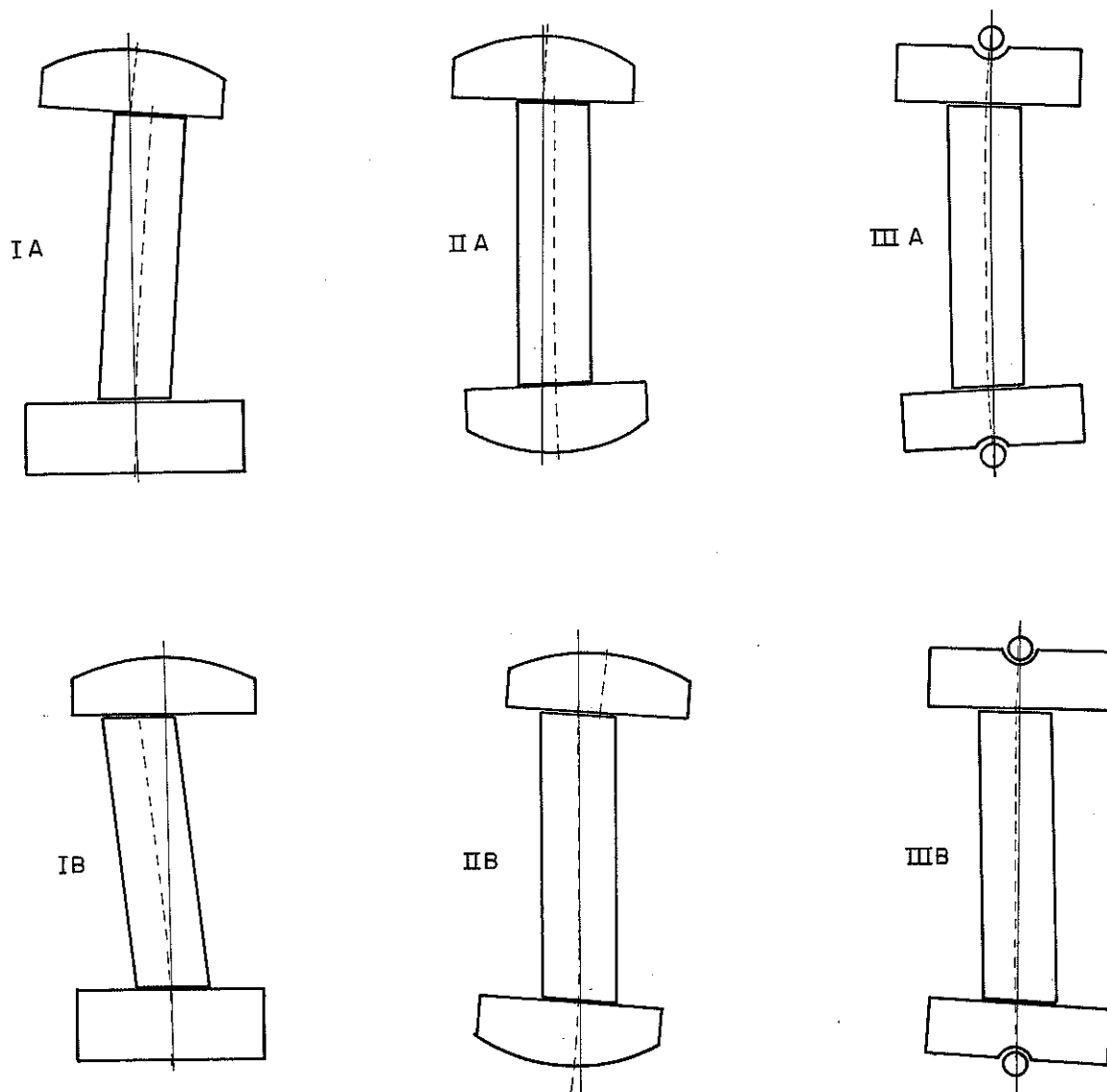


Figura 2.10: Desalinhamento dos corpos de prova de compressão com três diferentes dispositivos. [Fonte: Bodig & Goodman, 1969 [13]].

onde: ----- : linha de centro dos dispositivos e do corpo de prova
 _____ : centro do eixo de carregamento.

Na parte A da figura 2.10, os corpos de prova podem ser perfeitamente centralizados mas as superfícies a serem carregadas são não-paralelas, isto é, convergem. Os corpos de prova B têm superfícies paralelas mas não em ângulo reto com a direção das fibras. Como pode ser visto pela diferença entre a linha tracejada e a linha cheia, um ângulo considerável de carregamento é introduzido pela utilização de apenas um bloco esférico. Logicamente, com fabricação perfeita, o

único erro poderia ser da centralização incorreta do corpo de prova para o ensaio. Com corpos de prova perfeitos, nenhum bloco de suporte esférico seria necessário.

A grandeza da excentricidade induzida na compressão para um dado corte é proporcional ao raio e à espessura dos blocos esféricos de suporte. O projeto ideal seria um suporte do tamanho de uma cabeça de alfinete nas duas extremidades, com placas infinitamente finas para a distribuição uniforme da carga. Obviamente esta condição idealizada não pode ser atingida com dimensões finitas dos corpos de prova e um certo comprometimento deve ser introduzido no sistema." [13]

Por causa das restrições laterais impostas próximos às superfícies de extremidade de um corpo de prova que está em contato com a máquina de ensaio, são introduzidas concentrações de tensões. Para minimizar a influência destas restrições, os métodos de ensaio especificam comprimentos para medida de deformações menores que o comprimento total do corpo de prova. A figura 2.11 mostra como tais restrições alteram a forma do corpo de prova ensaiado.

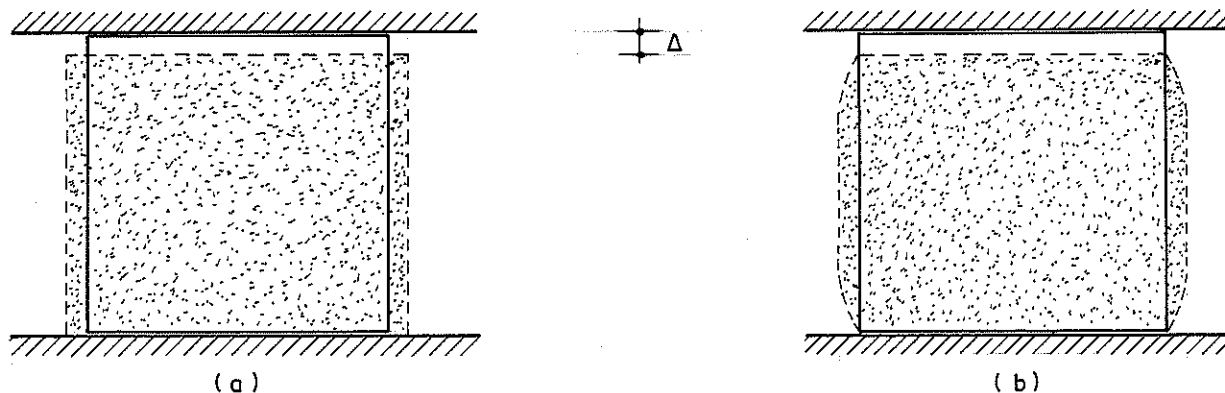


Figura 2.11: Deformação de um material elástico sob compressão: (a): sem restrições (b): com restrições [Fonte: Bodig & Jayne, 1982]

2.3. VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO E SUA INFLUÊNCIA NA RESISTÊNCIA

Um efeito introduzido pelo aumento do comprimento não restringido das barras axialmente comprimidas é a instabilização da barra a partir de um certo instante. Timoshenko [14] e Bodig [15] o definem:

"Para analisar problemas de barras carregadas em seu eixo, é possível utilizar técnicas simples, como as equações de equilíbrio

(de forças e momentos) e a Lei de Hooke. Quando um bloco de madeira é carregado, no qual os eixos ortotrópicos e geométricos coincidem, apenas uma componente de tensão está presente, como mostrado na figura 2.12.

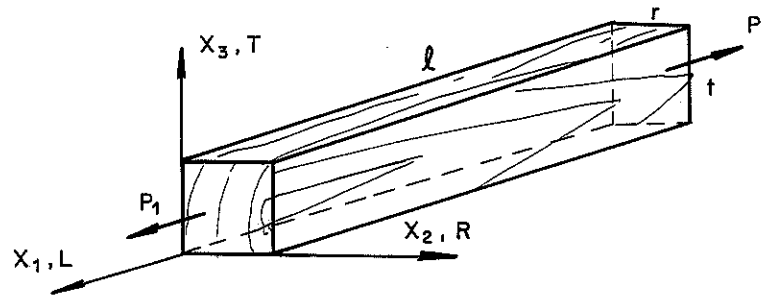


Figura 2.12: Barra de madeira sob tração uniaxial, na longitudinal (paralela às fibras). (fonte: Bodig & Jayne, 1982).

A tensão presente é $\sigma_1 = \frac{P_1}{A}$, P_1 é a força aplicada e A é a área de seção transversal à força.

Como o sólido se alonga, as dimensões transversais encurtam-se (efeito de Poisson) e as deformações ficam:

$$\Delta l = \frac{P \cdot l}{EA} \quad \Delta r = \frac{\nu_{lr} P r}{EA} \quad \Delta t = \frac{\nu_{lt} P t}{EA} \quad (2.1)$$

onde: Δl , Δr e Δt são as variações nas medidas originais l, r, t , respectivamente

ν_{lr} : coeficiente de Poisson para variação de medida radial devido à força longitudinal.

ν_{lt} : coeficiente de Poisson para variação de medida tangencial devido à força longitudinal.

E : módulo de elasticidade do material. "

Naturalmente, surgem complicações quando não se têm coincidência entre os eixos ortotrópicos e os geométricos. A solução de tais problemas exige a transformação das equações acima, introduzindo os efeitos de cisalhamento.

"O problema de compressão uniaxial é análogo quando se refere à direção das fibras. Apenas ocorre de as deformações produzidas serem de sinal contrário, pois quando P_1 é aplicada, a barra encurta na direção longitudinal e dilata-se nas direções transversais. Uma restrição importante para uso destas equações na compressão

surge da instabilização do sistema carregado. Barras de madeira esbeltas, longas são aquelas em que a razão entre o comprimento e a menor dimensão da seção transversal (λ/d) supera 11(onze), e tendem preferencialmente à perda de estabilidade em relação à compressão uniforme. Quando ocorrer a flambagem as equações (2.1) não se aplicam e uma análise diferente é exigida." [16]

A flambagem ocorrerá, nestes casos, antes que a carga última de compressão seja obtida e pode ser considerada em caso especial de deslocamentos de viga. A coluna de madeira mostrada na figura 2.13 é carregada em compressão uniaxial na direção X_1 pela carga P . A barra encurtará na direção X_1 e pode encurvar-se tanto na direção X_2 como na direção X_3 .

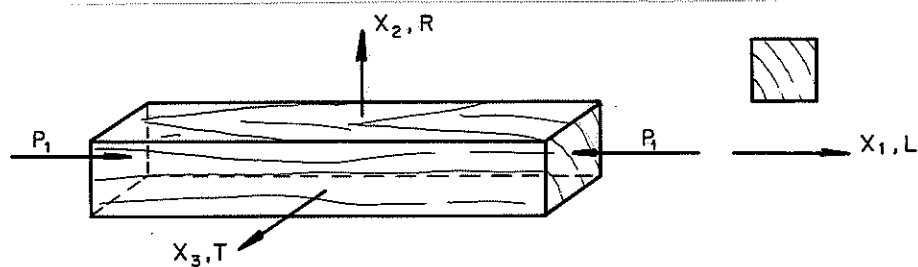


Figura 2.13. Peça de madeira sob carga de compressão uniaxial [fonte: Bodig & Jayne, 1982].

Estes deslocamentos laterais, não se confundido com os efeitos de Poisson, podem ser atribuídos a três fatores:

1. Não homogeneidade do material;
2. A coluna não ser perfeitamente reta;
3. A carga P_1 ser aplicada excentricamente.

Todos os três resultam no carregamento assimétrico com relação ao eixo dos centros de gravidade das seções. Momentos fletores acompanham quaisquer deflexões laterais. Na coluna mostrada na figura 2.14(a), curvatura, não homogeneidade do material e uma carga de compressão excêntrica, podem todas estas razões combinar entre si para causar a perda de estabilidade. Este esquema é reproduzido na figura 2.14(b) por uma coluna homogênea, reta, carregada no eixo da peça.

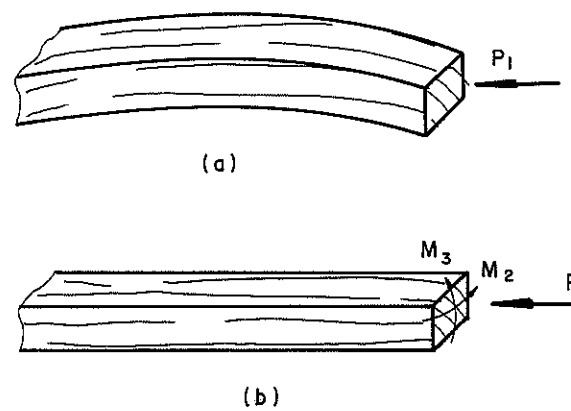


Figura 2.14: Flambagem de uma coluna: (a) Curvatura (b) Força e Momentos fletores equivalentes (fonte: Bodig & Jayne, 1982).

Para ser mantido o equilíbrio dois momentos fletores M_2 e M_3 precisam ser acrescentados. Um momento torçor, que também está presente, é normalmente pequeno o suficiente para ser ignorado sem prejuízo da segurança. Os momentos fletores M_2 e M_3 são responsáveis pelos deslocamentos δ_2 e δ_3 nas direções X_2 e X_3 , respectivamente.

Um acréscimo de carga P_1 aumenta as deflexões δ_2 e δ_3 mais rapidamente que as tensões resultantes de compressão. Esta situação ocorre porque as deflexões fazem aparecer maiores momentos fletores. Como resultados, P_1 está mais e mais se afastando do eixo da barra, até que P_1 finalmente atinja o nível crítico, P_{cr} onde deflexões catastróficas ocorram ou na direção X_2 ou na direção X_3 . A coluna não pode mais suportar a carga aplicada. A direção de flambagem crítica depende de onde a tensão última de flexão é alcançada primeiramente. Se M_2 e M_3 são da mesma ordem de grandeza, o menor momento de inércia governará, com toda probabilidade, em qual plano a tensão alcança primeiro o maior nível sustentável. Portanto, ao levar-se em conta P_{cr} , o menor momento de inércia governa o problema." [17]

Observa-se, pois, que o problema inicial de compressão longitudinal torna-se um problema de flexão oblíqua combinada com a compressão e, finalmente, um problema de flexão por carga excêntrica em um eixo (flexão normal composta).

Para se revelar a diversidade de enfoques dados em diversos países a tal ocorrência é apresentado o quadro 2.2 a seguir.

NORMA/PAÍS	COMPRIMENTO MÁXIMO DA PEÇA CURTA (ℓ)	RESISTÊNCIA ADMITIDA	REFERÊNCIA
NBR 7190-ABNT BRASIL - 1982	11,5d ou 10 ∅	$f_{wc} = 0,2f_{wcm}$	[18]
NB-11R-ABNT BRASIL - 1950	4,3d ou 3,75 ∅	$f_{wc} = 0,2f_{wcm}$	[19]
NDS - NFPA EUA - 1977	11d	$f_{wc} = 0,352\gamma_{rr}f_{wcm}$	[20]
CP112 - II INGLATERRA	_____	$f_{wc} = \frac{f_{wcm} - 2,33 S_x}{1,40}$	[21]
AFNOR B52-001 FRANCA	_____	$f_{wc} = 0,25f_{wcm}$ (Classe I e II) $f_{wc} = 0,20f_{wcm}$ (Classe III)	[22]
DIN 1052 ALEMANHA-1988	17,3d ou 15 ∅	$f_{wc} = f_{wcm} \cdot \omega$	[23]

Quadro 2.2.: Indicação de algumas Normas Técnicas para o dimensionamento das peças sujeitas à compressão paralela, onde:

- d - menor dimensão da seção transversal retangular
- ∅ - diâmetro de uma seção transversal circular
- ω - coeficiente de ponderação da esbeltez na resistência
- f_{wc} - limite de tensão admitido
- f_{wcm} - média das resistências obtidas em ensaios normalizados
- γ_{rr} - relação de resistência usada para comparar a peça estrutural real e a hipotética (isenta de defeitos)
- S_x - desvio padrão envolvido nos ensaios.

Na Alemanha, a Norma DIN 52185 [6] recomenda que a seção transversal seja de, no mínimo 2cm x 2cm. Kollmann e Côté Jr. [24] apresentam restrições: "Se a seção transversal é aumentada para além de 5cm x 5cm, a resistência à compressão descrece com uma regra, devido a irregularidades e defeitos inevitáveis. As superfícies de extremidades das fibras dos blocos a ensaiar, obrigatoriamente, devem ser paralelas entre si e em ângulo reto com o eixo longitudinal. A máxima resistência à compressão depende da razão entre o comprimento, ℓ

e a menor dimensão transversal, a. Baumann (1922) obteve os resultados mostrados no Quadro 2.3. para espécies de coníferas secas ao ar.

Razão l/a	RESISTÊNCIA RELATIVA (%)
0,5	103
1	100
3...6	93

Quadro 2.3.: Variação da resistência com o comprimento
[Fonte: Kollmann e Côté Jr, 1968]

Valores semelhantes são dados por Ryska (1932). Estes fenômenos ocorrem pelo atrito entre as superfícies de extremidade dos corpos de prova e dos pratos da máquina de ensaio que impedem a deformação lateral. Um valor recomendável para (l/a) é 4 (quatro)."

2.4. VARIAÇÃO DE TAMANHO E SUA INFLUÊNCIA NA RESISTÊNCIA

Os problemas estruturais decorrentes variação da resistência própria do material quando se aumentam as suas dimensões estão, desde há muito tempo, entre as limitações de uso (vão, sistemas de ligações, altura, peso) preponderantes para um certo material de construção.

A abordagem do problema foi pioneira em Galileu Galilei. Recente artigo do Prof. Lobo Carneiro [25], comemorando os 350 anos de publicação de livros sobre "Duas Novas Ciências" - a Resistência dos Materiais e o Estudo do Movimento - demonstra isso. Nas suas palavras:

"Galileu abordou com grande clarividência os problemas relacionados com a semelhança física. São bem conhecidos seus estudos sobre a capacidade de corpos sólidos, geometricamente semelhantes, resistirem a cargas adicionais, além de seu próprio peso. Muito antes dele, é certo, utilizavam-se modelos reduzidos em certas atividades técnicas, especialmente na construção de máquinas e edificações. Mas a ausência de uma teoria da semelhança física fazia com que essas tentativas dessem lugar a freqüentes fracassos e frustrações. No século I a.C., o arquiteto romano Vitrúvio foi levado à seguinte conclusão: "Há algumas coisas que, quando aumentadas, imitando modelos pequenos, são efetivas: outras não podem ter modelos". Foi a Galileu que coube a primazia de acrescentar, às condições da semelhança geométrica, outras igualmente necessárias, hoje conhecidas como condições de seme-

lhança física. São estas últimas que tornam efetivamente possível deduzir o comportamento dos protótipos a partir do comportamento dos modelos.

A físico e matemático francês Joseph Fourier (1768-1830), em sua Teoria analítica do calor, e o cientista soviético contemporâneo Leonid Sedov, em sua obra Semelhança e dimensões em mecânica, definem que dois processos são semelhantes quando das características de um deles podem-se deduzir as características do outro por um simples cálculo, análogo ao de uma mudança de sistema de unidades de medida. Para efetua-lo, é preciso conhecer os 'fatores a escala'. As condições de semelhança física estabelecem, entre esses fatores, relações que deve ser obedecidas. Modernamente, essas condições de semelhança física são expresas através da igualdade, no modelo e no protótipo, de parâmetros adimensionais formados por produtos de potências dos parâmetros originais do problema e conhecidos como 'números π '. "

"(...) Galileu foi levado a investigar a resistência dos corpos sólidos por um problema de violação da semelhança física. A questão foi constatada empiricamente, no grande estaleiro que era o arsenal de Veneza, ao se compararem os desempenhos de estruturas geometricamente semelhantes e construídas com o mesmo material, mas em escalas diferentes. Os operários engajados nas obras comentaram com Galileu que, segundo sua experiência, as estruturas maiores tinham menor capacidade de resistir a cargas adicionais, relativamente ao seu peso próprio, que as pequenas.

Esta observação era corroborada por inúmeros fatos facilmente observáveis no cotidiano: animais, plantas e estruturas de grande porte parecem ser proporcionalmente menos resistentes que os menores, quando aproximadamente semelhantes do ponto de vista geométrico. Galileu procurou então elaborar uma teoria sobre a resistência dos corpos sólidos."

"(...) Logo de início, Galileu rejeitou a tese de que o pior desempenho das estruturas maiores resultaria apenas das 'imperfeições da matéria', isto é, da heterogeneidade dos materiais e de defeitos de fabricação. "Afirmarei também que, abstraindo de todas as imperfeições da matéria e supondo-a perfeitíssima, inalterável e isenta de toda mudança accidental, sua simples existência material faz com que a máquina maior, fabricada com a mesma matéria e as mesmas proporções que a menor, seja perfeitamente simétrica à menor em todas as outras condições, menos no vigor e resistência ao tratamento violento;... quando maior for, proporcionalmente mais fraca se-

rá."

Em sua teoria da resistência à ruptura dos corpos sólidos. Galileu demonstra que é na violação da semelhança física que reside a causa da chamada 'fraqueza relativa dos gigantes': ao se aumentarem as dimensões de um corpo, conservando a semelhança geométrica, o peso próprio aumenta em proporção maior que a capacidade de resistir a cargas adicionais, pois o peso próprio varia com o cubo da escala geométrica, enquanto a capacidade de resistir aumenta com seu quadrado."

"(...) Da teoria de Galileu deduz-se que vigas geometricamente semelhantes, abstraindo-se do seu peso próprio, são capazes de resistir a cargas externas proporcionais ao quadrado de uma das suas dimensões. Já o peso próprio, que é também uma carga a atuar sobre a viga, é proporcional ao cubo dessa dimensão. Isto implica que, quando se aumentam todas as dimensões, conservado a semelhança geométrica, o peso próprio cresce em maior proporção que a capacidade de resistir às cargas aplicadas. Em sua linguagem, Galileu afirma na 'Proposição VI' da 'Giornata seconda' que os esforços nas seções transversais de ruptura, resultantes do peso próprio, e as resistências dessas seções estão entre si numa 'proporção sesquiáltera' (potência $3/2$).

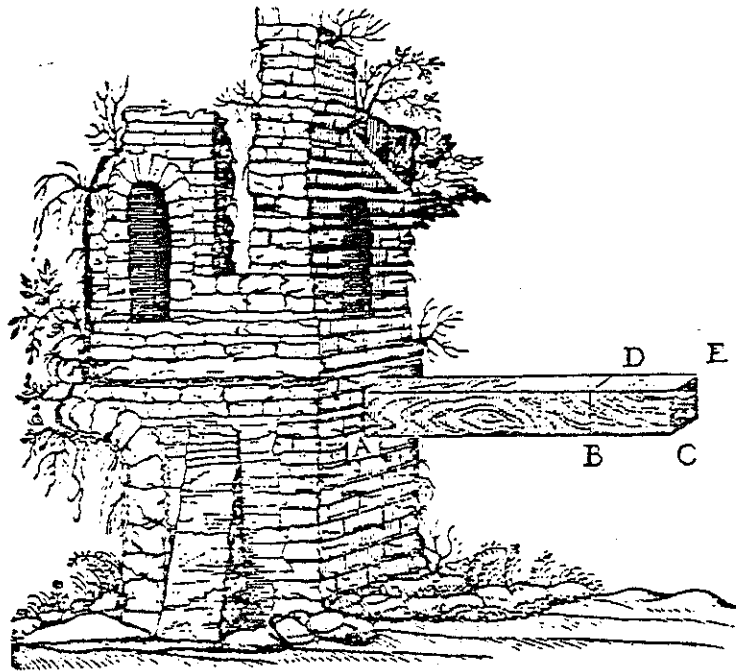


Figura 2.15: A teoria da flexão; Galileu descobriu a lei da resistência dos materiais à tração simples, tornando-se precursor do conceito moderno de 'tensão de ruptura'. Combinando esta lei com o princípio da alavanca de Arquimedes e com uma hipótese incorreta sobre a distribuição dos esforços internos numa seção transversal, Galileu cons -

truiu uma teoria da flexão que, apesar de conter uma incorreção parcial, conduziu a resultados corretos, no que se refere às relações entre resistências de vigas de diferentes vãos e seções transversais. Comparando vigas geometricamente semelhantes, ele deduziu que as vigas são capazes de resistir a forças aplicadas na razão dos quadrados de uma dimensão representativa. Como o peso próprio dessas vigas é proporcional ao cubo dessa dimensão representativa, ele concluiu que, tratando-se de vigas semelhantes, as maiores têm menos capacidade relativa de resistir a cargas adicionais, além do seu peso. Nisto consiste o célebre princípio galileano da 'fraqueza relativa dos gigantes'. [Fonte: Lobo Carneiro, 1989]

Segue-se, com consequência, a 'Proposição VII', certamente a mais importante da 'Gionata seconda': "Entre os prismas e cilindros pesados, existe um e só um que se encontra (sob o efeito de seu peso próprio) no estado limite entre a ruptura e a não-ruptura, de modo que todo sólido maior, incapaz de resistir ao seu próprio peso, quebrar-se-á, ao passo que todo sólido menor aporá alguma resistência a uma força destinada a quebrá-lo."

Com esta proposição, Galileu introduziu mais um conceito novo, o de 'tamanho limite' de uma estrutura: "(...)do que até foi demonstrado, se infere claramente a impossibilidade, não somente na arte mas também na natureza, de aumentar seus mecanismos até tamanhos enormes, de modo que seria impossível construir navios, palácios ou templos imensos, cujos remos, mastros, vigas e correntes de ferro e, numa palavra, todas as partes constituíssem um todo. Da mesma forma, a natureza não poderia fazer árvores de tamanho colossal, porque seus ramos, arqueados pelo próprio peso, acabariam por se quebrar. Igualmente, seria impossível construir estruturas ósseas para os homens, os cavalos ou outros animais, que pudessem subsistir e desempenhar suas próprias funções pois, para que tais animais tivessem alturas imensas, deveria ser utilizado um material mais duro ou mais resistente que o habitual... A partir disto é evidente que, quem quisesse manter, num imenso gigante, as proporções dos membros de um homem comum, deveria ou encontrar uma matéria bem mais dura e resistente para formar-lhe os ossos, ou admitir que sua robustez é proporcionalmente muito menor que a dos homens de estrutura pequena, pois, diversamente, aumentando demasiado sua altura, vê-lo-íamos, sobrecarregado pelo próprio peso, cair. Ao contrário, pode-se verificar que, ao diminuir os corpos, não se diminuem as forças na mesma proporção, mas, antes, que os menores se tornam proporcionalmente mais resistentes."

Nessas passagens da 'Giornata seconda', além de mostrar que a semelhança física - e portanto a capacidade de resistir a cargas aplicadas, relativamente ao peso próprio - de corpos sólidos de uma mesma matéria se altera quando se aumentam suas dimensões mantendo a semelhança geométrica, Galileu indica claramente como se poderia manter essa semelhança: deve-se aumentar a resistência mecânica do material ou diminuir seu peso específico. Modernamente, essa condição corresponderia ao 'número π ', $\frac{\gamma \cdot \ell}{s}$, em que γ é o peso específico do material, ℓ uma dimensão representativa do corpo e s a resistência mecânica do material. Para que esse 'número π ' tenha o mesmo valor no corpo pequeno e no maior, o aumento de ℓ deve ser compensado por um aumento de s ou por uma diminuição de γ . A atribuição do nome de Galileu a esse 'número π ' constituiu, portanto, uma justa homenagem ao fundador da teoria da resistência dos materiais.

Mas Galileu foi ainda mais longe. Com base na 'Proposição VIII', introduziu na maioria dos modelos o conceito hoje denominado 'distorção', ao indicar uma terceira solução para manter no gigante a mesma resistência relativa do homem normal: aumentar as dimensões transversais em proporção maior que as longitudinais.

"Para ilustrar o que digo, desenhamos um osso cujo comprimento foi aumentado apenas três vezes, e cuja espessura foi aumentada em tal proporção [nove vezes] que pudesse realizar num grande animal a mesma função que corresponderia ao um osso menor de um animal também menor." E Galileu menciona então Ariosto, seu "poeta querido", "talvez tenha presentido essa condição" ao descrever "a figura e o aspecto monstruoso de um gigante, em consequência da deformação desproporcional de seus ossos!"

Esse tipo de distorção não se verifica nos mamíferos terrestres contemporâneos, que, do ponto de vista geométrico, são aproximadamente semelhantes. Por isso, comparados aos grandes, os animais pequenos - como ratazanas, gatos e cães - são mais capazes de suportar cargas adicionais, relativamente ao seu peso, assim como de correr e saltar. Para os mamíferos terrestres contemporâneos, existe uma 'tamanho limite', que é próximo do tamanho do elefante. Os animais pré-históricos de estrutura assemelhada à dos mamíferos terrestres contemporâneos, como os mamutes, apresentavam a distorção sugerida por Galileu para os gigantes: as dimensões transversais de seus ossos eram proporcionalmente muito maiores que, por exemplo, as dos cavalos atuais.

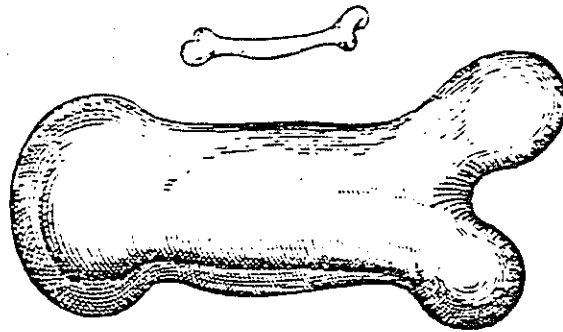


Figura 2.16: A fraqueza relativa dos gigantes. Neste desenho, Galileu apresenta "a figura de osso cujo comprimento foi aumentado apenas três vezes e cuja espessura foi aumentada em tal proporção [nove vezes] que pudesse realizar num grande animal a mesma função que corresponderia ao osso menor de um animal também menor". Se fosse mantida integralmente a semelhança geométrica, 'robustez' do animal gigante - isto é, sua capacidade de suportar cargas adicionais, além do seu próprio peso - seria proporcionalmente muito menor do que as dos pequenos animais, a não ser que se encontrasse "uma matéria bem mais dura e resistente para formar os ossos" o que "se diminuir-se proporcionalmente o peso [específico] da matéria dos mesmos ossos e peso [específico] de tudo que se apóia sobre os ossos.

É claro que o 'tamanho limite' depende da forma ou do tipo de estrutura, como aliás se verifica nas estruturas da engenharia civil: o 'vão limite' de uma ponte do tipo pênsil é muito maior que o de uma em arco; este, por sua vez, é maior que o de uma ponte do tipo viga reta. O Galileu compara a capacidade de suportar cargas adicionais de cães e cavalos porque esses animais são aproximadamente semelhantes, como o são a maioria dos mamíferos terrestres de quatro patas. Já os dinossauros, por exemplo, puderam existir em tamanhos muito maiores por terem uma estrutura completamente diferente. A cauda e o pescoço destes animais, muito longos e pesados, aliviavam os esforços na parte central do corpo, como ocorre nas pontes do tipo cantilever (a estrutura dos mamíferos é mais assemelhada à de uma ponte de viga reta simples). " [24]

Alguns estudos foram desenvolvidos para comparar diretamente a resistência obtida de corpos de prova normalizados (em diferentes sistemas), dos quais se podem destacar a comparação entre o corpo de prova norte-americano e o francês, conduzido por Sallenave[26].

"Os dois corpos de prova, o inglês ou ASTM e o francês ou AFNOR, são quase homotéticos. Ambos são paralelepípedos retângulos, tendo o corpo de prova ASTM duas polegadas por duas polegadas de seção e oito polegadas de comprimento, o corpo de prova francês dois centímetros por dois centímetros na seção e seis centímetros de comprimento. A ação das máquinas de ensaios é a mesma.

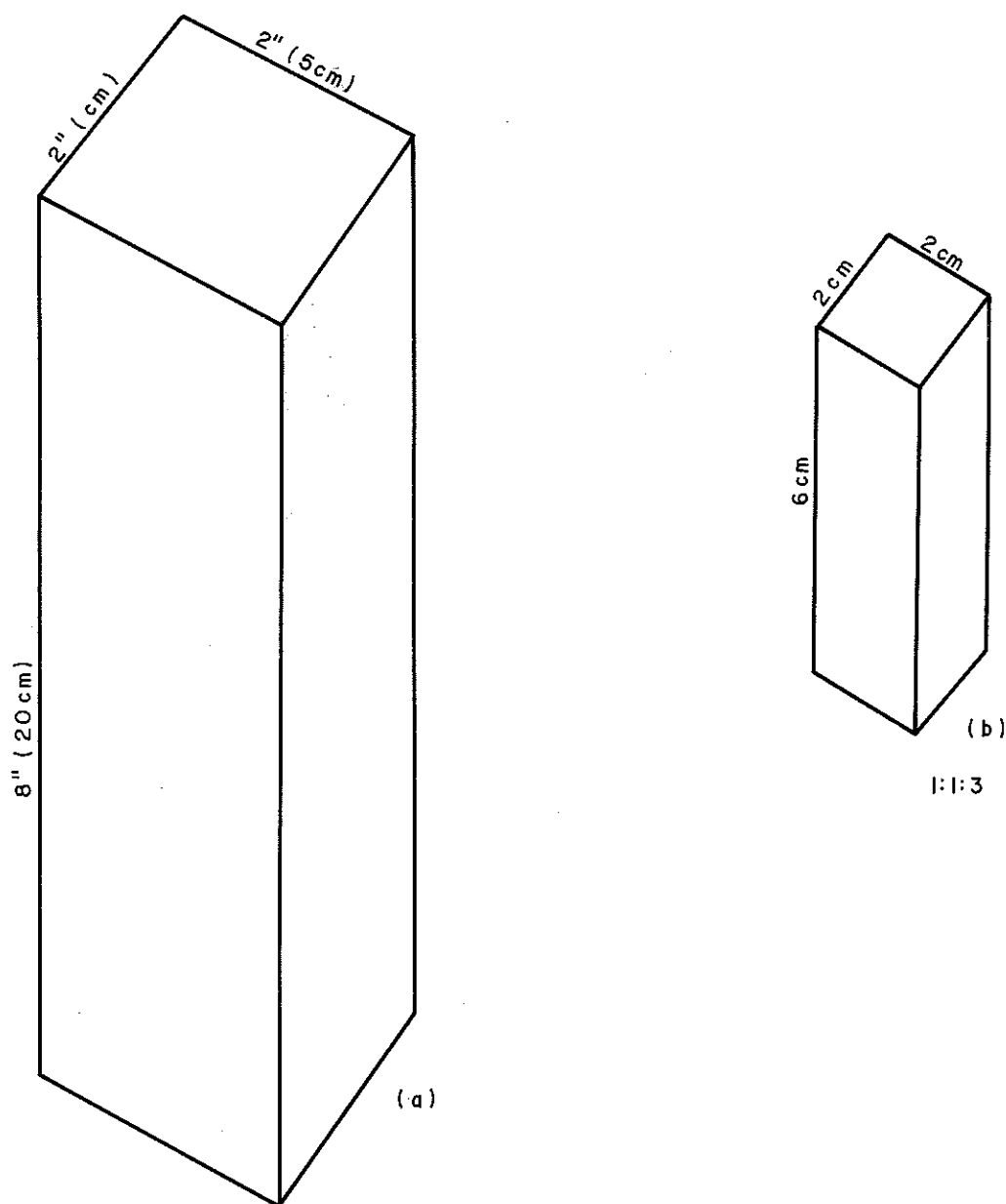


Figura 2.17: Corpos de prova normalizados (a) ASTM; (b) AFNOR

Nestas condições, as resistências unitárias dos ensaios de vem ser parecidas.

Temos comparados, para resistência à compressão paralela às fibras, os valores obtidos dos corpos de prova ASTM com os corpos de prova AFNOR, todas as grandezas sendo medidas (kgf e cm). Esta

comparação, realizada com 22 (vinte e duas) espécies diferentes, das mais duras (Azobé) às mais macias (Balsa), resultou no valor médio abaixo:

ASTM (kgf/cm ²)	$\frac{C_A}{C_F} = 1,04$	máximo: 1,35
AFNOR (kgf/cm ²)		mínimo: 0,76

O Forest Product Research Laboratory (FPRL) de Londres, tendo recentemente adotado os corpos de prova de 2cm x 2cm de seção transversal, utiliza para compressão paralela às fibras o corpo de prova francês AFNOR (2cm x 2cm x 6cm). As duas publicações mais recentes sobre as resistências mecânicas de madeiras, publicadas por este organismo ("The Strength Properties of Timber", boletins nº 45 e 50) fornecem a relação entre os corpos de prova AFNOR a ASTM para resistência à compressão paralela.

É interessante notar que o valor trazido por este relatório é exatamente o mesmo que aquele acima citado, ou seja, 1,04."

2.5. INFLUÊNCIA DA UMIDADE E DA DENSIDADE NA RESISTÊNCIA DA MADEIRA À COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS

2.5.1. Umidade e Densidade Aparente

A umidade da madeira é determinada pela razão entre a massa de água e a massa total apresentada em um volume qualquer, esta belecido, de madeira. A relação entre massa e volume apresentados aqui define a densidade aparente da madeira a ser considerada. Tal intimidade é revelada pelo diagrama de Kollmann, figura 2.18 [27].

Hellmeister [28] cita que "a diferença detectada (entre a obtenção experimental de uma nova densidade aparente, e pelo diagrama de Kollmann, para uma variação pré-estabelecida no teor de umidade) é, porém, muito pequena, da ordem $\pm 1\%$ (um por cento para mais ou para menos): Além disso, é usualmente publicado o valor da densidade para determinado teor de umidade. O diagrama de Kollmann permite ajustar esse valor aos demais de umidade: isso o torna muito útil na prática."

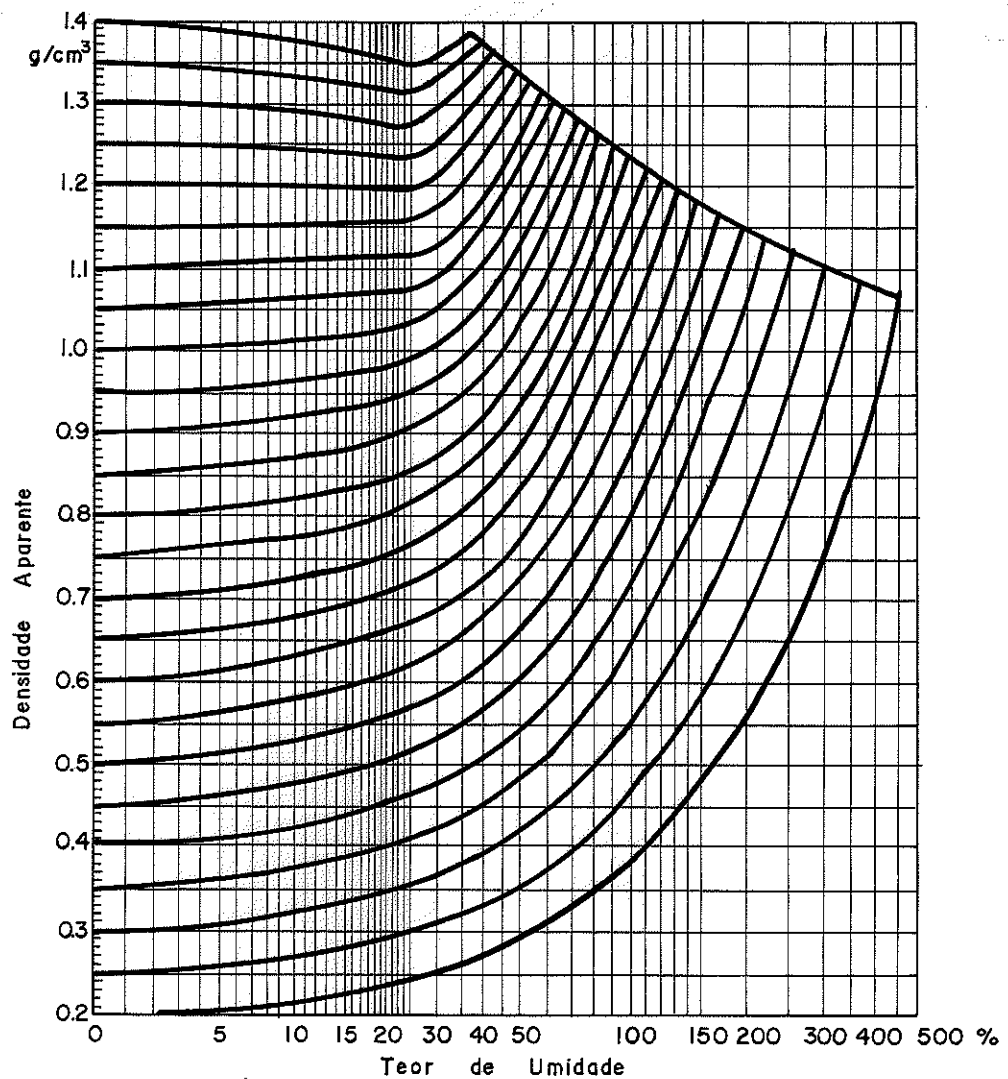


Figura 2.18: Diagrama de Kollmann, relacionado a variação da densidade aparente da madeira com a variação de seu teor de umidade [Fonte: Kollmann, F.F.P. e Côté Jr. W.A., 1968, p.167].

2.5.2. Relações entre a resistência à compressão paralela, umidade e densidade aparente

2.5.2.1. Densidade aparente

"A resistência à compressão da madeira, paralela às fibras, aumenta com a densidade não apenas para algumas espécies, mas para toda a escala de densidades, de todas as espécies. Podem ser relacionadas como uma função linear [29]:

$$f_{CW} = I' \rho + b \quad (2.IIa)$$

onde: f_{CW} é a resistência da madeira à compressão paralela

I' é um coeficiente de qualidade

37

b é um coeficiente de resíduo

ρ é a densidade aparente

Pode se assumir, por simplicidade, que a resistência seja diretamente proporcional à densidade aparente:

$$f_{CW} = I \cdot \rho \quad (2.II \text{ b})$$

Esta lei foi discutida pela primeira vez por Monin, na França. Schlyter encontrou os valores indicados no quadro 2.4. para o pinho sueco.

TEOR DE UMIDADE U%	FATOR DE QUALIDADE I
6...10	1250
10...19	850
23...30	550

Quadro 2.4: Relação entre o fator de qualidade para densidade e o teor de umidade da madeira de pinho sueco [Fonte: Kollmann e Côté Jr., 1968, p.343].

Newlin e Wilson publicaram, em 1919, a seguinte relação entre a "gravidade específica R" (peso seco em estufa, volume na condição de umidade indicada) e a resistência à compressão f_{CW} , que se baseia nos resultados médios de ensaios de resistência de mais de 160 (cento e sessenta) espécies:

$$\text{Madeira verde: } f_{CW} = 470 R \quad (2.III \text{ a}) \quad [\text{kp/cm}^2]$$

$$\text{Madeira seca ao ar: } f_{CW} = 860 R \quad (2.III \text{ b}) \quad [\text{kp/cm}^2] \text{ "}$$

2.5.2.2. Teor de Umidade

"Abaixo do ponto de saturação das fibras, a resistência da madeira aumenta à medida que ela seca. Acima do ponto de saturação das fibras a efeito do conteúdo de umidade na resistência estática é desprezível. A redução da resistência à compressão da madeira no inchamento é facilmente compreendida se considerar que as moléculas de água estão depositadas entre as micelas, portanto aumentan

do a distância entre elas, o que causa a redução das forças atrativas intermicelares e, posteriormente, a coesão do conjunto." [30]

Havendo, na árvore, variação do teor de umidade de acordo com a posição da amostra, Kollmann e Côté Jr. [30] apresentam um quadro, a seguir reproduzido, com a variação da resistência à compressão paralela e o teor de umidade com a posição na árvore e origem de cada uma.

FONTE:	Sítios 13 e 21(a)	Sítio 97 (a)	KALMINS (b)
Teor de umidade	Madeira verde	Madeira verde	13...15%
Ao rés do chão	195...214	242...313	463...560
Meio do tronco	242...248	281...328	494...612
Topo do fuste	249...274	288...348	476...599

FONTE:	Tora I (c)	Tora II (c)	Tora III(c)
Teor de umidade	0%	0%	0%
Ao rés do chão	714...1102	834...1242	750...1080
Meio do tronco	824...1208	852... 979	890...1126
Topo do fuste	955...1345	736...1112	1004...1149

Quadro 2.5: Efeito da posição na árvore e do teor de umidade na resistência à compressão paralela de freijão (Ashwood) em kp/cm^2 [Fonte: Kollmann e Côté Jr., 1968, p.346]

onde: (a) Estudos de Clarke, Chaplin e Armstrong (1933)
 (b) Estudos de Kalnins (1941)
 (c) Estudos de Kollmann (1941)

A Norma Brasileira NBR 6230/82, "Ensaaios Físicos e Mecânicos de Madeiras" [31] aponta, em seu item 8, "Compressão em função da umidade", o procedimento seguinte:

"(a) O número de corpos de prova de 2cm x 2cm x 3cm, destinados a este ensaio, é de quarenta. São tirados su per pos tos (...) de forma a abrangerem a mesma região de fibras da tora.

(b) Determina-se a resistência à compressão dos corpos de prova, com teores variáveis de umidade, desde o mate rial verde até completamente seco. Com os valores ob tidos traça-se uma curva de variação como por exemplo a da figura 7.

(c) Os ensaios são executados de acordo com as normas re ferentes à compressão-qualificação, anteriormente

descritas (item 7).

- (d) Do trecho proximoamente retilíneo entre 10% e 20% de umidade, tira-se um fator de correção que permite com suficiente aproximação referir-se às resistências obtidas para madeira seca ao ar, com o teor normal de 15% de umidade. Este fator é chamado "coeficiente de influência da umidade".

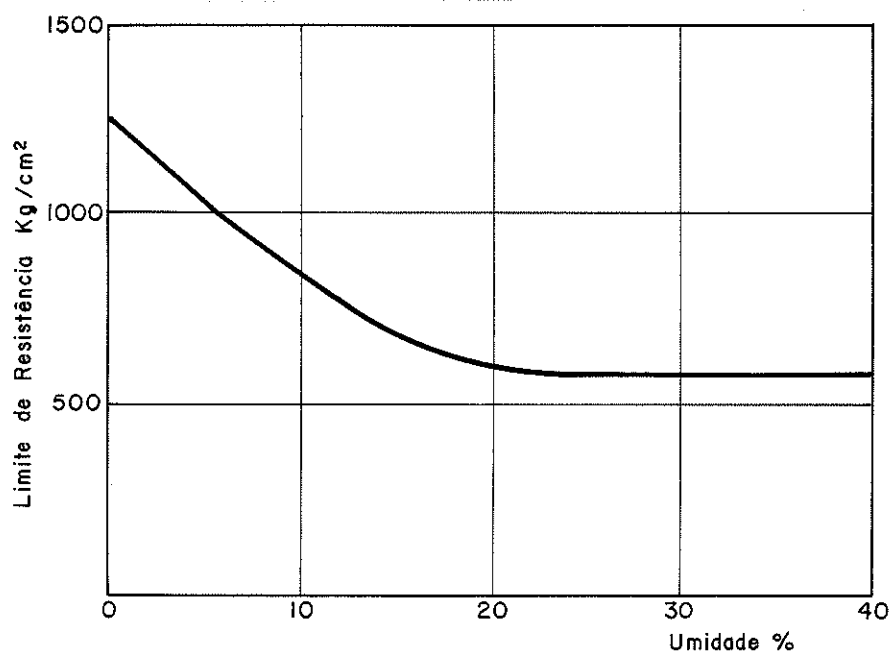


Figura 2.19: Variação da resistência à compressão paralela em função do teor de umidade. Exemplo obtido da Peroba rosa (*Aspidasperma polyneuron*) [Fonte: NBR 6230, 1982, p.7]

2.5.2.3. Inter-relação entre resistência, umidade e densidade aparente

Além dos estudos já mencionados, Hellmeister [32] desenvolve experimentação visando estabelecer equações relacionando os variáveis umidades, densidade aparente e a resistência à compressão paralela para madeiras de árvores crescidas no Brasil e mostra, graficamente, seus resultados (figuras 2.20, 2.21, 2.22).

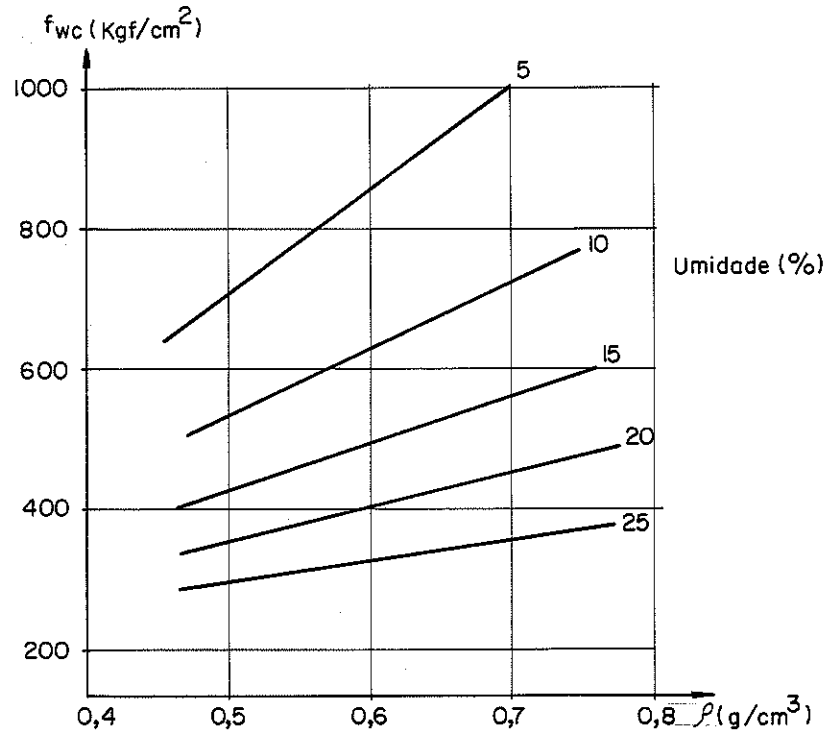


Figura 2.20: Diagrama de interação densidade aparente (ρ), umidade e resistência à compressão paralela (f_{wc}) para o Pinho do Paraná (*Araucaria angustifolia*) [Fonte: Hellmeister, 1982, p.62].

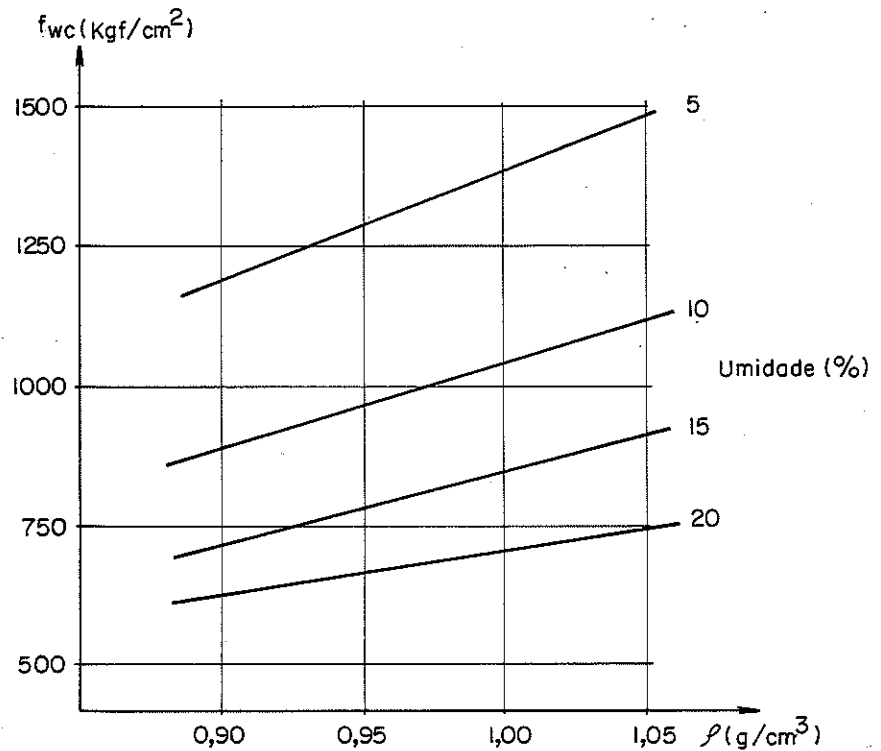


Figura 2.21: Diagrama de interação densidade aparente (ρ), umidade e resistência à compressão paralela (f_{wc}) para o Eucalipto citriodora (*Eucalyptus citriodora*, Hook), corpos de prova 2cm x 2cm x 3cm [Fonte: Hellmeister, 1982, p.63].

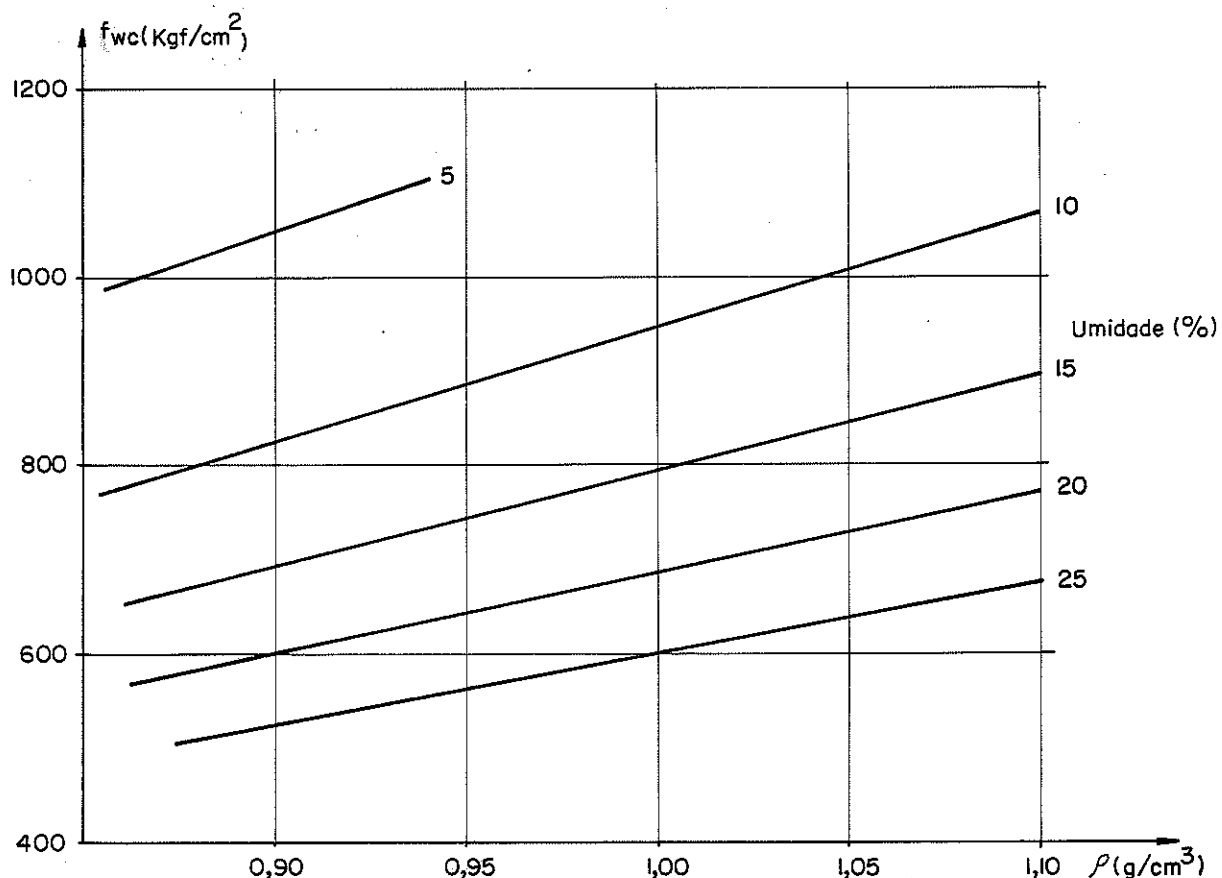


Figura 2.22: Diagrama de interação densidade aparente (ρ), umidade e resistência à compressão paralela (f_{wc}) para o Eucalipto citriodora (*Eucalyptus citriodora*, Hook), corpos de prova de 6cm x 6cm x 18cm [Fonte: Hellmeister, 1982, p.64].

É apresentado o quadro a seguir, ilustrativo das interferências da variação da densidade aparente e da umidade na resistência, em questão:

DENSIDADE APARENTE (g/cm ³)	UMIDADE (%)	RESISTÊNCIA (kgf/cm ²)	
		cp 2x2x3 (cm) ³	cp 6x6x18 (cm) ³
1,00	10	1045	950
1,00	15	850	790
1,00	20	710	685

Quadro 2.6: Exemplo de interferência do tamanho, além da umidade e densidade na resistência [Fonte: Hellmeister, 1982, p.64]

A avaliação estatística de várias experimentações conduzidas em diferentes épocas, realizada por Pigozzo [33], com diversos corpos de prova de Peroba Rosa, Pinho do Paraná e Eucalipto

citriodora, visou relacionar as propriedades de resistência e elasticidade de tais madeiras com a umidade e o peso específico, relatado em seu trabalho por "densidade".

A análise dos resultados por regressão linear múltipla apresentou equações correlacionando entre si limite de resistência, umidade e densidade; limite de resistência, limite de proporcionalidade, umidade e densidade; módulo de elasticidade limite de resistência e umidade; módulo de elasticidade, limite de proporcionalidade e umidade. As equações estão apresentadas no Quadro 2.7. Os resultados mais significativos foram apresentados em figuras, condensadas e mostrados sinteticamente na Figura 2.23.

DETERMINAÇÃO	EQUAÇÃO	CORRELAÇÃO
[f _c , u, ρ]	$\log \frac{f_c}{\rho} = 0,65306 - 0,03333u + 0,00046u^2 + 2,45121\rho^{-1}$ (1)	R ² = 0,9607
	$\log \frac{f_c}{\rho} = 1,41969 - 0,04797u + 0,00050u^2 + 2,19141\rho^{-1}$ (2)	R ² = 0,9741
	$\log \frac{f_c}{\rho} = -0,92143 - 0,03157u + 0,00053u^2 + 2,34034\rho^{-1}$ (3)	R ² = 0,9876
[E, f _c , u, ρ]	$\frac{E}{u} = -6354,33462 + 382,95770u + 44,47550f_c - 1,68951u \cdot f_c$ (1)	R ² = 0,8444
[f _c , f _{cp} , u, ρ]	$\frac{f_{cp}}{\rho} = -346,22708 + 0,71608f_c + 0,00492u \cdot f_c + 281,84647\rho^{-1}$ (1)	R ² = 0,6540
[E, f _{cp} , u, ρ]	$\frac{E}{u} = 1825 + 34,9343f_{cp} - 0,91954u \cdot f_{cp}$ (1)	R ² = 0,8120

Quadro 2.7: Sinopse estatística das determinações de influência da umidade e da densidade na compressão paralela às fibras, onde:

f_c : limite de resistência da madeira à compressão paralela às fibras

u : teor de umidade da madeira

ρ : peso específico aparente da madeira

E : módulo de elasticidade avaliado na compressão paralela às fibras

f_{cp}: limite de proporcionalidade apresentado na compressão paralela às fibras

(1): Peroba Rosa

(2): Pinho do Paraná

(3): Eucalipto Citriodora

[Fonte: Pigozzo, 1982].

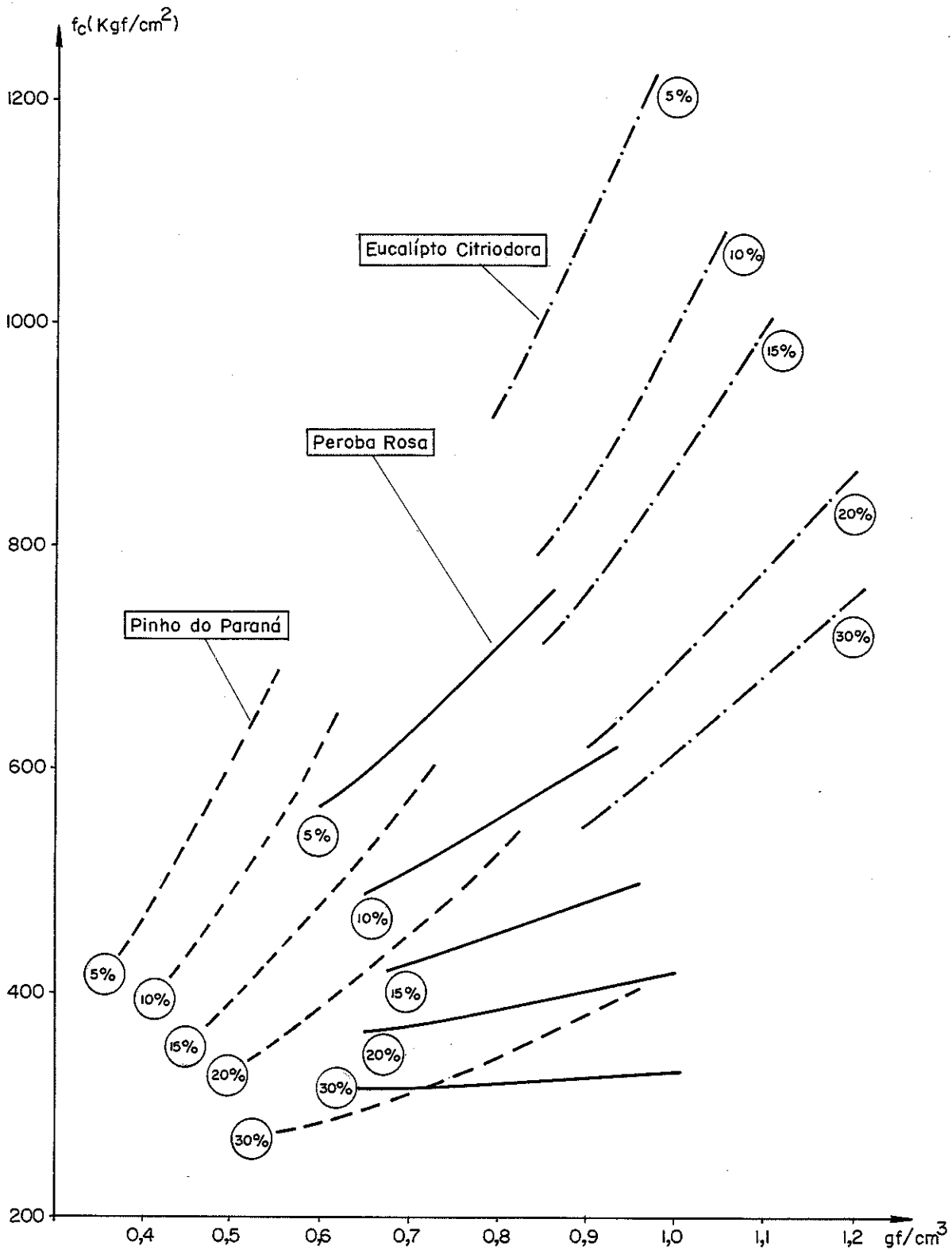


Figura 2.23: Determinação das variações de umidade, peso específico e resistência à compressão paralela às fibras, das essências citadas [Fonte : Pigozzo, 1982]

2.6. OUTRAS INFLUÊNCIAS IMPORTANTES NA RESISTÊNCIA DA MADEIRA À COM-PRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS

2.6.1. Velocidade de Ensaio

"Bergt Norén [34] define a madeira como um material visco-elástico e afirma ser o propósito de seu trabalho encontrar um método simples de ensaiar a madeira, com velocidade constante de deslocamento em máquinas de ensaio hidráulicas e estabelecer a influência da velocidade de deformação na resistência. Os ensaios foram realizados nas velocidades de 3mm/min, 1mm/min, 0,3mm/min, 0,1mm/min e 0,03mm / min. O Quadro 2.8. apresenta os resultados obtidos.

CORPOS DE PROVA	VELOCIDADE DE DES-LOCAMENTO (mm/min)	RESISTÊNCIA À COM-PRESSÃO (kgf/cm ²)	OBSERVA-ÇÕES
101 - 136	3,0	486,2	extensômetro mecânicas
201 - 236	1,0	476,5	
301 - 336	0,3	451,6	
801 - 836	0,3	456,7	extensô-metros elétricos
601 - 636	0,3	463,2	
401 - 436	0,1	440,7	
501 - 536	0,03	421,5	

Quadro 2.8: Valores da velocidade de deslocamento de resistência à compressão da madeira [Fonte: Castro Otto, 1985]

Na equação 2.3. os valores da tensão no limite de resistência à compressão são apresentados em função do logaritmo da velocidade de deslocamento:

$$f_{wc} = 473 + 33,1 \log v \quad (2.3)$$

onde: f_{wc} é a tensão, em kgf/cm²

v é a velocidade de deslocamento, em mm/min

Considerando-se f_{wc} como variável dependente, é possível traçar o diagrama da figura 2.24, com os valores experimentais.

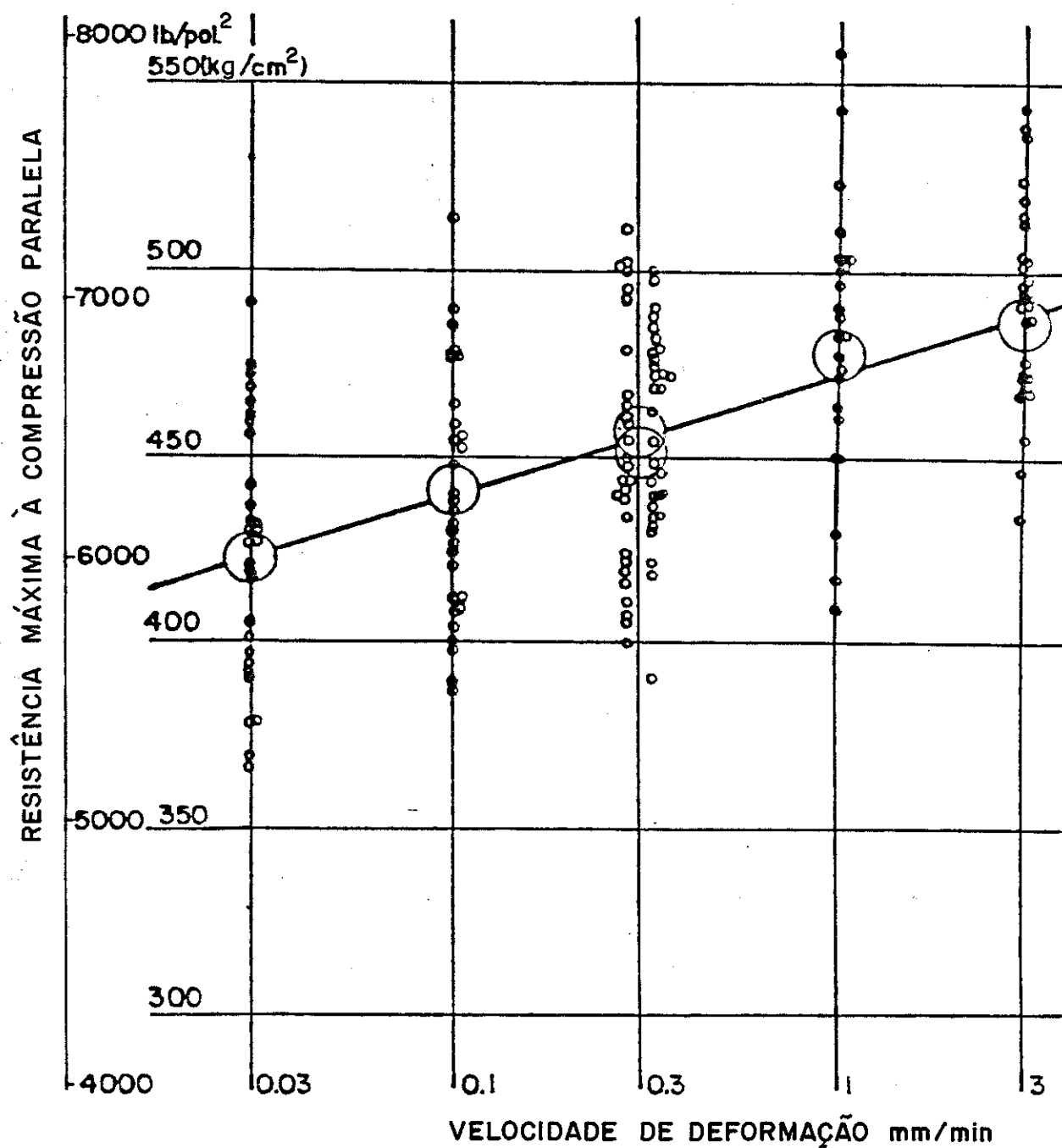


Figura 2.24: Relação entre a resistência à compressão e a velocidade de deformação [Fonte: Castro Otto, 1985 [35].]"

São apresentados no Quadro 2.9. algumas especificações importantes para o ensaio de corpos de prova à compressão paralela às fibras:

NORMA/PAIS	VELOCIDADE DO ENSAIO	DURAÇÃO DO ENSAIO	REF
DIN 52185 ALEMANHA - 1976	Velocidade de de- formação constante	(1,5 ± 0,5)min	[36]
ASTM D143-52 ESTADOS UNIDOS-1982	0,06cm/min	aproximadamente 5min	[37]
ASTM D198-76 ESTADOS UNIDOS-1982	0,001cm/cm. min	10 minutos (não menor de 5min nem mais de 20 min)	[38]
ABNT NBR 6230 BRASIL - 1982	100 kgf/cm ² . min	—————	[39]
AFNOR-NFB-51007 FRANÇA - 1942	entre 200kgf/cm ² .min e 300 kgf/cm ² .min	—————	[40]

Quadro 2.9: Especificação das velocidades e duração de ensaios de acordo com normas de diversos países.

2.6.2. Duração do Carregamento, Fluência e Fadiga

2.6.2.1. Duração de carregamento

"Os valores das propriedades mecânicas da madeira são, usualmente, referidos como valores estáticos de resistência, cujos ensaios são conduzidos a uma taxa de carregamento ou a razão de deformação tais que a máxima carga seja obtida em cerca de cinco minutos. Valores maiores de resistência são obtidos para a madeira carregada em taxas mais rápidas e valores mais baixos de resistência são produzidos a taxas mais lentas. Para se ilustrar este fato, a carga requerida para se romper uma peça de madeira, por exemplo em um segundo, é aproximadamente 10% superior à obtida em um ensaio padrão. Em taxas ainda maiores de velocidade de carregamento, a resistência é,

aproximadamente, uma função exponencial da taxa. A figura 2.25. ilustra como a resistência diminui com o tempo para se atingir a carga máxima. A variabilidade mostrada é baseada em resultados de diversos estudos sobre flexão, compressão e cisalhamento.

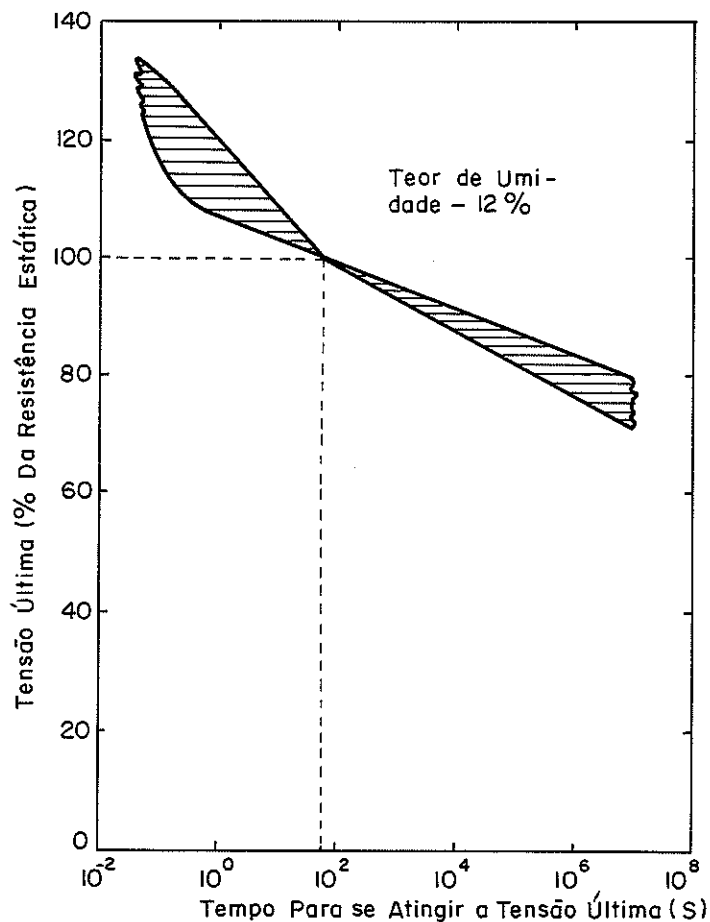


Figura 2.25: Relação entre as tensões limites para carregamentos rápidos e lentos comparadas com aquelas obtidas em 5 minutos. A variabilidade dos valores está representada pelas hachuras [Fonte: Wood Handbook, fig. 4.16, 1988[41].]"

As normas ASTM D245 [42] e ASTM D2555 [43] trazem recomendações expressas para a conversão de valores: "Os valores padronizados para a madeira são baseados em ensaios de cinco a dez minutos de duração, e todos (exceto o módulo de elasticidade) estão sujeitos a ajustes para outras durações de carregamento". A figura 2.26. mostra a relação generalizada da resistência com duração da carga.

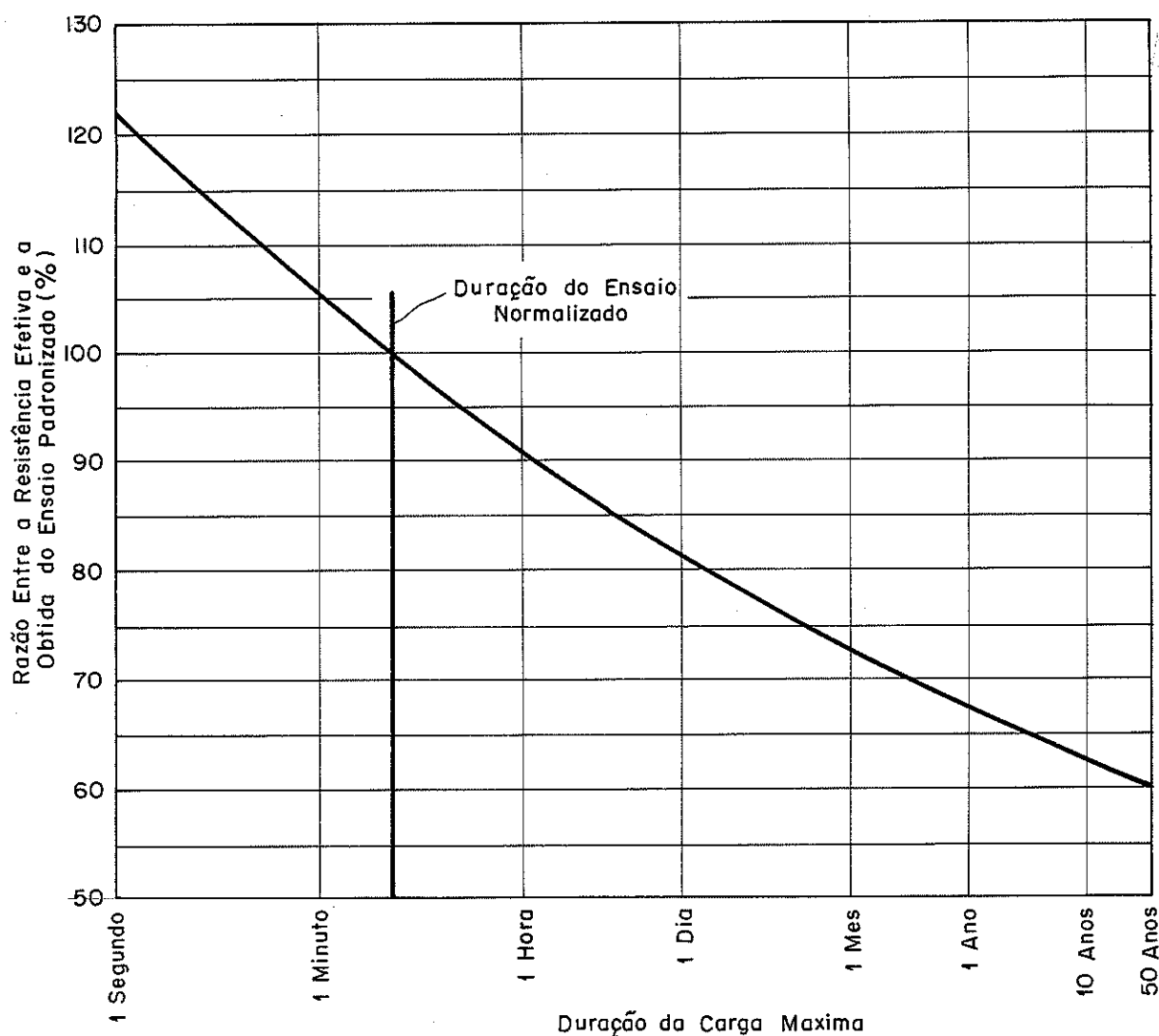


Figura 2.26: Relação entre resistência e duração do carregamento. [Fonte: ASTM D2555, 1981].

2.6.2.2. Fluência

"Quando carregada uma primeira vez, uma peça de madeira de forma-se elasticamente. Se a carga é mantida, deformações adicionais dependentes do tempo ocorrem. A isto se dá o nome de fluência. Mesmo em tensões muito pequenas a fluência tem lugar e pode continuar por anos. Para cargas suficientemente elevadas, a ruptura ocorrerá eventualmente. Em condições típicas de projeto e usos, a deformação adicional devida à fluência, após vários anos, é aproximadamente igual à deformação elástica inicial, instantânea. Para ilustração, uma função da fluência em relação à deformação inicial (fluência relativa) em alguns níveis de tensões, é mostrada na figura 2.27.

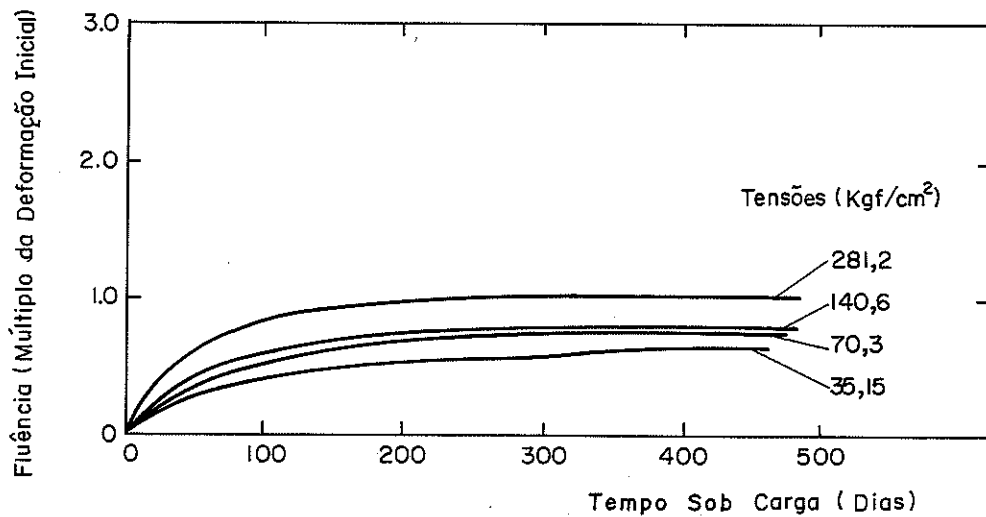


Figura 2.27: Fluência como função de quatro níveis de tensões. [Fonte: Wood Handbook, 1987, p.4-40].

A fluência é maior sob tensões elevadas que em níveis de tensões. A madeira verde pode ter deformações, por fluência, de quatro a seis vezes a deformação inicial se secar sob carga.

O descarregamento da peça resulta em uma recuperação imediata e completa da deformação elástica original e, após algum tempo, a recuperação de aproximadamente metade da deformação por fluência.

A fluência relativa em níveis baixos de tensões é semelhante para a flexão, tração ou compressão paralela às fibras, embora seja algo menor na tração do que na compressão paralela às fibras ou na flexão, em condições variáveis de umidade. A fluência relativa perpendicular às fibras é qualitativamente semelhante, mas de modo geral maior que a paralela às fibras.

Se, ao invés de se controlar cargas ou tensões, uma deformação constante for imposta e mantida em uma barra de madeira, as tensões iniciais diminuem para um valor de 60% a 70% de seu valor original em poucos meses. Esta redução de tensões com o passar do tempo é comumente chamada de relaxação. A relaxação é marcadamente afetada pelas flutuações na umidade e na temperatura, assim como a fluência. [44]".

2.6.2.3. Fadiga

"O termo "fadiga" em engenharia é definido como a avaria progressiva que ocorre em um material sujeito a carregamentos cíclicos. Este carregamento pode ser repetido (tensões de mesmo sinal, sempre de compressão ou sempre de tração) ou revertido (tensões de sinal alternado, ora de compressão, ora de tração). Quando o número de ciclos e o nível de tensões forem suficientemente elevados, tal carregamento cíclico pode resultar em ruptura por fadiga. [45]".

"Graf (1928, 1929, 1930) ensaiou corpos de prova secos ao ar e isentos de defeitos de abeto e carvalho nas dimensões 10cm x 10cm x 20cm, com carga oscilatória crescente até a ruptura. A resistência à compressão paralela foi reduzida em 84% e 81%, respectivamente, para as espécies citadas.

Roth (1935) encontrou resultados semelhantes mas afirmou que a manutenção constante da carga é mais efetiva que a carga oscilante correspondente. Para cargas de longa duração, a resistência à fadiga na compressão paralela às fibras é, no mínimo, 60% da resistência à compressão determinada em ensaios de curta duração (normalizados) [46]".

2.6.3. Variação de temperatura

"O efeito da temperatura na resistência, elasticidade e plasticidade da madeira tem sido examinado extensivamente. Para a madeira, assim como para todo material sólido (abaixo do ponto de fusão ou de decomposição térmica), a resistência e a rigidez diminuem com o aumento da temperatura devido à expansão térmica da rede cristalina da celulose e devido ao aumento da intensidade de oscilações térmicas das moléculas.

(...) Sulzberger (1953) apresenta um diagrama do módulo de elasticidade médio, entre seis espécies, em diversos teores de umidade, em função da temperatura, onde o módulo de elasticidade obtido a 20°C representa 100%. [47]"

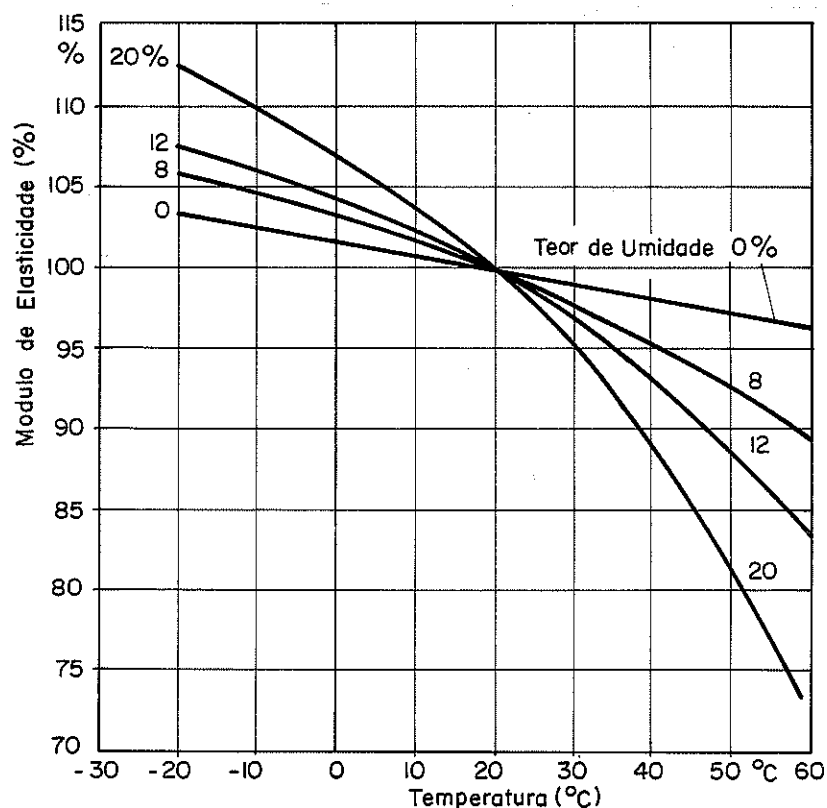


Figura 2.30: Diagrama de Sulzberger [Fonte: Kollmann e Côté Jr, 1968, p.313]

Pode-se dividir os efeitos da variação da resistência com a temperatura à qual está submetida a madeira em dois tipos: reversíveis e irreversíveis.

2.6.3.1. Efeitos reversíveis.

"As mudanças nas propriedades, que ocorrem quando a madeira é rapidamente aquecida ou resfriada são chamados "efeitos imediatos". A temperaturas abaixo de 100°C, os efeitos imediatos são essencialmente reversíveis, isto é, a propriedade retornará ao seu respectivo valor na temperatura original se a mudança de temperatura for rápida.

As figuras 2.31 e 2.32 ilustram as variações no módulo de elasticidade paralelo às fibras e na resistência à compressão paralela às fibras, com temperaturas de referência de 20°C.

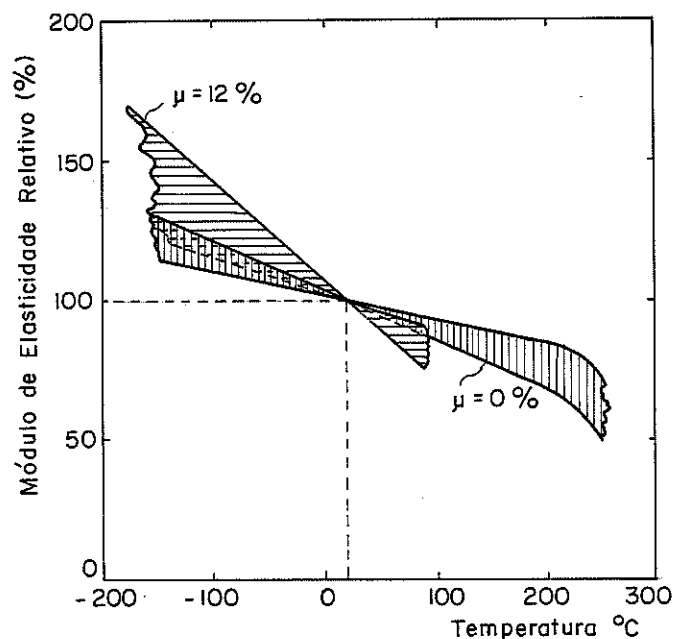


Figura 2.31: O efeito imediato da temperatura no módulo de elasticidade paralelo às fibras em dois teores de umidade, em valores relativos. O gráfico é uma síntese de diversos estudos. A variabilidade nas curvas de tendência é ilustrada pelas faixas hachuradas [Fonte: Wood Handbook, 1987, fig. 4.9].

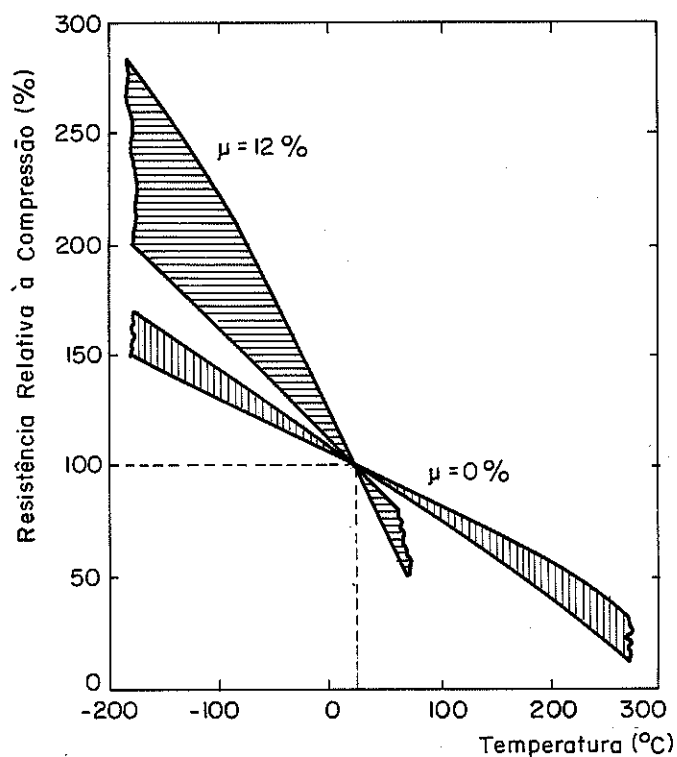


Figura 2.32: Efeito imediato da temperatura na resistência à compressão paralela às fibras, em dois teores de umidade, relativos ao valor a 20°C. O diagrama é uma composição de resultados de diversos estudos. A variabilidade envolvida nas linhas de tendência é mostrada pela região hachurada. [Fonte: Wood Handbook, 1987, fig.4.11].

O Quadro 2.10. apresenta a média dos valores relativos à variação de temperatura para as propriedades mecânicas anteriormente relacionadas.

PROPRIEDADES	TEOR DE UMIDADE (%)	VARIAÇÃO RELATIVA, %	
		T = -50°C	T = +50°C
MÓDULO DE ELASTICIDADE LONGITUDINAL	0	+11	-6
	12	+17	-7
	SATURADO	+50	—
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARALELA	0	+20	-10
	12 - 45	+50	-25

Quadro 2.10: Efeitos médios aproximados para madeira isenta de defeitos, em diversas condições de umidade [Fonte: Wood Handbook, 1987, p.4-38]. [48]

2.6.3.2. Efeitos irreversíveis

"Em adição aos efeitos reversíveis, há um efeito irreversível em temperaturas elevadas e é devido à degradação da consistência da madeira, que resulta em perda de peso e de resistência. Esta perda depende de fatores como conteúdo de umidade, aquecimento médio, temperatura, tempo de exposição e, em alguma escala, espécies e tamanho das peças envolvidas.

Por exemplo, a diminuição permanente no módulo de ruptura devido ao aquecimento em vapor e em água é mostrada como função da temperatura e do tempo de aquecimento na figura 2.33(a), com base em ensaios de Douglas fir e Sitka spruce. No mesmo estudo, o trabalho desenvolvido até a carga máxima foi mais afetado que o módulo de ruptura pelo aquecimento em água, figura 2.33(b).

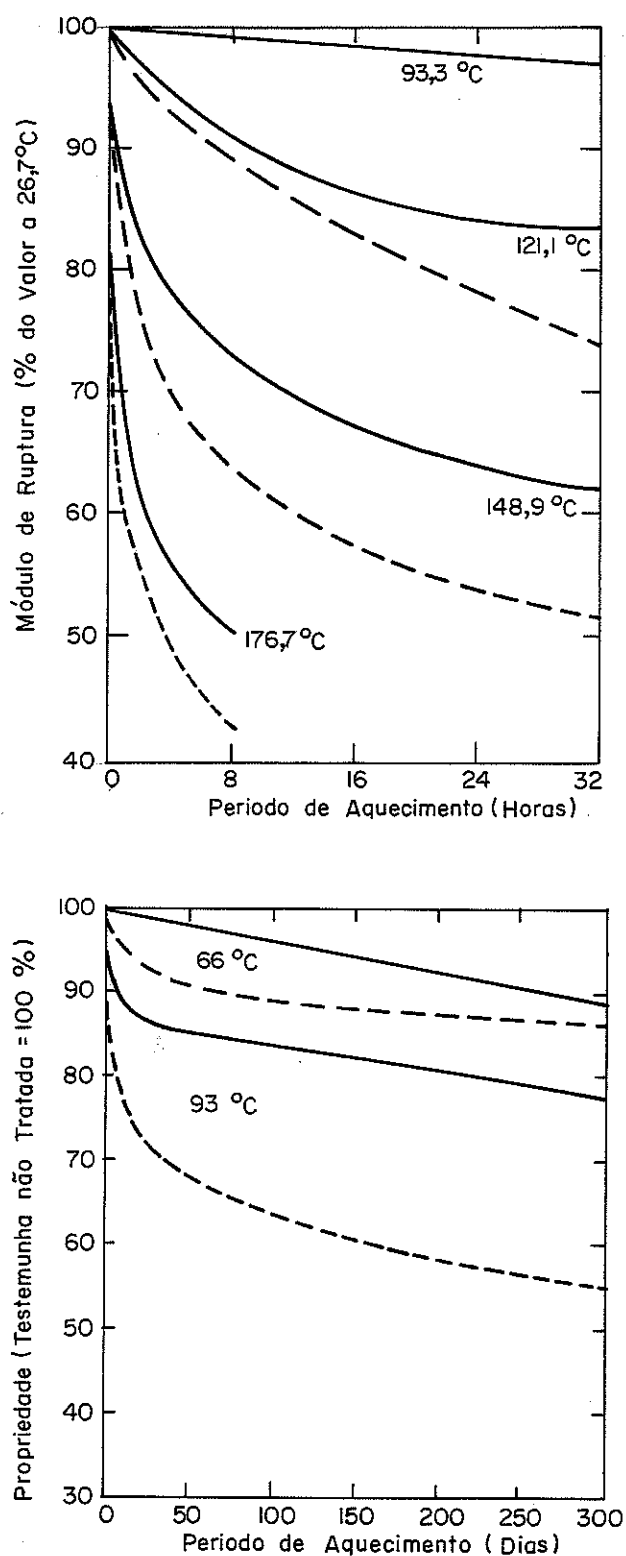


Figura 2.33: (a) Efeito permanente do aquecimento em água (linha cheia) e em vapor (linha tracejada) no módulo de ruptura; ensaios em temperatura ambiente.

(b) Efeito permanente do aquecimento em água para o trabalho desenvolvido até a carga máxima e no módulo de ruptura, ensaiados em temperatura ambiente. [Fonte: Wood Handbook, 1987, pp 4-37 - 4-39].

O efeito do aquecimento em estufa (madeira a 0% de umidade) para o módulo de elasticidade é mostrado na figura 2.34. derivado de ensaios em quatro espécies de madeiras "duras" (de dicotiledôneas) e duas espécies de madeiras "moles" (de coníferas).

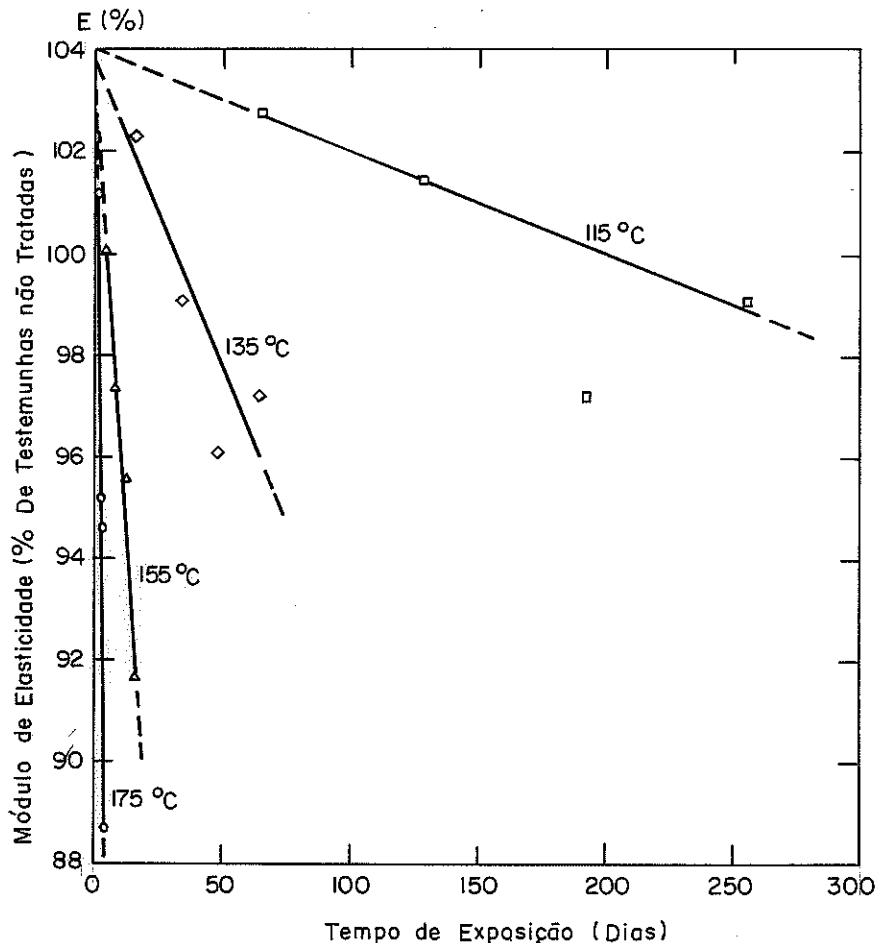


Figura 2.34: Efeito permanente do aquecimento em estufa em quatro temperaturas no módulo de elasticidade; todos os ensaios foram conduzidos em temperatura ambiente [Fonte; Wood Handbook, 1987, p.4-39].

Deve-se observar que as perdas permanentes nas propriedades acima referidas foram obtidas após resfriamento até atingir a temperatura ambiente e condicionamento dos corpos de prova a teores entre 7% e 12% de umidade. Se os corpos de prova fossem ensaiados ainda quentes, as reduções percentuais devidas aos efeitos permanentes seriam somadas aos efeitos imediatos (reversíveis).

A exposição repetida a temperaturas elevadas tem um efeito cumulativo nas propriedades da madeira. Por exemplo, a uma dada temperatura, a perda na propriedade considerada será aproximadamente a mesma após seis períodos de exposições por um mês cada um, como após um único período de exposição de seis meses.

Para períodos de exposição extensos e não-cíclicos, pode

ser assumido que a peça inteira alcança a temperatura de aquecimento médio e estará, além disso, sujeita a perdas permanentes de resistência ao longo de todo o volume da peça, independentemente do tamanho e da forma de aplicação das tensões. Entretanto, a madeira freqüentemente não atingirá as temperaturas diárias extremas do ar em seu redor, nas construções usuais; desta forma, a quantificação dos efeitos de longa duração deve se basear na experiência acumulada de convivência das partes estruturais mais críticas com variação das temperaturas. [49]"

2.6.3.3. Outras considerações

Para se tratar do comportamento do material quando resfriado, isto é, congelando-se a água circulante na madeira saturada e a água impregnada nas células (existentes para teores de umidade diferentes de zero), é necessário estabelecer as variações causadas pela água (estado líquido) e pelo gelo (água cristalizada, estado sólido) na resistência do material assim composto.

Em uma coletânea de estudos a este respeito, Kollmann e Côté Jr. (1968) assim consideram: "(...) a resistência à compressão σ da madeira seca em estufa, ensaiada em diversas temperaturas e abaixo do ponto de decomposição das fibras, diminui à medida que a temperatura aumenta, obedecendo uma relação linear:

$$\sigma_1 = \sigma_2 - n(\theta_2 - \theta_1) \quad (2.4)$$

onde: σ_2 e σ_1 representam as resistências às temperaturas θ_2 e θ_1 respectivamente e n é o coeficiente angular da reta obtida, figura 2.35.

Sulzberger (1948) também calculou coeficiente n dependendo da densidade aparente da madeira em diferentes teores de umidade e em contrar os valores assinalados no Quadro 2.11.:

TEOR DE UMIDADE (%)	n (KP/CM ² °C)	n (KGF/CM ² °C)
0	5,44 ρ_0	2,479 ρ_0
8	7,73 ρ_8	3,509 ρ_8
12	7,90 ρ_{12}	3,587 ρ_{12}
20	6,37 ρ_{20}	2,892 ρ_{20}
24	4,53 ρ_{24}	2,057 ρ_{24}
saturação	3,15 ρ_u máx	1,430 ρ_u máx

Quadro 2.11: Coeficiente de temperatura, n , para a resistência à compressão da madeira.

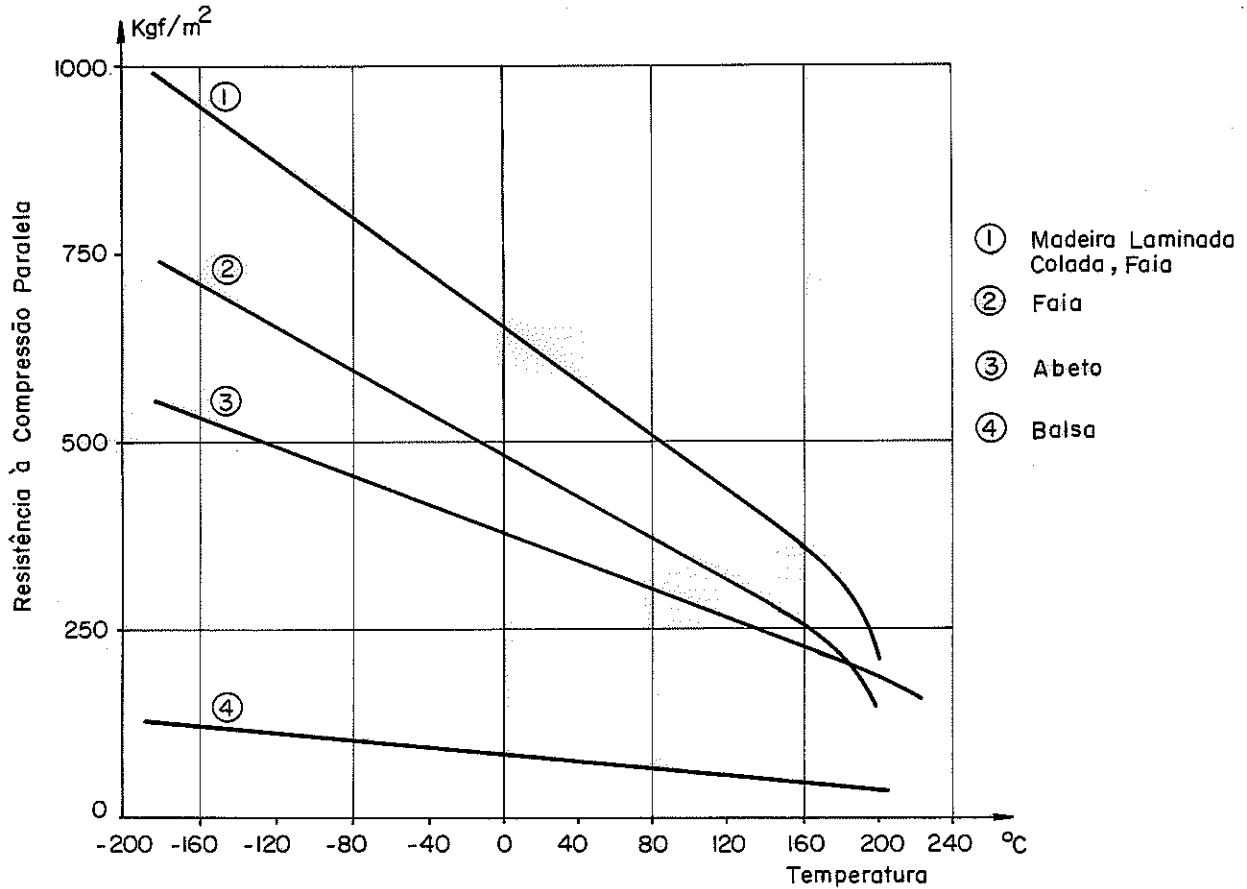


Figura 2.35: Efeito da temperatura na resistência à compressão paralela de madeira sólida (curvas 2, 3, 4,) e laminada (curva 1), por Kollmann (1940) [Fonte: Kollmann e Côté Jr., 1968]

De modo geral, fazendo-se $n = c\rho_u$, na região $0 \leq u \leq 24$ (%), o fator C pode ser bem representado por uma função quadrática. Nos dados fornecidos por Sulzberger pode-se encontrar que C tem valor máximo para $u = 11\%$ aproximadamente e, então, neste teor de umidade, a influência da temperatura é máxima. Mais importante é o fato de que os valores experimentais variam tão pouco que realmente, para qualquer madeira, o coeficiente de temperatura n para a mudança na resistência à compressão pode ser calculado apenas a partir de sua densidade.

As curvas na figura 2.36. mostram as flutuações isotérmicas da resistência à compressão quando influenciada pela umidade na região higroscópica e até o ponto de saturação das fibras.

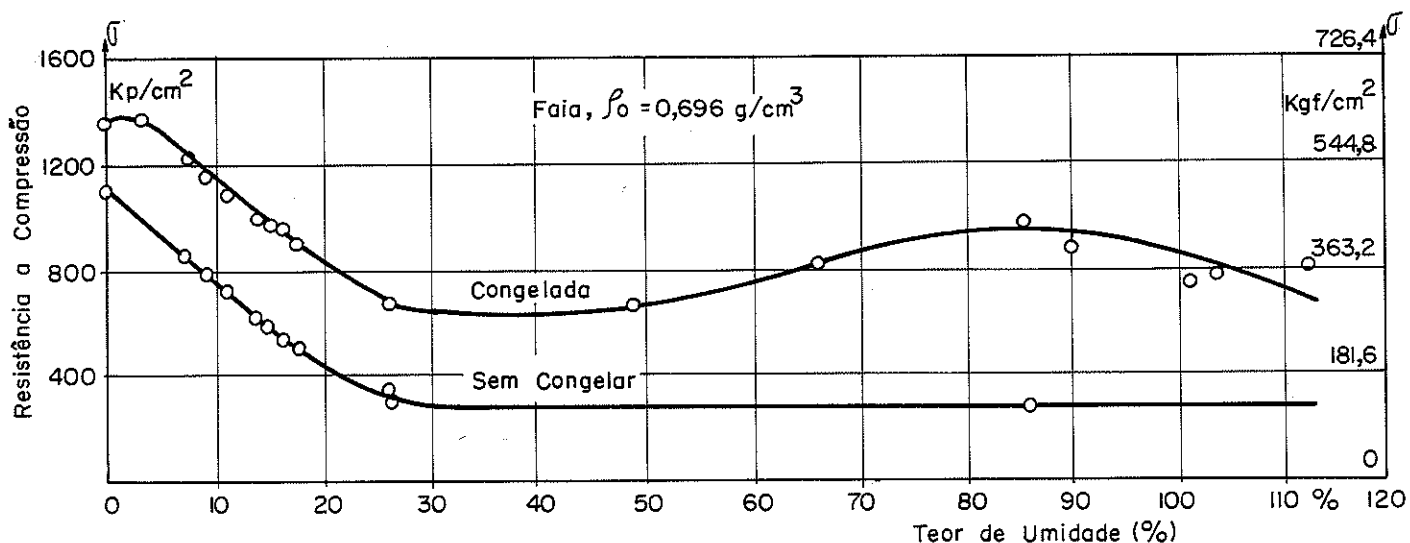


Figura 2.36: Dependência da resistência à compressão paralela da madeira da faia com o teor de umidade e a temperatura [Fonte: Kollmann e Côté Jr, 1968, p.351].

É notável nestas curvas que a resistência à compressão da madeira congelada a -20°C , na região higroscópica, é consideravelmente maior que a resistência obtida com a madeira em temperatura acima de 20°C e, ainda, que a diferença é especialmente ampla com a madeira saturada de água. Para a madeira contendo umidade, o aumento de resistência com a diminuição da temperatura não segue uma reta. O fenômeno é complicado devido os efeitos diferentes provocados pelo congelamento ou derretimento das estruturas cristalinas de gelo nos interstícios das fibras. O gelo, isoladamente, enrijece a parede celular, mas pode se derreter sob influência das deformações de compressão.

A figura 2.36. permite a comparação de duas séries de ensaios de compressão em diversos teores de umidade na madeira de faia, compreendendo o intervalo de 0% a 15%. A curva inferior é da madeira não congelada ensaiada em temperatura ambiente (20°C) e a superior para a correspondente série de amostras congeladas (-42°C). A curva da madeira não congelada descreve a bem conhecida queda da resistência à compressão, a uma taxa uniforme, abaixo do ponto de saturação das fibras; acima deste ponto, a resistência à compressão é independente da quantidade de água livre existente na madeira. A curva superior mostra uma resistência ascendente até o nível de 5% de umidade para a madeira congelada. É assumido que as moléculas de água, quimicamente vinculadas às fibrilas, formam um filme contínuo de espessura

mínima e resistência máxima, quando a madeira congela. Neste ponto, toda a superfície interna está revestida por um filme contínuo de gelo que enrijece a estrutura da madeira. Por esta razão, a máxima resistência é atingida a aproximadamente 5% de umidade. Além deste valor a água adicional nas paredes celulares está no estado de condensação por capilaridade entre as paredes dos elementos estruturais e, entrando nos interstícios entre as micelas e as fibrilas, empurra-os, causando inchamento. As acumulações adicionais de gelo não elevarão nem a rigidez nem a resistência, pois o gelo isoladamente tem uma coesão inerente muito pequena. Além do nível de 5% e até o ponto de saturação das fibras, a madeira congelada se comporta de maneira semelhante à madeira não congelada, sendo as curvas paralelas entre si no intervalo de 5% a 25% de umidade, computando-se progressivo inchamento. A diferença entre as duas curvas é causada pelo aumento na resistência com o congelamento da madeira [50]."

2.6.4. Efeito da pressão de confinamento

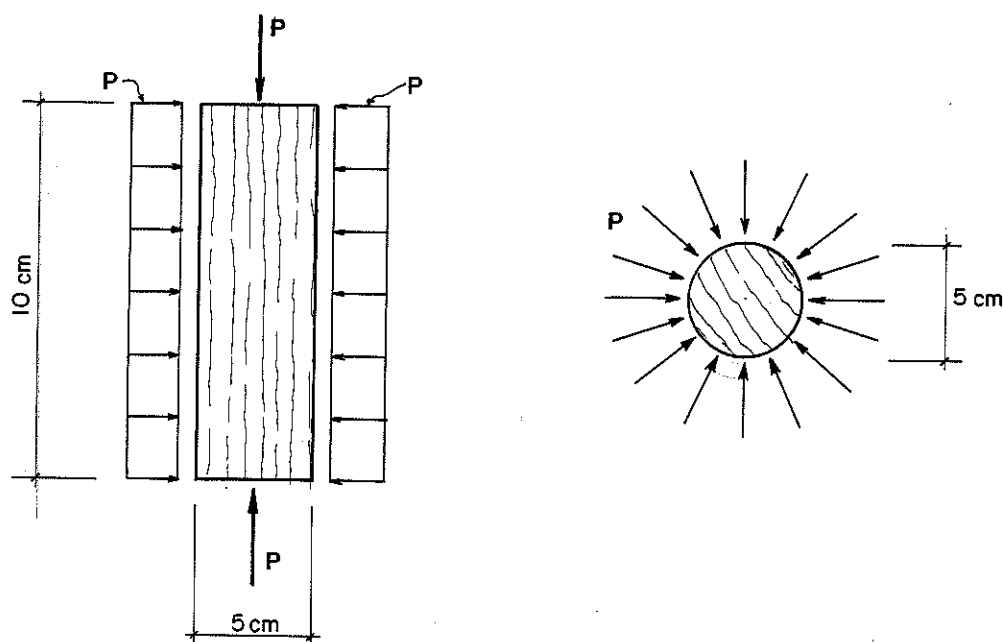


Figura 2.37: Ensaio conduzido por Wilkinson (1964)

Wilkinson (1964) realizou ensaios de compressão paralela às fibras de corpos de prova cilíndricos, de 5 cm de diâmetros e 10 cm de comprimento, de Douglas-fir e carvalho (red oak). Um grupo foi ensaiado à pressão atmosférica como controle; outro grupo a uma pressão de confinamento de 50 libras por polegada quadrada (3,52 kgf/cm²) e um terceiro grupo confinado com 100 libras por polegada quadrada

(7,04 kgf/cm²). Todos os corpos de prova estavam com teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras.

As pressões escolhidas se devem ao fato de que as pressões médias em solos coesivos encontrarem-se no intervalo de 15 a 70 libras por polegada quadrada (de 1 a 5 kgf/cm² aproximadamente) e onde estacas de madeira para fundações residenciais são bastantes usadas nos Estados Unidos.

Os quadros 2.12. e 2.13. reproduzem médias de resultados obtidos para a experimentação de Wilkinson.

PROPRIEDADE (kgf/cm ²)	p = 0	p = 50psi (p=3,52 kgf/cm ²)	p = 100psi (p=7,04 kgf/cm ²)
Resistência à compressão paralela	284	284	286
Módulo de elasticidade	113296	114000	114703
Tensão no limite de proporcionalidade	211	206	209

Quadro 2.12: Propriedades médias de resistência e elasticidade na compressão paralela às fibras em várias pressões de confinamento, para o carvalho (red oak). [Fonte: Wilkinson, 1964].

PROPRIEDADE (kgf/cm ²)	p = 0	p = 50psi (p=3,52 kgf/cm ²)	p = 100psi (p=7,04 kgf/cm ²)
Resistência à compressão paralela	235	238	249
Módulo de elasticidade	130185	133703	136518
Tensão no limite de proporcionalidade	175	170	167

Quadro 2.13: Comparação entre as propriedades de Douglas-fir na compressão paralela às fibras em várias pressões de confinamento. [Fonte: Wilkinson, 1964]

Concluindo, "este estudo mostra que a pressão de confinamento lateral (nos níveis aplicados) não tem influência sobre a resistência máxima à compressão paralela, sobre a tensão no limite de proporcionalidade, nem no módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras, tanto para o madeira de carvalho (red oak) como para a de Douglas-fir." [51].

3. COMPARAÇÃO ENTRE ALGUNS DISPOSITIVOS PARA O ENSAIO DE COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS

3.1. CONSIDERAÇÕES

A instrumentação em ensaio de corpos de prova de madeira submetidos à compressão paralela às fibras é dependente, entre diversos fatores, das vinculações entre o corpo de prova e a máquina de ensaio.

O estudo particular destes sistemas de vinculação depende da escolha de um dispositivo de referência, em relação ao qual se remete a comparação de desempenho entre sistemas diversos, alterando-se, um por vez, os componentes do conjunto, mantendo-se razão direta de semelhança entre as demais partes envolvidas.

Para este estudo, obtiveram-se pares de corpos de prova de vigas escolhidas, de fibras retas e anéis de crescimento dispostos sem desvios na seção transversal, amostrada na base e no topo de um trecho de 3,0 m de comprimento. Os corpos de prova utilizados (doze por viga) são de dimensões 5,0 cm x 5,0 cm x 20,0 cm, e extraídos das vigas conforme a figura 3.1.

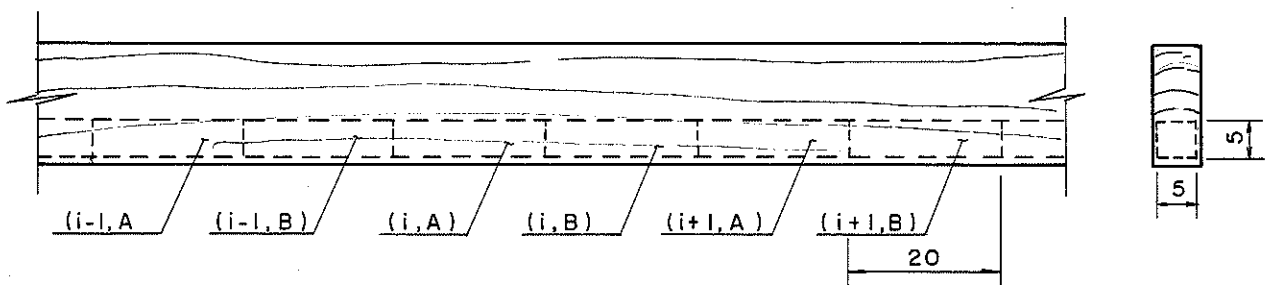


Fig. 3.1. Obtenção de pares de corpos de prova sequenciais a partir de vigas aplainadas e sua numeração (dimensões em cm).

Neste estudo de dispositivos de ensaio foram utilizadas seis vigas, duas de jatobá (*Hymenaea stilbocarpa*), duas de Maçaranduba (*Manilkara* sp) e duas de Cambará (*Erismia uncinatum*), perfazendo um total de seis lotes de doze corpos de prova cada, para as determinações de módulo de elasticidade e limites de resistência (72 corpos de prova, 144 avaliações).

A atividade de pesquisa trouxe à experimentação um conjunto constituído de placas e roletes de aço justapostos, testado preliminarmente por sugestão do Prof. Dr. João Cesar Hellmeister, mostrado na figura 3.2.

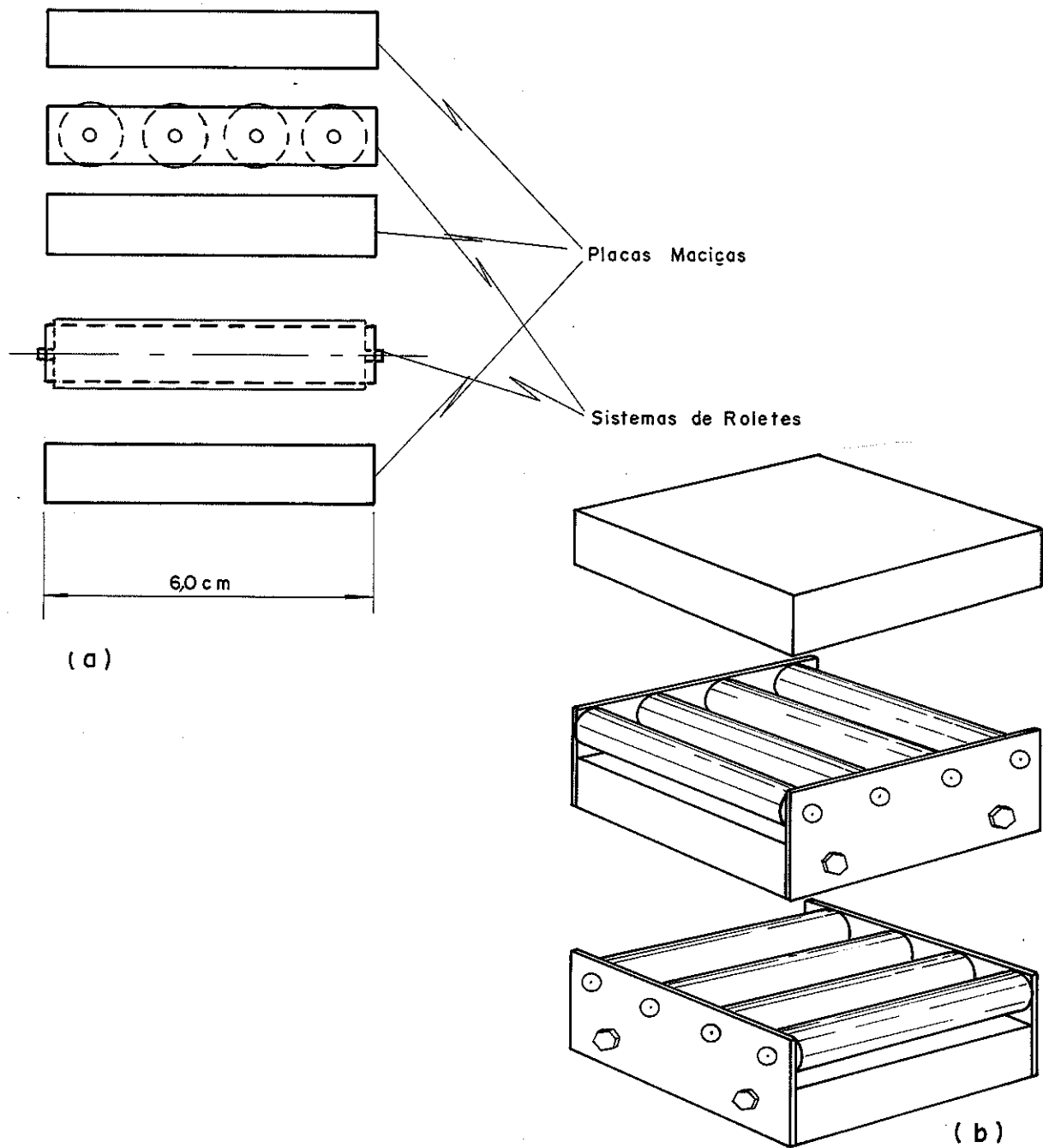


Fig. 3.2.(a): Esquematização do sistema;

(b): Vista explodida das partes componentes do sistema.

O dispositivo tem dois conjuntos de roletes, ensanduichados por placas maciças, estando um conjunto disposto perpendicularmente ao outro, o que propicia livre deslocamento do sistema de vinculação no plano perpendicular à direção das fibras.

Todos os dispositivos estão apresentados na figura 3.3.

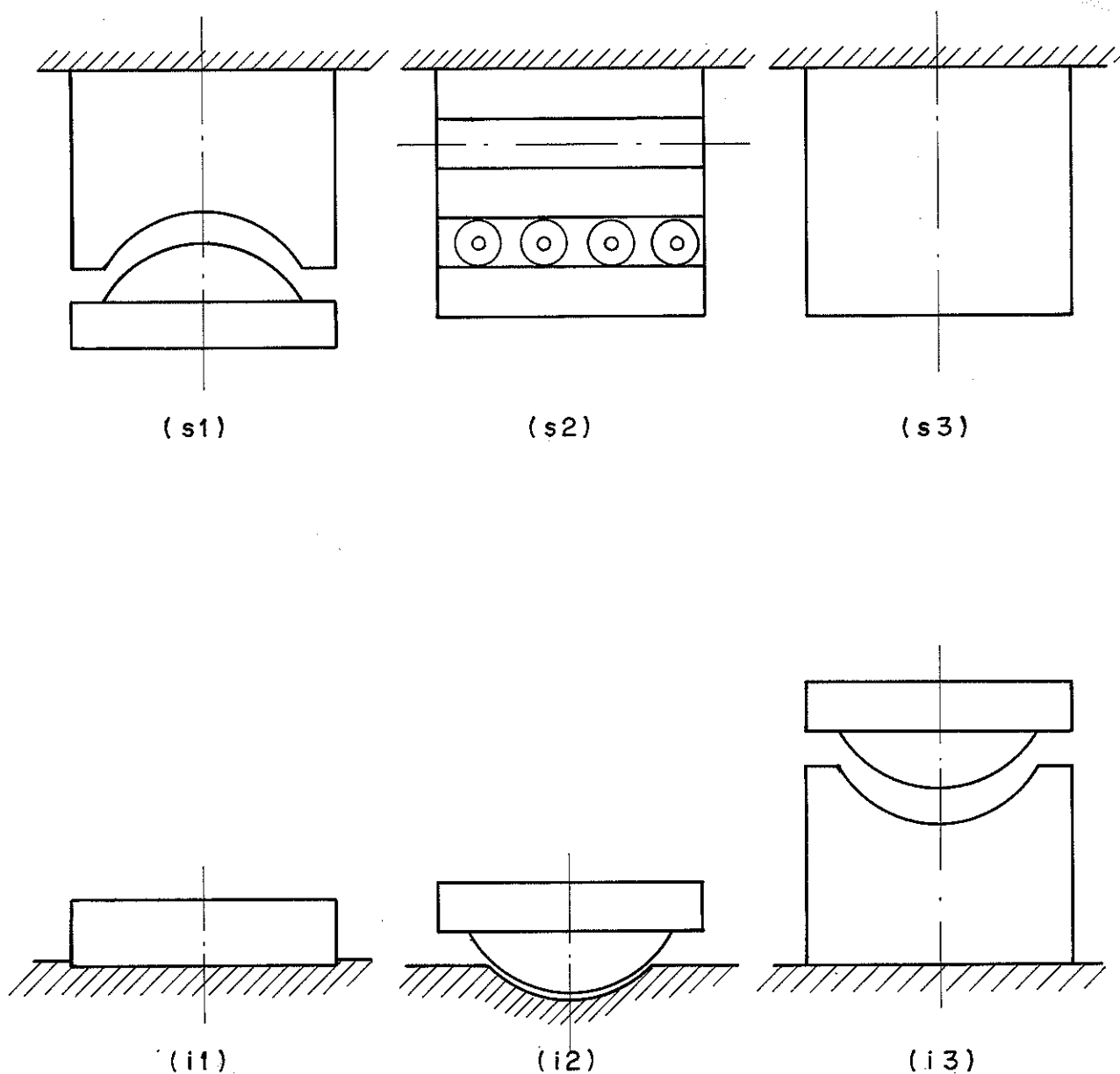


Fig. 3.3. Composição de dispositivos para o ensaio de corpos de prova, s-parte superior, i-parte inferior do corpo de prova

O dispositivo s1 é composto de uma parte metálica cilíndrica, com um berço côncavo, e uma peça metálica complementar, com uma saliência convexa de curvatura mais alongada que aquela do berço, tal que, lubrificadas ambas as partes, se tenha uma junta universal.

O dispositivo s2 foi acima descrito. O sistema s3 é um cilindro metálico com superfície perfeitamente plana (usinada, como também o é a parte inferior de s1).

O dispositivo i1 é uma placa metálica com encaixe perfeito no prato da máquina, de modo a não permitir deslocamento do vínculo transversalmente em relação ao deslocamento do prato móvel da máquina de ensaio, e de superfície também usinada.

O dispositivo i2 é a peça convexa da junta universal acima descrita, encaixada em um berço lubrificado existente no prato da máquina de ensaio, compondo uma vinculação semelhante à fornecida por uma esfera ensanduichada por duas placas, afastadas entre si de pelo menos o raio da esfera, com um berço côncavo cada uma, onde se alojaria a esfera (figura 3.4.)

O dispositivo i3 é o dispositivo s1, invertido.

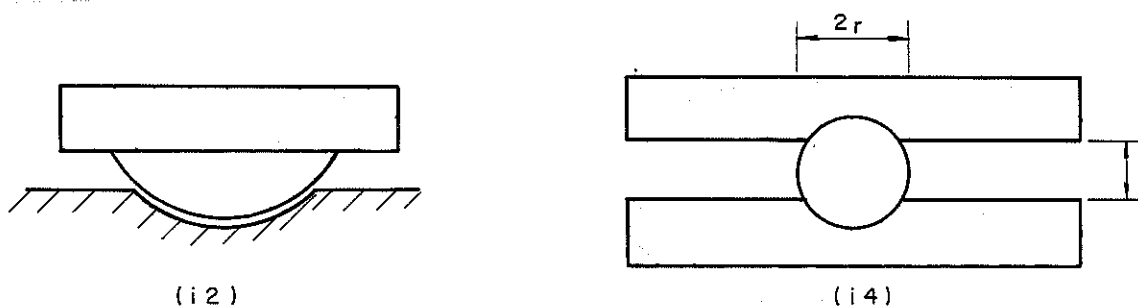


Fig. 3.4: Substituição de sistemas de vinculação.

3.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS

Os ensaios foram conduzidos à inteira semelhança com o prescrito no Método de Ensaio para Caracterização de Madeiras, proposto pelo Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM), [52], e adotado pelo Instituto Brasileiro da Madeiras e das Estruturas de Madeira. Cada lote de corpos de prova foi condicionado ao teor de umidade de saturação (e mantido neste teor), numerado na sequência de corte ainda na fase de preparação e, posteriormente, submetido aos procedimentos usuais de ensaio. Obtiveram-se, assim, seis análises confrontando, dois a dois, os dispositivos em questão (tabela 3.1).

Análise	Disp. Ensaio A	Disp. Ensaio B	Lote, Espécie
I	(s1, i1)	(s2, i1)	L1, Maçaranduba
II	(s1, i2)	(s3, i2)	L2, Jatobá
III	(s1, i2)	(s1, i1)	L2, Maçaranduba
IV	(s1, i2)	(s2, i2)	L1, Jatobá
V	(s2, i2)	(s2, i1)	L1, Cambará
VI	(s3, i2)	(s1, i1)	L2, Cambará

Tabela 3.1. Combinação dos dispositivos utilizados, com lotes e espécies da experimentação

A seguir, estão listados os resultados destes ensaios.

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c ($\frac{daN}{cm^2}$)	E (daN/cm ²)
L1M1A	5,086	5,154	20,15	26,21	15500	603,00	203850
L1M1B	5,155	5,165	20,05	26,63	15225	571,82	177790
L1M2A	5,115	5,150	20,00	26,34	15400	584,61	193685
L1M2B	5,135	5,150	20,05	26,45	15525	587,06	121980
L1M3A	5,120	5,135	20,50	26,29	15675	596,21	166175
L1M3B	5,120	5,155	20,50	26,39	16400	621,36	187100
L1M4A	5,125	5,140	20,05	26,34	17150	651,04	209110
L1M4B	5,140	5,150	20,40	26,47	16900	638,43	110565
L1M5A	5,120	5,130	20,25	26,29	16900	642,80	201820
L1M5B	5,120	5,130	20,25	26,27	16200	616,78	155930
L1M6A	5,120	5,140	20,30	26,32	15400	585,18	160840
L1M6B	5,120	5,145	20,20	26,34	15200	577,02	102265

Tabela 3.2. Resultados de ensaio, análise I.

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c ($\frac{daN}{cm^2}$)	E (daN/cm ²)
L2J1A	5,1225	5,140	20,05	26,33	15825	601,03	185270
L2J1B	5,135	5,140	20,05	26,39	15750	596,73	201280
L2J2A	5,1425	5,1525	20,10	26,50	15675	591,58	158575
L2J2B	5,1175	5,155	20,05	26,38	15800	598,92	190090
L2J3A	5,125	5,1275	20,05	26,28	17050	648,82	182295
L2J3B	5,1225	5,145	20,10	26,36	17225	653,57	177305
L2J4A	5,1425	5,160	20,05	26,54	16700	629,35	170010
L2J4B	5,145	5,170	19,975	26,60	17100	642,87	187305
L2J5A	5,1475	5,170	20,05	26,61	17000	638,80	187255
L2J5B	5,0975	5,1575	20,00	26,29	16125	613,34	201610
L2J6A	5,1375	5,1625	20,05	26,52	16525	623,06	178480
L2J6B	5,1425	5,1725	19,95	26,60	15850	595,87	178455

Tabela 3.3. Resultados de ensaio, análise II.

onde: b_0 , b_1 - dimensões da seção transversal

l - comprimento

A - área da seção transversal

$P_{m\acute{a}x}$ - esforço máximo obtido no ensaio

f_c - limite de resistência, por corpo de prova

E - módulo de elasticidade observado no ensaio

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\bar{a}x}$ (daN)	f_c ($\frac{daN}{cm^2}$)	E (daN/cm ²)
L2M1A	5,1475	5,165	20,10	26,59	16250	611,50	237195
L2M1B	5,1425	5,1675	20,00	26,57	15150	569,83	225140
L2M2A	5,1525	5,170	20,10	26,64	15550	588,29	203705
L2M2B	5,135	5,1475	20,00	26,43	14800	555,59	188490
L2M3A	5,1125	5,150	20,00	26,33	14425	548,40	155550
L2M3B	5,110	5,1475	20,05	26,30	14100	535,52	171605
L2M4A	5,1425	5,1475	20,05	26,47	17075	645,05	196610
L2M4B	5,1375	5,1425	20,00	26,42	16050	607,50	196990
L2M5A	5,145	5,1625	20,05	26,56	17025	640,98	189600
L2M5B	5,140	5,145	20,00	26,45	16625	628,66	201675
L2M6A	5,1275	5,1425	20,05	26,37	17600	667,45	195200
L2M6B	5,1175	5,1325	20,00	26,27	16075	612,02	199150

Tabela 3.4. Resultados de ensaio, análise III.

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\bar{a}x}$ (daN)	f_c ($\frac{daN}{cm^2}$)	E (daN/cm ²)
L1J1A	5,1475	5,160	19,975	26,56	15400	579,80	174175
L1J1B	5,1575	5,160	20,05	26,61	15775	592,76	203115
L1J2A	5,145	5,175	20,00	26,63	15425	579,33	170125
L1J2B	5,160	5,1625	20,00	26,64	16200	608,14	178195
L1J3A	5,1425	5,1775	19,95	26,63	15800	593,42	142175
L1J3B	5,150	5,165	19,90	26,60	13500	507,52	170025
L1J4A	5,150	5,155	20,10	26,55	17350	653,53	179940
L1J4B	5,140	5,1475	20,05	26,46	16600	627,41	226425
L1J5A	5,1575	5,1625	19,95	26,63	17300	649,75	171235
L1J5B	5,140	5,150	19,95	26,47	16450	621,43	181890
L1J6A	5,1425	5,150	20,05	26,48	17500	660,77	173605
L1J6B	5,1325	5,1375	20,05	26,37	17450	661,78	187610

Tabela 3.5. Resultados de ensaio, análise IV.

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c ($\frac{daN}{cm^2}$)	E (daN/cm ²)
L1C01	4,9825	5,008	20,15	24,95	8550	342,653	121110
L1C02	5,040	5,0425	20,10	25,41	8000	314,785	125245
L1C03	5,0425	5,0425	20,10	25,43	8200	322,494	125185
L1C04	5,030	5,0325	20,10	25,31	9050	357,517	135795
L1C05	5,040	5,0425	20,10	25,41	8300	326,589	135685
L1C06	5,0375	5,0425	20,15	25,40	8850	348,403	135230
L1C07	5,040	5,040	20,10	25,40	8100	318,878	112770
L1C08	5,0375	5,0425	20,10	25,40	7750	305,099	114440
L1C09	5,030	5,0400	20,15	25,35	8550	337,272	138810
L1C10	5,040	5,060	20,15	25,50	8350	327,420	135215
L1C11	5,030	5,0375	20,10	25,34	8250	325,590	150735
L1C12	5,035	5,0375	20,15	25,36	8800	346,951	145535

Tabela 3.6. Resultados de ensaio, análise V.

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c ($\frac{daN}{cm^2}$)	E (daN/cm ²)
L2C01	4,975	5,025	20,20	25,00	8250	330,00	116225
L2C02	5,0125	5,0375	20,15	25,25	8150	322,766	124085
L2C03	5,010	5,0125	20,15	25,11	7800	310,601	118515
L2C04	5,0025	5,010	20,15	25,06	8150	325,187	118400
L2C05	4,9975	5,015	20,15	25,06	8280	330,375	121245
L2C06	5,0025	5,0175	20,15	25,10	8250	328,685	122585
L2C07	4,990	5,030	20,20	25,10	8000	318,729	120425
L2C08	5,0025	5,020	20,15	25,14	8000	318,248	120670
L2C09	5,005	5,020	20,15	25,13	8750	348,257	115825
L2C10	5,0175	5,0275	20,20	25,23	8980	355,989	109815
L2C11	5,0225	5,0275	20,15	25,25	8300	328,705	140190
L2C12	5,0025	5,0175	20,20	25,10	8100	322,709	129565

Tabela 3.7. Resultados de ensaio, análise VI.

3.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Usa-se análise de variância, através do teste "F" da distribuição de Fischer-Snedecor, e o teste "t" da distribuição de Student, para cada uma das seis combinações e para cada uma das propriedades em tela, módulo de elasticidade (E) e limite de resistência (f_c), em cada ensaio (tipo A ou tipo B).

Desta forma, as tabelas apresentam a seguir os valores:

$D_i = (E_A - E_B)_i$ diferença, em cada par i
$\bar{d} = \frac{\sum D_i}{n}$ média das diferenças, n=6 pares
$d_i = \bar{d} - D_i$ variação termo a termo
$S_d^2 = \frac{\sum d_i^2}{n-1}$ variância
$S_{\bar{d}} = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n-1}}$ desvio padrão
$S_{\bar{d}} = \frac{S_d}{\sqrt{n-1}}$ erro padrão

Pela distribuição de t de Student, ao nível de significância de 95%, estima-se um intervalo para a ocorrência da hipótese "equivalência entre módulos de elasticidade avaliados por A ou B", no qual a média das diferenças tenha possibilidade de assumir valor zero; o intervalo é $[\bar{d} - s_{\bar{d}} \cdot t_{05}; \bar{d} + s_{\bar{d}} \cdot t_{05}]$, onde t_{05} (5 graus de liberdade) = 2,571.

Para o teste "F", é necessário se obter as médias dos valores de ensaio e a variância dos grupos, estabelecendo-se:

\bar{E}_A, \bar{E}_B valor médio dos módulos de elasticidade, ensaio A (B)
$\Delta_i = (\bar{E} - E_i)_A$ Diferença em relação à média, termo a termo, ensaio A(B)
$S^2 = \frac{\sum (\Delta_i)^2}{n-1}$ variância do grupo $n_A = 6 = n_B$

$$F = \frac{\sum (\Delta_i)_B^2}{\sum (\Delta_i)_A^2} \geq 1,0$$

..... valor calculado da razão
entre as variâncias (a
maior dividida pela menor).

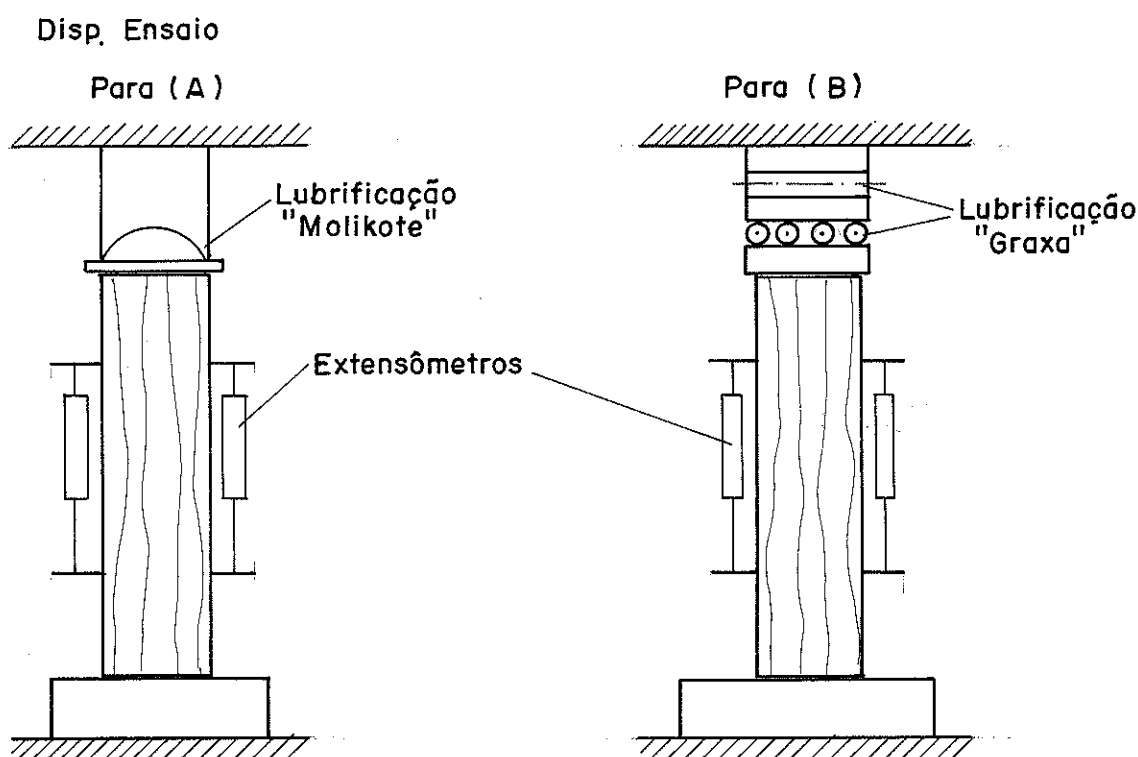
ou

$$F = \frac{\sum (\Delta_i)_A^2}{\sum (\Delta_i)_B^2} \geq 1,0$$

O valor de rejeição, F_{crit} , é procurado em tabelas para 5 graus de liberdade para o grupo A e 5 graus de liberdade para o grupo B, ao nível de 5% de probabilidade de rejeição, e se encontra $F_{crit} = 5,05$. Portanto, se o valor calculado de F for superior a F_{crit} , a variância encontrada descarta a hipótese de equivalência entre os ensaios "A" e "B" deste lote.

Para o caso dos limites de resistência, o procedimento é o mesmo, a notação adotada é a mesma.

A análise é apresentada sequencialmente, figuras 3.5 a 3.10 e tabelas 3.8 a 3.31, por lote de corpos de prova ensaiados.



L 1 - Maçaranduba

Fig. 3.5. Primeira comparação de lotes

CP nº	E_A (daN/cm ²)	E_B (daN/cm ²)	$D_i = E_A - E_B$	$d_i = \bar{d} - D_i$	d_i^2
L1M1	203850	177790	+ 26060	20581,67	423605002,8
L1M2	193685	121980	+ 71705	-25063,33	628170677,8
L1M3	166175	187100	- 20925	67566,67	4565254444,0
L1M4	209110	110565	+ 98545	-51903,33	2693956011,0
L1M5	201820	155930	+ 45890	751,67	565002,78
L1M6	160840	102265	+ 58575	-11933,33	142404444,4
$\Sigma =$	-	-	279850	0,00	8453955583
MÉDIA	189246,67	142605,00	46641,67	-	-

Tabela 3.8: Valores de ensaio, Módulos de elasticidade; parâmetros para o teste "t".

$$\bar{d} = 46641,67$$

$$S_d^2 = 1690791117$$

$$S_d = 41.119,23$$

$$S_{\bar{d}} = 18389,08$$

$$\text{intervalo: } [-636,66; + 93919,99]$$

CP nº	$\Delta_{iA} = \bar{E}_A - E_{iA}$	$(\Delta_{iA})^2$	$\Delta_{iB} = \bar{E}_B - E_{iB}$	$(\Delta_{iB})^2$
L1M1	- 14603,33	213257247,1	- 35185,00	1237984225
L1M2	- 4438,33	19698773,2	+ 20625,00	425390625
L1M3	+ 23071,67	532301956,6	- 44495,00	1979805025
L1M4	- 19863,33	394551878,7	+ 32040,00	1026561600
L1M5	- 12573,33	158088627,3	- 13325,00	177555625
L1M6	+ 28406,67	806938900,5	+ 40340,00	1627315600
$\Sigma =$	0,00	2124837383	0,00	6474612700

Tabela 3.9: Valores calculados, dados para a análise de variância teste "F"

$$F_1 = \frac{\frac{6474612700}{6 - 1}}{\frac{2124837383}{6 - 1}} = 3,05$$

$$F_{\text{crit}} = 5,05$$

CP nº	$f_{C,A}$ (daN/cm ²)	$f_{C,B}$ (daN/cm ²)	$D_i = f_{C,A} - f_{C,B}$	$d_i = \bar{d} - D_i$	d_i^2
L1M1	591,304	571,819	+ 19,485	- 13,040	170,046
L1M2	584,612	587,062	- 2,450	+ 8,895	79,118
L1M3	596,207	621,363	- 25,156	+ 31,601	998,613
L1M4	651,039	638,435	+ 12,604	- 6,159	37,935
L1M5	642,801	616,776	+ 26,025	- 19,580	383,383
L1M6	585,178	577,017	+ 8,161	- 1,716	2,945
Σ	-	-	+ 38,669	0,000	1672,040
MÉDIA	608,524	602,079	+ 6,445	-	-

Tabela 3.10: Valores de ensaio, limites de resistência. Parâmetros para o teste "t"

$$\bar{d} = 6,445$$

$$S_d^2 = 334,408$$

$$S_d = 18,287$$

$$S_{\bar{d}} = 8,178$$

$$\text{intervalo } [-14,581; +27,471]$$

CP nº	$\Delta_{iA} = f_{cm,A} - f_{ci,A}$	$(\Delta_{iA})^2$	$\Delta_{iB} = f_{cm,B} - f_{ci,B}$	$(\Delta_{iB})^2$
L1M1	+ 17,220	296,528	+ 30,260	915,668
L1M2	+ 23,912	571,784	+ 15,017	225,510
L1M3	+ 12,317	151,708	- 19,284	371,873
L1M4	- 42,516	1807,610	- 36,356	1321,759
L1M5	- 34,278	1174,981	- 14,697	216,002
L1M6	+ 23,346	545,036	+ 25,062	655,462
$\Sigma =$	0,00	4547,494	0,00	3678,915

Tabela 3.11: Valores calculados, dados para análise de variância - teste "F"

$$F = \frac{4547,494}{3678,915} = 1,236$$

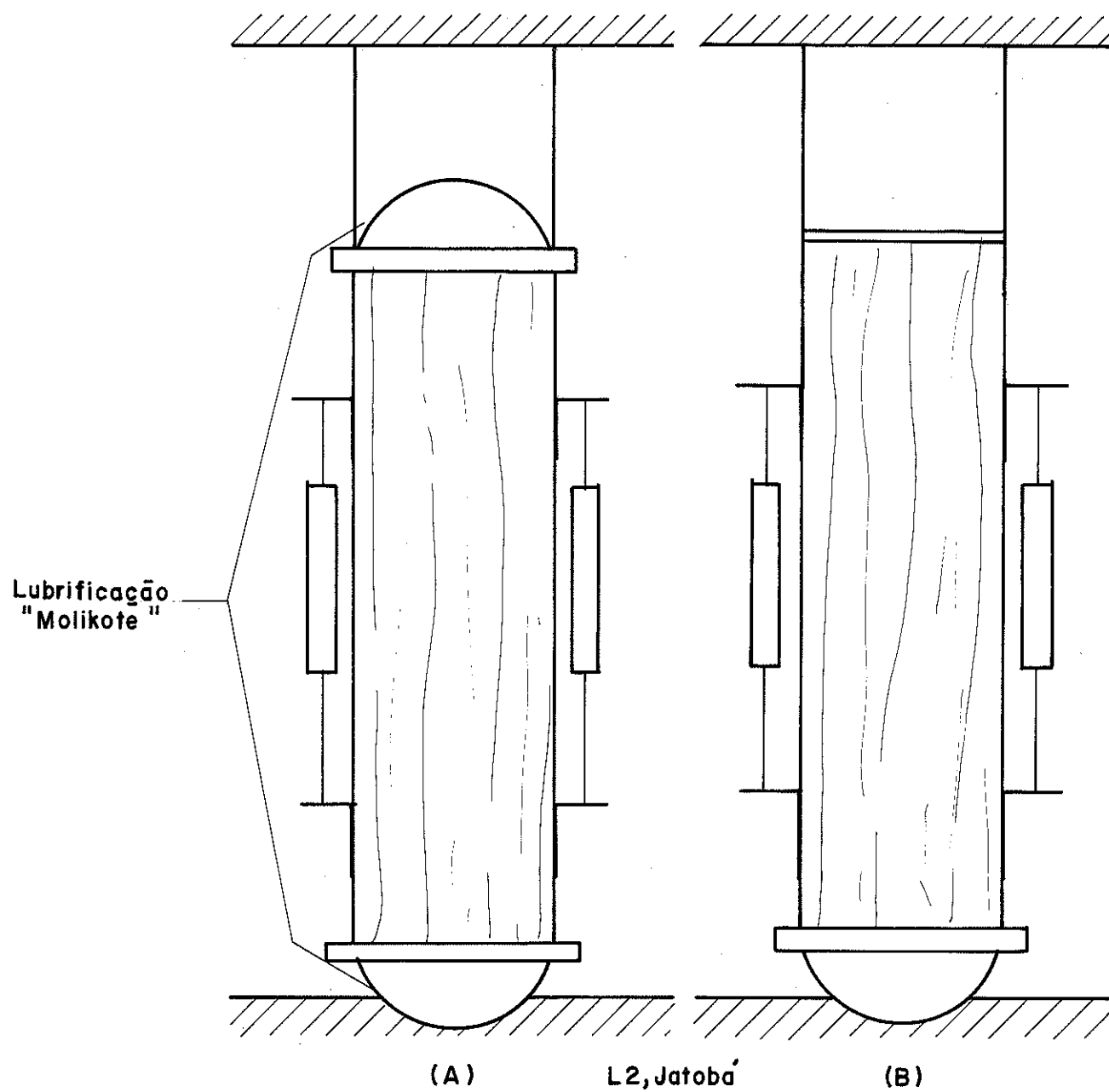


Fig. 3.6. Segunda comparação de lotes

CP nº	E_A (daN/cm ²)	E_B (daN/cm ²)	$D_i = E_A - E_B$	$d_i = \bar{d} - D_i$	d_i^2
L2J1	185270	201280	- 16010	+ 3700	13690000
L2J2	158875	190090	- 31215	+ 18905	357399025
L2J3	182295	177305	+ 4990	- 17300	299290000
L2J4	170010	187305	- 17295	+ 4985	24850225,
L2J5	187255	201610	- 14355	+ 2045	4182025
L2J6	178480	178455	+ 25	- 12335	152152225
$\Sigma =$	-	-	- 73860	0,00	851563500,0
MÉDIA	177030,83	189340,83	- 12310	-	-

Tabela 3.12: Valores de ensaio, módulos de elasticidade. Para metros para o teste "t".

$$\bar{d} = - 12310$$

$$s_d^2 = 170312700,0$$

$$s_d = 13050,39$$

$$s_{\bar{d}} = 5836,31$$

$$\text{intervalo: } [-27315,16; + 2695,16]$$

CP nº	$\Delta_{iA} = \bar{E}_A - E_{iA}$	$(\Delta_{iA})^2$	$\Delta_{iB} = \bar{E}_B - E_{iB}$	$(\Delta_{iB})^2$
L2J1	- 8239,17	67883922,3	- 11939,17	142543780,3
L2J2	+18155,83	329634163,0	- 749,17	561255,7
L2J3	- 5264,17	27711485,8	+ 12035,83	144861203,8
L2J4	+ 7020,83	49292053,9	+ 2035,83	4144603,8
L2J5	-10224,17	104533652,2	- 24584,17	604381414,6
L2J6	- 1449,17	2100093,7	+ 10885,83	118501294,8
$\Sigma =$	0,00	581155370,8	0,00	1014993471

Tabela 3.13: Valores calculados, dados para análise de variância - teste "F"

$$F = \frac{1014993471}{581155370,8} = 1,747$$

CP nº	$f_{C,A}$ (daN/cm ²)	$f_{C,B}$ (daN/cm ²)	$D_i = f_{C,A} - f_{C,B}$	$d_i = \bar{d} - D_i$	d_i^2
L2J1	601,033	596,729	+ 4,304	+ 0,919	0,845
L2J2	591,582	598,922	- 7,340	+12,563	157,829
L2J3	648,821	653,570	- 4,749	+ 9,972	99,441
L2J4	629,350	642,866	-13,516	+18,739	351,150
L2J5	638,796	613,343	+25,453	-20,230	409,253
L2J6	623,060	595,874	+27,186	-21,963	482,373
$\Sigma =$	-	-	+31,338	0,00	1500,891
MÉDIA	622,107	616,884	+ 5,223	-	-

Tabela 3.14: Valores de ensaio, limites de resistência. Parâmetros para o teste "t"

$$\bar{d} = 5,223$$

$$S_d^2 = 300,178$$

$$S_d = 17,326$$

$$S_{\bar{d}} = 7,748$$

$$\text{intervalo: } [-14,698; +25,144]$$

CP nº	$\Delta_{iA} = f_{cm,A} - f_{ci,A}$	$(\Delta_{iA})^2$	$\Delta_{iB} = f_{cm,B} - f_{ci,B}$	$(\Delta_{iB})^2$
L2J1	+ 21,074	444,113	+ 20,155	406,224
L2J2	+ 30,525	931,776	+ 17,962	322,633
L2J3	- 26,714	713,638	- 36,686	1345,863
L2J4	- 7,243	52,461	- 25,982	675,064
L2J5	- 16,689	278,523	+ 3,541	12,539
L2J6	- 0,953	0,908	+ 21,010	441,420
$\Sigma =$	0,00	2421,419	0,00	3203,743

Tabela 3.15: Valores calculados, dados para análise de variância - teste "F"

$$F = \frac{3203,743}{2421,419} = 1,323$$

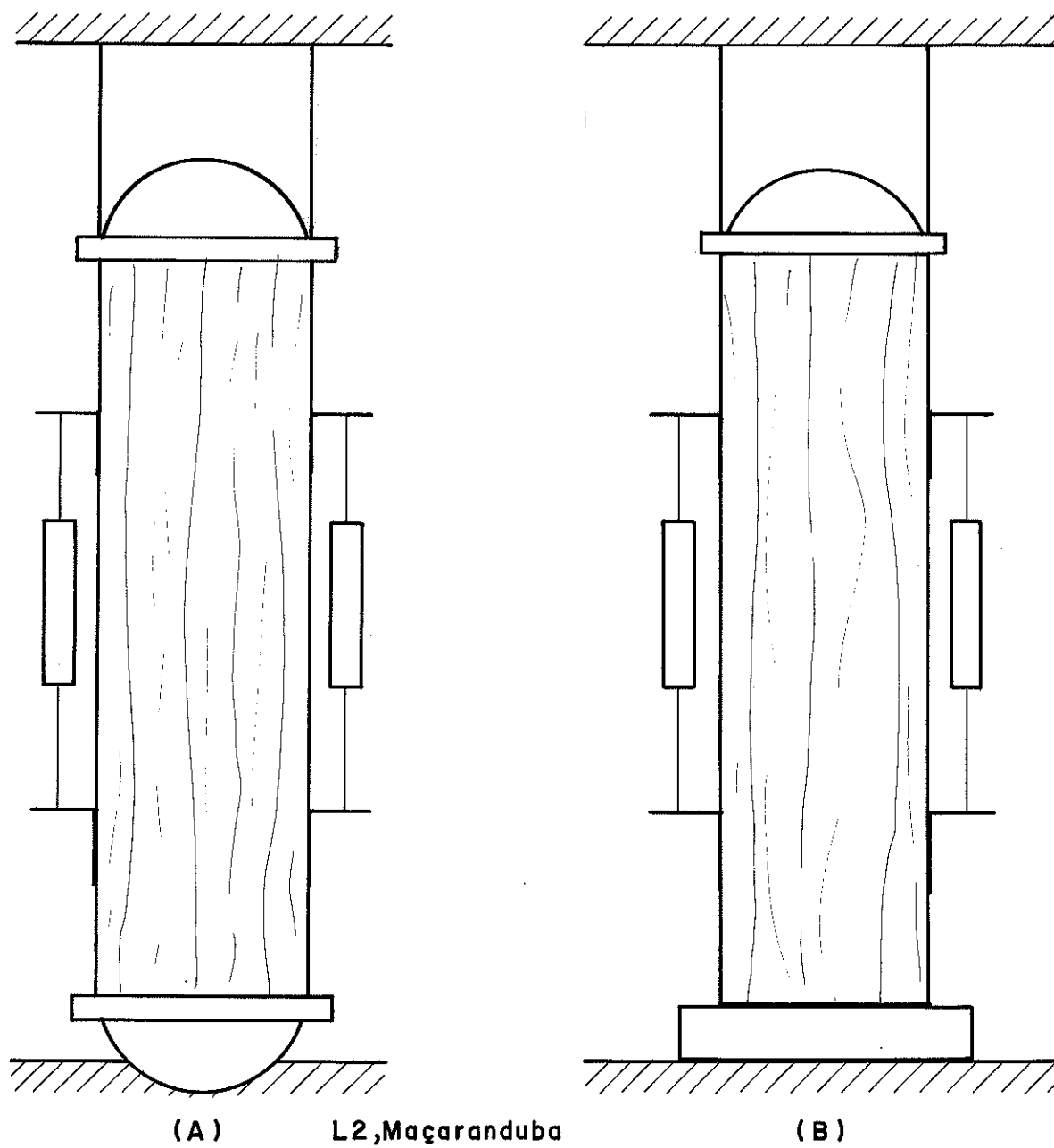


Fig. 3.7. Terceira comparação de lotes

CP nº	E_A (daN/cm ²)	E_B (daN/cm ²)	$D_i = E_A - E_B$	$d_i = \bar{d} - D_i$	d_i^2
L2M1	237195	225140	+ 12055	- 12920	166926400
L2M2	203705	188490	+ 15215	- 16080	258566400
L2M3	155550	171605	- 16055	+ 15190	230736100
L2M4	196610	196990	- 380	- 485	235225
L2M5	189600	201675	- 12075	+ 11210	125664100
L2M6	195200	199650	- 3950	+ 3085	9517225
$\Sigma =$	-	-	- 5190	0,00	791645450,0
MÉDIA	196310	197175	- 865,00	-	-

Tabela 3.16: Valores de ensaio, módulos de elasticidade. Parâmetros para o teste "t"

$$\bar{d} = - 865,00$$

$$S_d^2 = 158329090,0$$

$$S_d = 12582,89$$

$$S_{\bar{d}} = 5627,24$$

$$\text{intervalo: } [-15332,63; +13602,63]$$

CP nº	$\Delta_{iA} = \bar{E}_A - E_{iA}$	$(\Delta_{iA})^2$	$\Delta_{iB} = \bar{E}_B - E_{iB}$	$(\Delta_{iB})^2$
L2M1	- 40885,0	1671583225	- 27965,0	782041225
L2M2	- 7395,0	54686025	+ 8685,0	75429225
L2M3	+ 40760,0	1661377600	+ 25570,0	653824900
L2M4	- 300,0	90000	+ 185,0	34225
L2M5	+ 6710,0	45024100	- 4500,0	20250000
L2M6	+ 1110,0	1232100	- 1975,0	3900625
$\Sigma =$	0,00	3433993050	0,00	1535480200

Tabela 3.17: Valores calculados, dados para análise de variância - teste "F"

$$F = \frac{3433993050}{1535480200} = 2,236$$

CP nº	$f_{ci,A}$ (daN/cm ²)	$f_{ci,B}$ (daN/cm ²)	$D_i = f_{ci,A} - f_{ci,B}$	$d_i = \bar{d} - D_i$	d_i^2
L2M1	611,205	570,109	+ 41,096	-10,753	115,631
L2M2	583,743	559,919	+ 23,825	+ 6,518	42,482
L2M3	547,867	536,046	+ 11,821	+18,522	343,058
L2M4	645,045	607,504	+ 37,541	- 7,198	51,814
L2M5	640,976	628,656	+ 12,320	+18,023	324,823
L2M6	667,471	612,018	+ 55,453	-25,110	630,520
$\Sigma =$	-	-	+182,057	0,00	1508,328
MÉDIA	616,051	585,709	+ 30,343	-	-

Tabela 3.18: Valores de ensaio, limites de resistência. Parâmetros para o teste "t"

$$\bar{d} = + 30,343$$

$$S_d^2 = 301,666$$

$$S_d = 17,369$$

$$S_{\bar{d}} = 7,767$$

$$\text{intervalo: } [+10,373; +50,313]$$

CP nº	$\Delta_{iA} = f_{cm,A} - f_{ci,A}$	$(\Delta_{iA})^2$	$\Delta_{iB} = f_{cm,B} - f_{ci,B}$	$(\Delta_{iB})^2$
L2M1	+ 4,846	23,484	+ 15,600	243,360
L2M2	+32,308	1043,807	+ 25,790	655,124
L2M3	+68,184	4649,058	+ 49,663	2466,414
L2M4	-28,994	840,652	- 21,795	475,022
L2M5	-24,925	621,256	- 42,947	1844,445
L2M6	-51,420	2644,016	- 26,309	692,163
$\Sigma =$	0,0	9822,272	0,00	6386,528

Tabela 3.19: Valores calculados, dados para análise de variância - teste "F"

$$F = \frac{9822,272}{6386,528} = 1,536$$

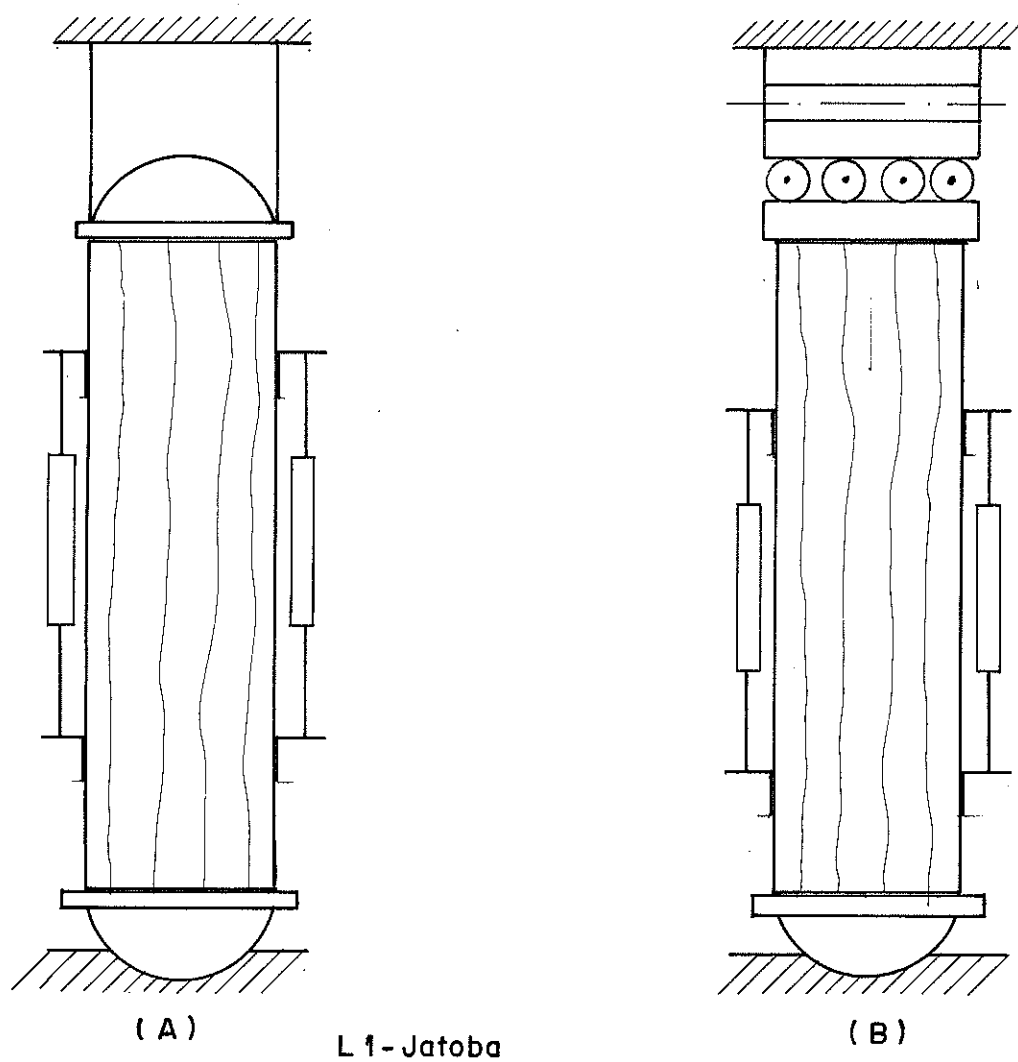


Fig. 3.8. Quarta comparação de lotes

CP nº	E_A (daN/cm ²)	E_B (daN/cm ²)	$D_i = E_A - E_B$	$d_i = \bar{d} - D_i$	d_i^2
L1J1	174175	203115	- 28940	+ 6272,5	39344256,25
L1J2	170125	178195	- 8070	-14597,5	213087006,25
L1J3	142175	170025	- 27850	+ 5182,5	26858306,25
L1J4	179940	226425	- 46485	+23817,5	567273306,25
L1J5	171235	181890	- 10655	-12012,5	144300156,25
L1J6	173605	187610	- 14005	- 8662,5	75038906,25
$\Sigma =$	-	-	-136005	0,00	1065901937,50
MÉDIA	168542,5	191210,0	-22667,5	-	-

Tabela 3.20. Valores de ensaio, módulos de elasticidade. Parâmetros para o teste "t"

$$\bar{d} = - 22667,5$$

$$S_d^2 = 213180387,5$$

$$S_d = 14600,7$$

$$S_{\bar{d}} = 6529,63$$

$$\text{intervalo: } [- 39455,18; - 5879,82]$$

CP nº	$\Delta_{iA} = \bar{E}_A - E_{iA}$	$(\Delta_{iA})^2$	$\Delta_{iB} = \bar{E}_B - E_{iB}$	$(\Delta_{iB})^2$
L1J1	- 5632,5	31725056,3	- 11905,0	141729025
L1J2	- 1582,5	2504306,3	+ 13015,0	169390225
L1J3	+26367,5	695245056,3	+ 21185,0	448804225
L1J4	-11397,5	129903006,3	- 35215,0	1240096225
L1J5	- 2692,5	7249556,3	+ 9320,0	86862400
L1J6	- 5062,5	25628906,3	+ 3600,0	12960000
$\Sigma =$	0,00	892255887,5	0,00	2099842100

Tabela 3.21. Valores calculados, dados para análise de variância - teste "F".

$$F = \frac{2099842100}{892255887,5} = 2,353$$

CP nº	$f_{ci,A}$ (daN/cm ²)	$f_{ci,B}$ (daN/cm ²)	$D_i = f_{ci,A} - f_{ci,B}$	$d_i = \bar{d} - D_i$	d_i^2
L1J1	579,795	592,762	- 12,967	+ 29,227	854,198
L1J2	579,335	608,142	- 28,808	+ 45,068	2031,095
L1J3	593,421	507,524	+ 85,897	- 69,637	4849,358
L1J4	653,527	627,406	+ 26,121	- 9,861	97,246
L1J5	649,751	621,435	+ 28,316	- 12,056	145,355
L1J6	660,779	661,782	- 1,002	- 17,262	297,967
$\Sigma =$	-	-	+ 97,558	0,00	8275,217
MÉDIA	619,435	603,175	+ 16,260	-	-

Tabela 3.22. Valores de ensaio, limites de resistência. Parâmetros para o teste "t".

$$\bar{d} = + 16,260$$

$$S_d^2 = 1655,043$$

$$S_d = 40,682$$

$$S_{\bar{d}} = 18,194$$

$$\text{intervalo: } [- 30,516; + 63,036]$$

CP nº	$\Delta_{iA} = f_{cm,A} - f_{ci,A}$	$(\Delta_{iA})^2$	$\Delta_{iB} = f_{cm,B} - f_{ci,B}$	$(\Delta_{iB})^2$
L1J1	+ 39,640	1571,303	+ 10,413	108,434
L1J2	+ 40,100	1607,983	- 4,967	24,669
L1J3	+ 26,014	676,711	+ 95,651	9149,146
L1J4	- 34,092	1162,287	- 24,231	587,133
L1J5	- 30,316	919,080	- 18,260	333,422
L1J6	- 41,344	1709,354	- 58,607	3434,761
$\Sigma =$	0,00	7646,718	0,00	13637,565

Tabela 3.23. Valores calculados, dados para análise de variância - teste "F".

$$F = \frac{13637,565}{7646,718} = 1,783$$

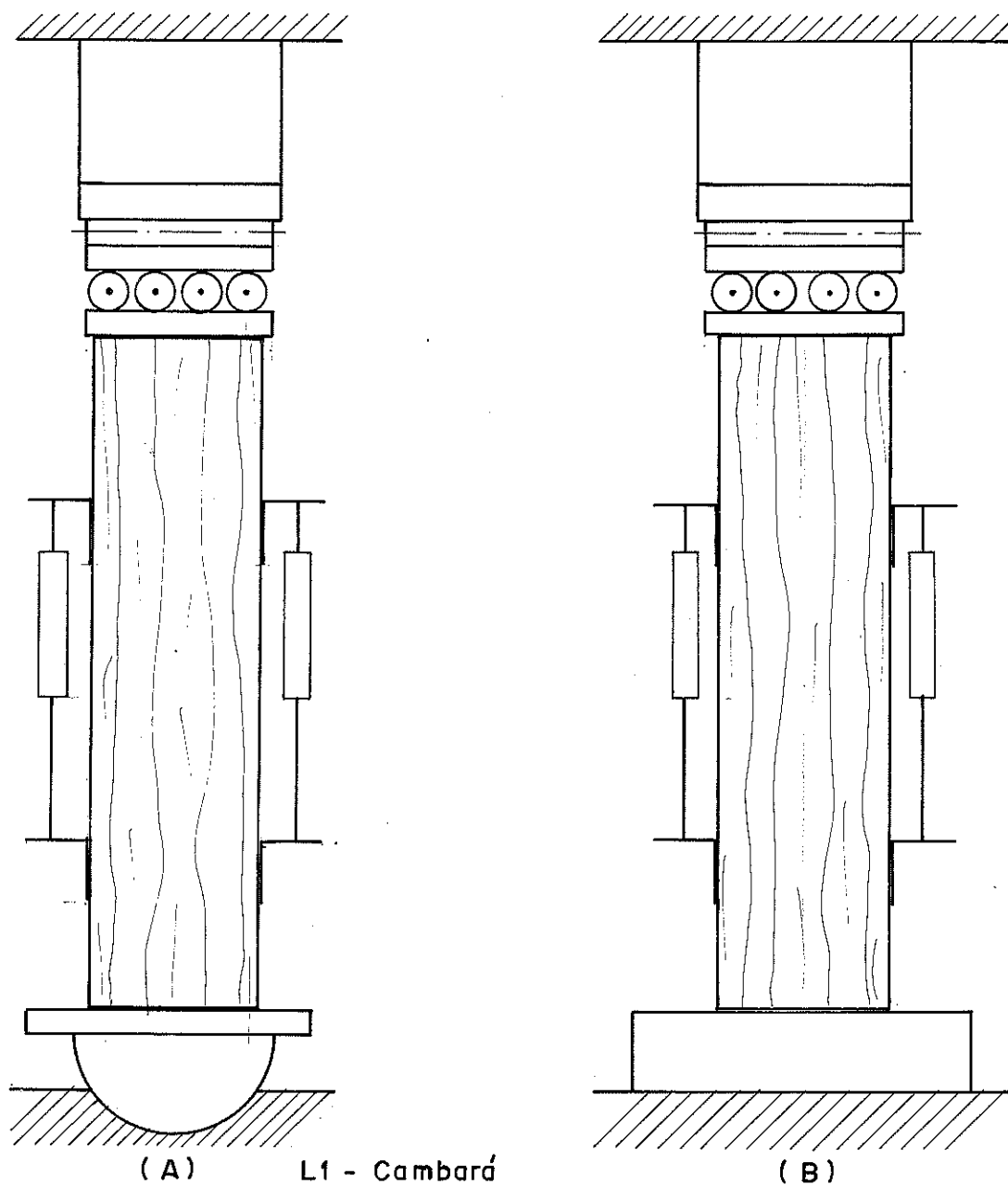


Fig. 3.9. Quinta comparação de lotes

CP nº	E_A (daN/cm ²)	E_B (daN/cm ²)	$D_i = E_A - E_B$	$d_i = \bar{d} - D_i$	d_i^2
L1C1	121110	125245	- 4135	+ 2940,83	8648500,69
L1C2	125185	135795	-10610	+ 9415,83	88657917,36
L1C3	135685	135230	+ 455	- 1649,17	2719750,69
L1C4	112770	114440	- 1670	+ 475,83	226417,36
L1C5	138810	135215	+ 3595	- 4789,17	22936117,36
L1C6	150735	145535	+ 5200	- 6394,17	40885367,36
$\Sigma =$	-	-	- 7165,0	0,00	164074070,82
MÉDIA	130715,83	131910,00	- 1194,17	-	-

Tabela 3.24: Valores de ensaio, módulos de elasticidade. Parâmetros para o teste "t".

$$\bar{d} = -1194,17$$

$$s_d^2 = 32814814,17$$

$$s_d = 5728,42$$

$$S_{\bar{d}} = 2561,83 \quad \text{intervalo: } [- 7780,63; + 5392,29]$$

CP nº	$\Delta_{iA} = \bar{E}_A - E_{iA}$	$(\Delta_{iA})^2$	$\Delta_{iB} = \bar{E}_B - E_{iB}$	$(\Delta_{iB})^2$
L1C1	+ 9605,83	92271970,0	+ 6665,0	44422225,0
L1C2	+ 5530,83	30590117,4	- 3885,0	15093225,0
L1C3	- 4969,17	24692650,5	- 3320,0	11022400,0
L1C4	+17945,83	322052933,9	+17470,0	305200900,0
L1C5	- 8094,17	65515534,0	- 3305,0	10923025,0
L1C6	-20019,17	400767033,8	-13625,0	185640625,0
$\Sigma =$	0,00	935890270,8	0,00	572302400,0

Tabela 3.25: Valores calculados, dados para análise de variância - teste "F".

$$F = \frac{935890270,8}{572302400,0} = 1,635$$

CP nº	$f_{c,A}$ (daN/cm ²)	$f_{c,B}$ (daN/cm ²)	$D_i = f_{ci,A} - f_{ci,B}$	$d_i = \bar{d} - D_i$	d_i^2
L1C1	342,653	314,785	+ 27,868	-32,318	1044,442
L1C2	322,494	357,517	- 35,023	+30,573	934,719
L1C3	326,589	348,403	- 21,814	+17,364	301,514
L1C4	318,878	305,099	+ 13,779	-18,229	332,290
L1C5	337,272	327,420	+ 9,852	-14,302	204,538
L1C6	325,590	346,951	- 21,361	+16,911	285,993
$\Sigma =$	-	-	- 26,699	0,00	3103,496
MÉDIA	328,913	333,363	- 4,450	-	-

Tabela 3.26: Valores de ensaio, limites de resistência. Parâmetros para o teste "t"

$$\bar{d} = -4,450$$

$$S_d^2 = 620,699$$

$$S_d = 24,914$$

$$S_{\bar{d}} = 11,142$$

$$\text{intervalo: } [-33,095; +24,196]$$

CP nº	$\Delta_{iA} = f_{cm,A} - f_{ci,A}$	$(\Delta_{iA})^2$	$\Delta_{iB} = f_{cm,B} - f_{ci,B}$	$(\Delta_{iB})^2$
L1C1	- 13,740	188,797	+ 18,578	345,124
L1C2	+ 6,419	41,199	- 24,155	583,440
L1C3	+ 2,324	5,399	- 15,041	226,217
L1C4	+ 10,035	100,695	+ 28,264	798,825
L1C5	- 8,359	69,878	+ 5,943	35,313
L1C6	+ 3,323	11,040	- 13,589	184,647
$\Sigma =$	0,00	417,009	0,00	2173,566

Tabela 3.27: Valores calculados, dados para análise de variância - teste "F"

$$F = \frac{2173,566}{417,009} = 5,212$$

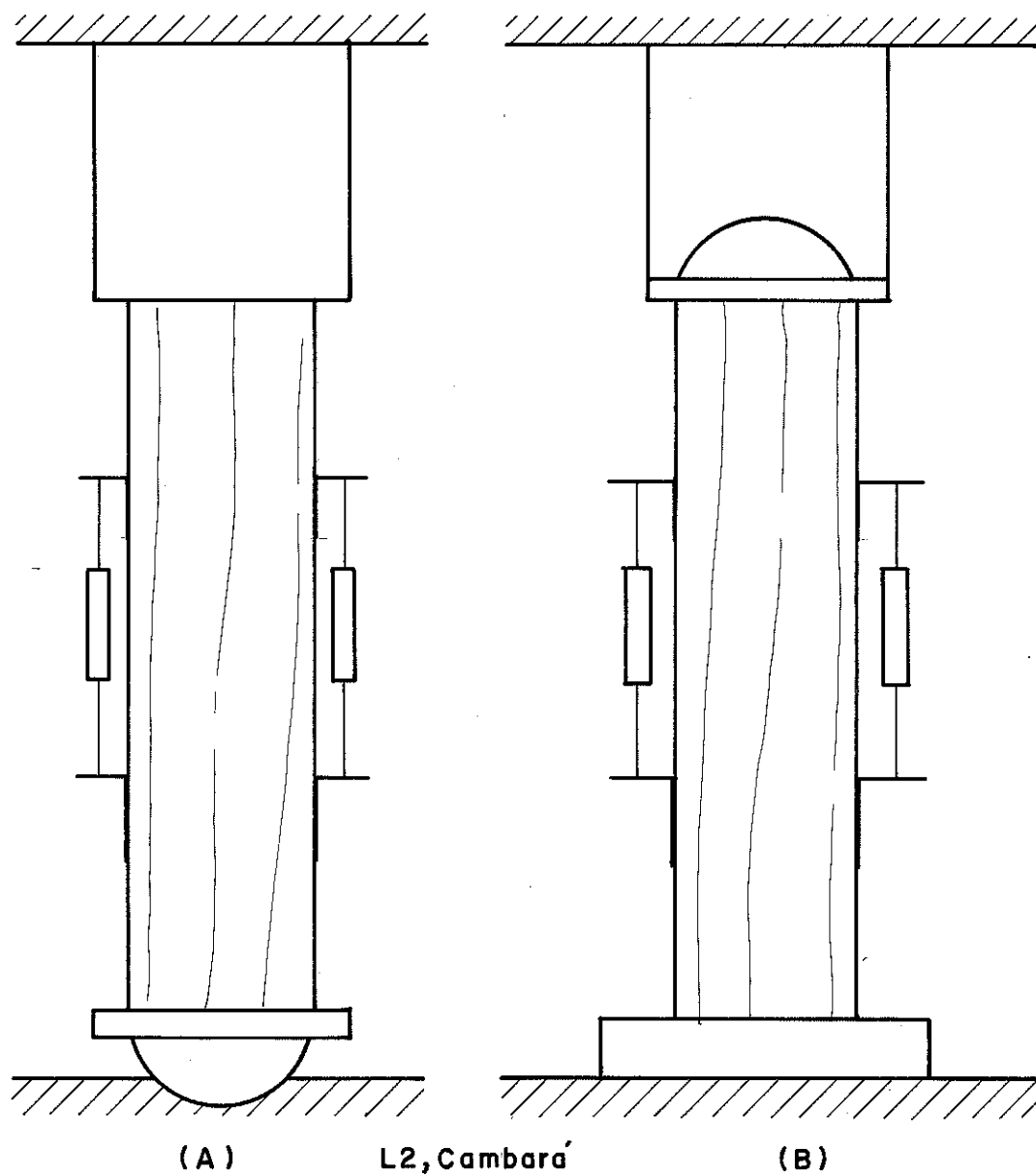


Fig. 3.10. Sexta comparação de lotes

CP nº	E_A (daN/cm ²)	E_B (daN/cm ²)	$D_i = E_A - E_B$	$d_i = \bar{d} - D_i$	d_i^2
L2C1	116225	124085	- 7860	+ 9077,5	82401006,25
L2C2	118515	118400	+ 115	+ 1102,5	1215506,25
L2C3	121245	122585	- 1340	+ 2557,5	6540806,25
L2C4	120425	120670	- 245	+ 1462,5	2138906,25
L2C5	115825	109815	+ 6010	- 4792,5	22968056,25
L2C6	140190	129565	+10625	- 9407,5	88501056,25
$\Sigma =$	-	-	+7305,0	0,00	203765337,50
MÉDIA	122070,83	120853,33	+1217,50	-	-

Tabela 3.28: Valores de ensaio, módulos de elasticidade. Para metros para o teste "t".

$$\bar{d} = + 1217,50$$

$$S_d^2 = 40753067,50$$

$$S_d = 6383,81$$

$$S_{\bar{d}} = 2854,93$$

$$\text{intervalo: } [-6122,52; +8557,52]$$

CP nº	$\Delta_{iA} = \bar{E}_A - E_{iA}$	$(\Delta_{iA})^2$	$\Delta_{iB} = \bar{E}_B - E_{iB}$	$(\Delta_{iB})^2$
L2C1	+ 5845,83	34173728,4	- 3231,67	10443669,4
L2C2	+ 3555,83	12643950,7	+ 2453,33	6018844,4
L2C3	+ 825,83	682000,7	- 1731,67	2998669,4
L2C4	+ 1645,83	2708767,4	+ 183,33	33611,1
L2C5	+ 6245,83	39010434,0	+11038,33	121844802,7
L2C6	-18119,17	328304200,5	- 8711,67	75893136,1
$\Sigma =$	0,00	417523120,8	0,00	217232733,3

Tabela 3.29: Valores calculados, dados para análise de variância - teste "F"

$$F = \frac{417523120,8}{217232733,3} = 1,922$$

CP nº	$f_{C,A}$ (daN/cm ²)	$f_{C,B}$ (daN/cm ²)	$D_i = f_{C,A} - f_{C,B}$	$d_i = \bar{d} - D_i$	d_i^2
L2C1	330,008	322,766	+ 7,242	- 8,394	70,451
L2C2	310,601	325,187	-14,586	+13,435	180,486
L2C3	330,375	328,685	+ 1,690	- 2,842	8,074
L2C4	318,729	318,248	+ 0,481	- 1,633	2,665
L2C5	348,257	355,989	- 7,732	+ 6,581	43,303
L2C6	328,705	322,709	+ 5,996	- 7,148	51,087
$\Sigma =$	-	-	- 6,909	0,00	356,066
MÉDIA	327,779	328,931	- 1,152	-	-

Tabela 3.30. Valores de ensaio, limites de resistência. Parâmetros para o teste "t".

$$\bar{d} = -1,152$$

$$S_d^2 = 71,213$$

$$S_d = 8,439$$

$$S_{\bar{d}} = 3,774$$

$$\text{intervalo: } [- 10,854; + 8,551]$$

CP nº	$\Delta_{iA} = f_{cm,A} - f_{ci,A}$	$(\Delta_{iA})^2$	$\Delta_{iB} = f_{cm,B} - f_{ci,B}$	$(\Delta_{iB})^2$
L2C1	- 2,229	4,968	+ 6,165	38,007
L2C2	+17,178	295,084	+ 3,774	14,243
L2C3	- 2,596	6,739	+ 0,246	0,061
L2C4	+ 9,050	81,903	+10,683	114,126
L2C5	-20,478	419,348	-27,058	732,135
L2C6	- 0,926	0,857	+ 6,222	38,713
$\Sigma =$	0,00	808,900	0,00	937,060

Tabela 3.31. Valores calculados, dados para análise de variância - teste "F".

$$F = \frac{937,060}{808,900} = 1,158$$

Em síntese, para os módulos de elasticidade, encontrou-se:

Análises	INTERVALOS		Equivalência rejeitada?
	$\bar{d} - S_{\bar{d}} \cdot t_{05}$	$\bar{d} + S_{\bar{d}} \cdot t_{05}$	
PRIMEIRA	- 636,66	+93919,99	não
SEGUNDA	-27315,16	+ 2695,16	não
TERCEIRA	-15332,63	+13602,63	não
QUARTA	-39455,18	- 5789,82	sim
QUINTA	- 7780,63	+ 5392,29	não
SEXTA	- 6122,52	+ 8557,52	não

Tabela 3.32. Quadro sinótico de avaliação, teste "t".

Análises	Valor calculado de F	Equivalência rejeitada ?
PRIMEIRA	3,05	não
SEGUNDA	1,747	não
TERCEIRA	2,236	não
QUARTA	2,353	não
QUINTA	1,635	não
SEXTA	1,922	não

Tabela 3.33. Quadro sinótico de avaliação, teste "F"
($F_{\text{crít}} = 5,05$).

E, para os limites de resistência, foram encontrados:

Análises	INTERVALOS		Equivalência rejeitada ?
	$\bar{d} - S_{\bar{d}} \cdot t_{0,5}$	$\bar{d} + S_{\bar{d}} \cdot t_{0,5}$	
PRIMEIRA	- 14,581	+ 27,471	não
SEGUNDA	- 14,698	+ 25,144	não
TERCEIRA	+ 10,373	+ 50,313	sim
QUARTA	- 30,516	+ 63,036	não
QUINTA	- 33,095	+ 24,196	não
SEXTA	- 10,854	+ 8,551	não

Tabela 3.34: Quadro sinótico de avaliação, teste "t".

Análises	Valor calculado de F	Equivalência rejeitada ?
PRIMEIRA	1,236	não
SEGUNDA	1,323	não
TERCEIRA	1,536	não
QUARTA	1,783	não
QUINTA	5,212	sim
SEXTA	1,158	não

Tabela 3.35: Quadro sinótico de avaliação, teste F
($F_{crít} = 5,05$)

3.4. CONCLUSÕES

3.4.1. Valores para Módulos de Elasticidade:

A análise estatística, nos parâmetros de confiabilidade aplicados, mostra que, no intervalo elástico de ensaio, os conjuntos de ensaio são equivalentes, exceto aqueles usados na quarta avaliação [(s1,i2) x (s2,i2)], que indicam flutuação significativa dos valores obtidos dos ensaios [isto é, são ensaios diferentes].

3.4.2. Valores para Limites de Resistência:

Nos parâmetros de confiabilidade aplicados, a análise estatística mostra que os dispositivos de ensaio usados na terceira avaliação [(s1,i2)x(s1,i1)] e na quinta avaliação [(s2,i2)x(s1,i1)] interferem nos resultados de modo a não os tornarem equivalentes.

3.4.3. Sobre os Dispositivos de Ensaio:

(a) O conjunto de ensaio (s1,i1) é o menos instável e o de mais simples manipulação. A perfeita lubrificação das superfícies de contato de s1 permite acomodação às excentricidades eventualmente desenvolvidas no ensaio e, por isso, auxilia a manutenção de um eixo de carregamento o mais possível na direção das fibras, até ser alcançado o limite de resistência do corpo de prova. A base fixa e perfeitamente lisa (i1), usinada, permite a operação do ensaio de modo mais simples, não permitindo acomodações de imbricamento entre as rugosidades das superfícies da máquina e do corpo de prova, e sem requerer previamente o nivelamento do dispositivo, que ocorre quando se usa i2, por exemplo.

(b) O conjunto (s2,i2) apresenta grande dificuldade de instalação por formar uma cadeia cinemática com um grau de liberdade no plano do ensaio. O perfeito alinhamento das superfícies a ensaiar torna a montagem do conjunto menos problemática, mas não elimina a hipostaticidade verificada.

(c) Os conjuntos (s1) e (i2), com as articulações plenamente lubrificadas funcionam como esferas perfeitas, e tais rótulas não foram utilizadas devido aos pequenos comprimentos dos corpos de prova, sendo por aqueles substituídas.

3.4.4. A Respeito da Escolha dos Dispositivos

Diante das considerações expostas em 3.4.1, 3.4.2 e 3.4.3, foi escolhido o conjunto de dispositivos (s1, i1) como o mais conveniente para a realização de ensaios de compressão paralela às fibras de madeira. Na figura 3.11., os dispositivos são novamente apresentados.

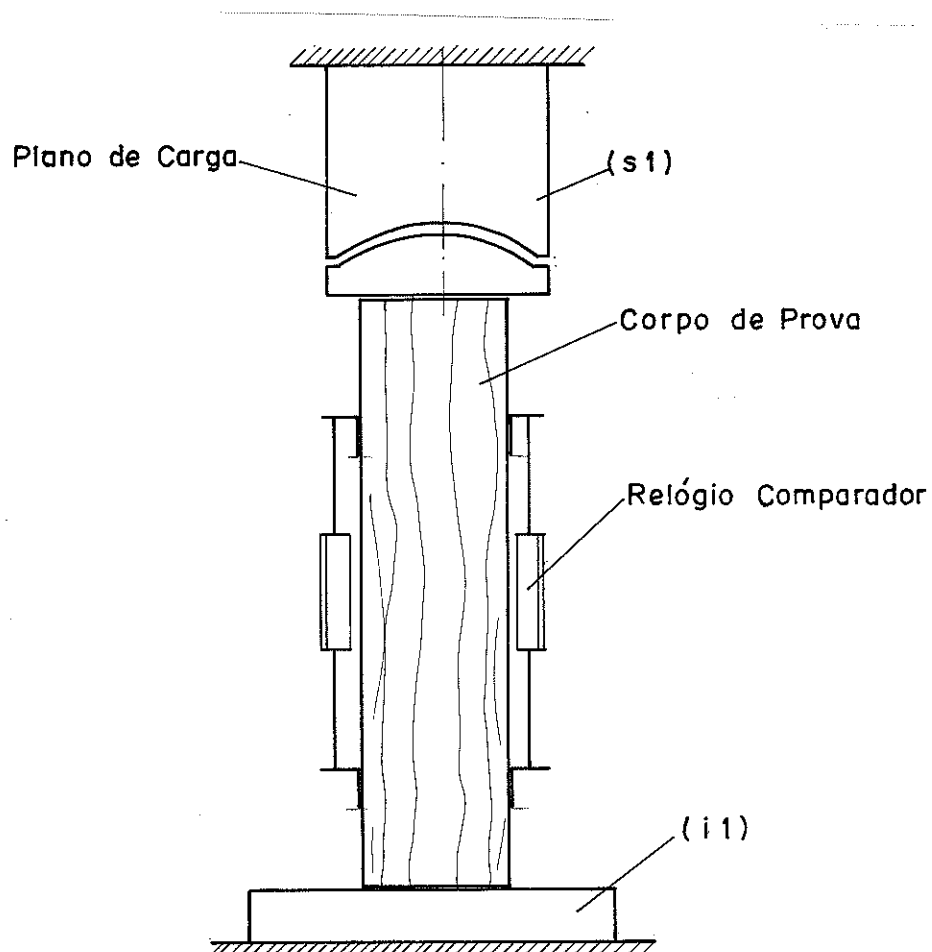


Fig. 3.11. Dispositivos para ensaio de compressão paralela às fibras de madeira.

CAPITULO 4

4. VARIACÃO DO TAMANHO DO CORPO DE PROVA E SUA INFLUÊNCIA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS

4.1. GENERALIDADES

Neste estudo, entende-se por variação do tamanho a ampliação ou redução volumétrica de um prisma retangular, de base quadrada, que diferir das dimensões 5,0 cm x 5,0 cm x 20,0 cm, mantidas as proporções entre seus lados.

A referência em 5,0 x 5,0 x 20,0 cm³ traz benefícios em termos do estudo por se tratar de um corpo de prova internacional, recomendado pela COPANT (Comision Panamericana de Normas Técnicas), Norma 464; pela ASTM (American Society for Testing and Materials), Norma D143-1978, entre outras. Além disso, traz economia de volume de material (500 cm³) em relação ao corpo de prova padrão da Norma NBR 6230/82, da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), "Ensaaios Físicos e Mecânicos de Madeiras" - Método Brasileiro, o antigo MB-26 (1940), de 6,0 cm x 6,0 cm x 18,0 cm (648 cm³) para os ensaios de elasticidade, mais os corpos de prova de 2,0 cm x 2,0 cm x 3,0 cm (12 cm³) para ensaios de limites de resistência: realizam-se os dois ensaios em um único corpo de prova (figura 4.1.).

O corpo de prova de referência traz maior quantidade de material na direção desejada de ensaio (paralela às fibras, 20 cm) que os corpos de prova adotados pela NBR 6230/82 (18 cm e 3 cm), constituindo, para os ensaios de limites de resistência, uma amostra maior do diâmetro da tora (25 cm² contra 4 cm²), requerendo, por seção de tronco, um número total de ensaios menor e, já, propiciando uma amostragem dirigida aleatoriamente em relação à árvore (isto é, não viciada).

O corpo de prova usado para referência traz a vantagem adicional de poder ser obtido a partir de peças estruturais mais elementares (caibros e vigotas) e permitindo, com isto, a amostragem e coleta de material em trechos de barras que efetivamente serão utilizadas (amostragem em obra ou serraria), cobrindo a variabilidade das propriedades auferidas em laboratório para as demonstradas em condições de serviço com menor margem de erro.

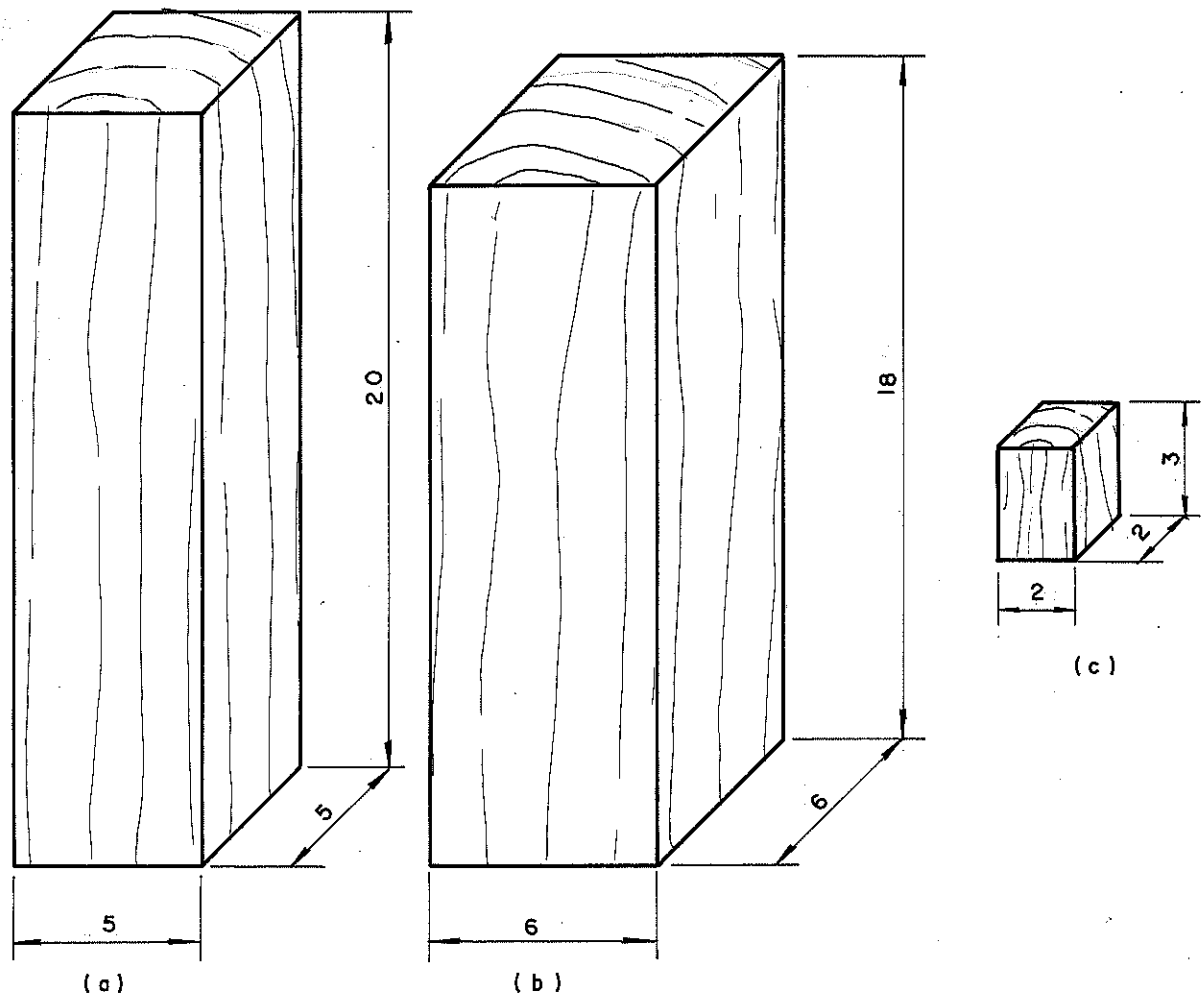


Fig. 4.1: Corpos de prova normalizados (dimensões em cm).
 (a) ASTM, COPANT, BSI; referência neste estudo
 (b) e (c) ABNT

4.2. DISCUSSÃO SOBRE OS MÉTODOS

A Norma Brasileira Recomendada, NB-11R (1950), da ABNT, "Cálculo e Execução de Estruturas de Madeira", diz em seu ítem 51: "COMPRESSÃO AXIAL DE PEÇAS CURTAS".

As tensões de compressão paralela às fibras em peças com índice de esbeltez até $\lambda = (\lambda_{fl}/i) = 15$, solicitadas por força axial, não deverão ultrapassar o seguinte valor:

$$\bar{\sigma}_c = 0,20 \sigma_c''$$

Uma peça proporcional de $b:l = 1:4$ ($l = 4b$) tem índice de esbelte λ igual a:

$$\lambda = \frac{l}{i} = \frac{4b}{\sqrt{\frac{b \cdot b^3}{12 \cdot b^2}}} = \frac{4b}{\sqrt{\frac{b^3}{12}}} = 4 \sqrt{12}$$

$$\lambda = 8 \sqrt{3} = 13,86 < 15.$$

Portanto, um critério bastante conservador já considera tais peças curtas. A Norma Brasileira em vigor NBR 7190/82 (NB-11, 1951), considera peças curtas aquelas aquelas com $\lambda \leq 40$, ampliando aqueles limites.

A Norma Americana considera curtas as peças com (l/b) menores que 11 e apenas a partir daí as peças ficam sujeitas à instabilidade. Os corpos de prova deste estudo têm razão (l/b) igual a 4. Usando-se peças de altura variável e mantida a proporção (l/b) , a influência dos dispositivos de apoio no comprimento de flambagem e, portanto, na esbelte, é também variável, mas com acréscimos em l não maiores que a metade de b , para peças com largura maior que 5 cm.

4.3. MATERIAIS UTILIZADOS

Os corpos de prova proporcionais utilizados nesta experimentação tiveram a aresta variando desde 2 até 15 centímetros, tornando-se os corpos de prova 2.(1 x 1 x 4) cm³ até 15.(1 x 1 x 4) cm³; todos foram tomados da mesma árvore (figura 4.2.).

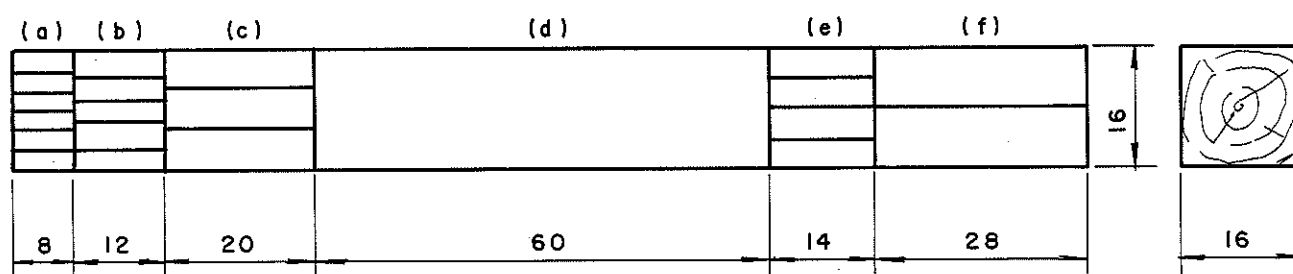


Fig. 4.2: Corte dos corpos de prova; vista lateral igual à vista superior (dimensões: cm).

Descontando-se 4 a 5 mm por linha de corte, e considerando o posterior aplainamento das superfícies, obtiveram-se os corpos de prova seguintes (figura 4.3.):

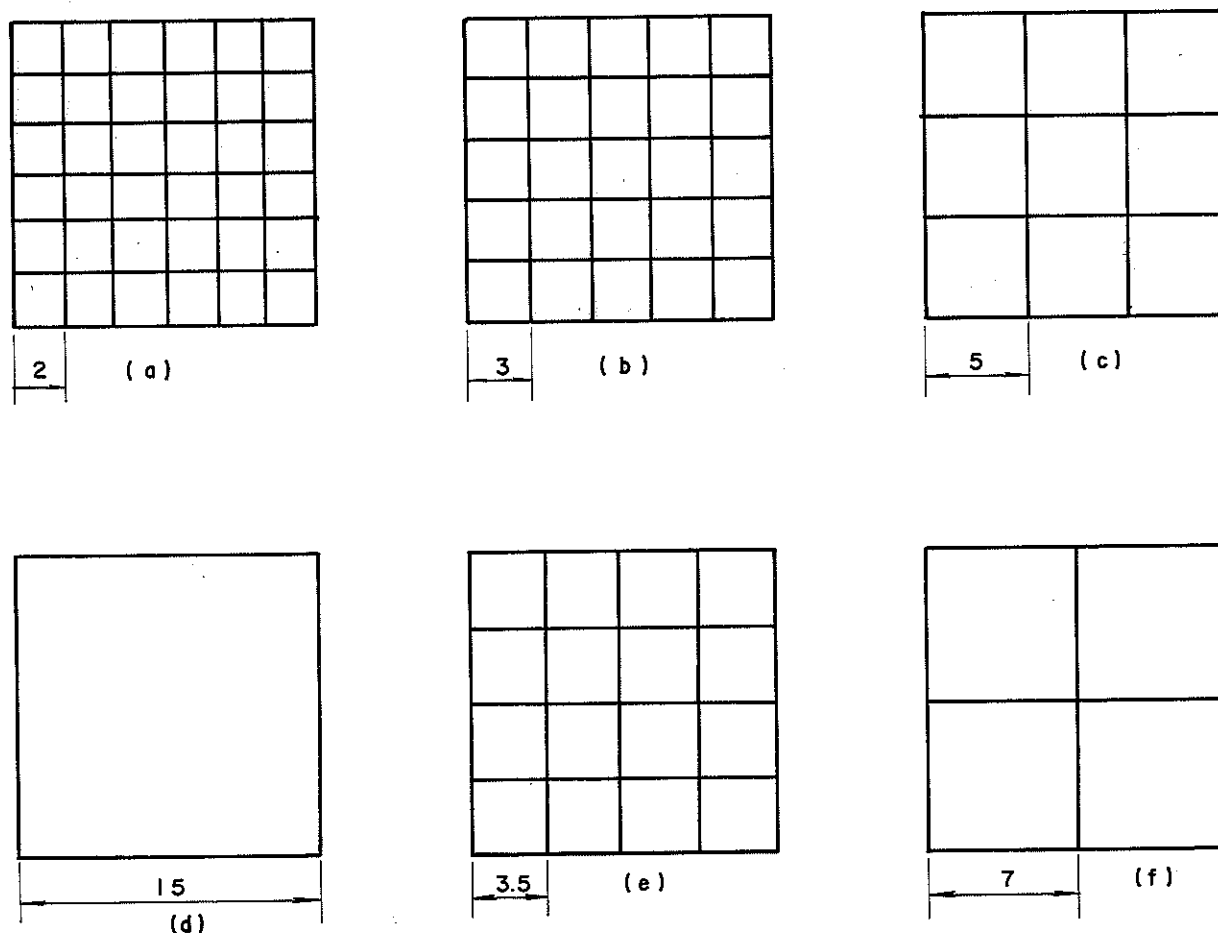


Fig. 4.3: Vista de topo dos cortes (dimensões: cm). Onde:

(a) 36cp de $2,0 \times 2,0 \times 8,0\text{cm}^3$

(b) 25cp de $3,0 \times 3,0 \times 12,0\text{cm}^3$

(c) 9cp de $5,0 \times 5,0 \times 20,0\text{cm}^3$

(d) 1cp de $15,0 \times 15,0 \times 60,0\text{cm}^3$

(e) 16cp de $3,5 \times 3,5 \times 14,0\text{cm}^3$

(f) 4cp de $7,0 \times 7,0 \times 28,0\text{cm}^3$

Estas famílias de corpos de prova foram obtidos nas espécies *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus saligna*, de árvores crescidas no Estado de São Paulo, respectivamente dos municípios de Barra Bonita e Arealva, com idades de 25 e 15 anos. Uma família de cada árvore destinou-se aos ensaios em unidade de saturação das fibras ("verdes"). As amostras disponíveis permitiram, ainda, a extração dos lotes (a), (b),

(c), (e), (f) para ensaios em unidade de equilíbrio ao ar.

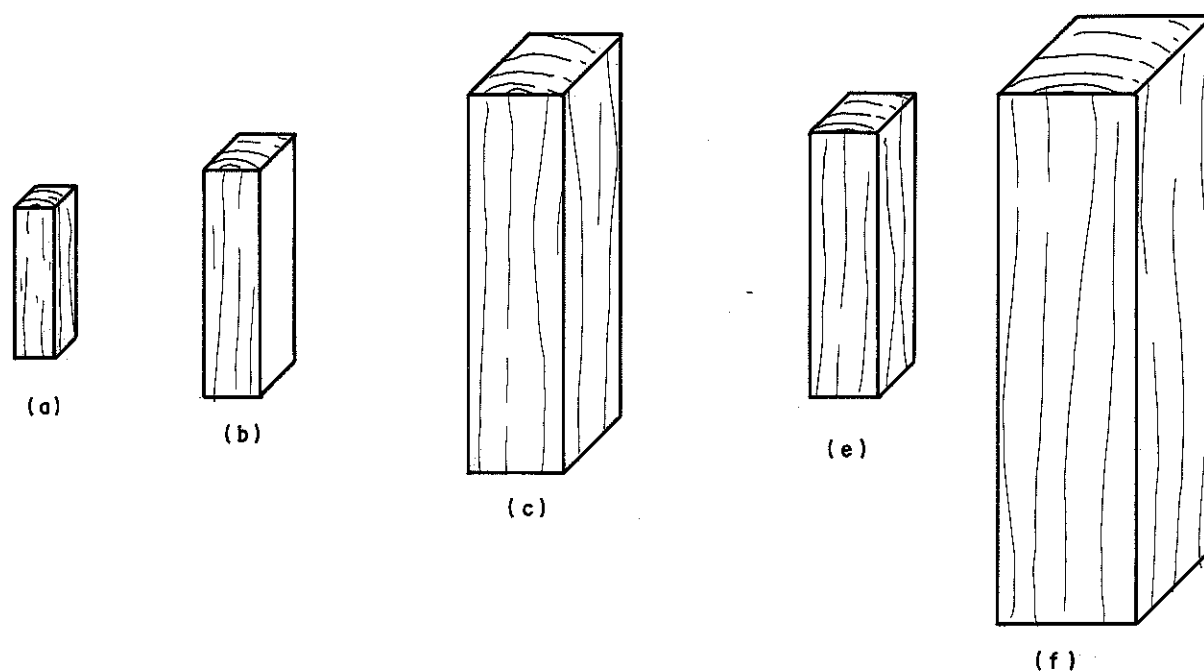


Fig. 4.4: Corpos de prova obtidos.

Adicionalmente, foi possível obter um lote de 36 corpos de prova, de dimensões $2,0 \times 2,0 \times 3,0 \text{ cm}^3$, de *Eucalyptus saligna*, para ensaio "verde", 16 corpos de prova de $3,5 \times 3,5 \times 14,0 \text{ cm}^3$, de *Eucalyptus citriodora*, para ensaio em unidade de equilíbrio ao ar, e um pedaço de *Peroba Rosa* (*Aspidosperma polyneuron*), de onde se retiraram os lotes (a), (e) e (f), para ensaio em unidade de equilíbrio ao ar.

As tabelas 4.1. a 4.5. apresentam os diversos resultados médios de ensaios obtidos por espécie e por teor de umidade.

N	b_e	b_l	l	f_{cm}	S
1	12,0	12,0	48,0	600,694	-
4	7,0	7,0	28,0	630,541	18,073
9	5,0	5,0	20,0	645,694	77,486
16	3,5	3,5	14,0	627,333	108,121
25	3,0	3,0	12,0	622,309	91,768
36	2,0	2,0	8,0	618,291	100,495

Tabela 4.1: Valores médios de ensaio, Eucalipto citriodora, "verdes", onde:

b_0 = menor dimensão da seção transversal, cm

b_1 = maior dimensão da seção transversal, cm

l = comprimento do corpo de prova, cm

f_{cm} = limite de resistência médio do lote, daN/cm²

S = desvio padrão do lote, daN/cm²

N = número de corpos de prova do lote

N	b_0	b_1	l	f_{cm}	S
4	7,0	7,0	28,0	693,896	21,310
9	5,0	5,0	20,0	676,591	75,975
16	3,5	3,5	14,0	833,500	93,806
16	3,5	3,5	14,0	781,598	107,747
20	3,0	3,0	12,0	740,036	124,358
35	2,0	2,0	8,0	971,896	101,552

Tabela 4.2: Valores médios de ensaio, Eucalipto citriodora, seco ao ar.

Observação: Os lotes finais têm menos corpos de prova que o previsto devido a defeitos ocorridos durante a secagem.

N	b_0	b_1	l	f_{cm}	S
1	15,0	15,0	60,0	273,333	-
4	7,0	7,0	28,0	334,829	93,961
9	5,0	5,0	20,0	325,876	88,934
16	3,5	3,5	14,0	343,357	91,271
25	3,0	3,0	12,0	317,708	94,647
36	2,0	2,0	8,0	327,362	84,216
36	2,0	2,0	3,0	336,580	87,479

Tabela 4.3: Valores médios de ensaio, Eucalipto saligna, "verdes".

N	b ₀	b ₁	ℓ	f _{cm}	S
4	6,0	6,0	24,0	503,927	72,185
4	5,0	5,0	20,0	523,657	106,912
13	3,5	3,5	14,0	499,226	98,690
15	3,0	3,0	12,0	580,954	99,013
30	2,0	2,0	8,0	655,400	77,457

Tabela 4.4: Valores médios de ensaio, Eucalipto saligna, secos ao ar.

Observação: Os lotes tiveram redução em número e em tamanho por causa das perdas de material ocorridas durante a secagem: em penamento e fendilhamento intensos.

N	b ₀	b ₁	ℓ	f _{cm}	S
4	7,0	7,0	28,0	593,158	58,169
16	3,5	3,5	14,0	578,501	72,962
36	2,0	2,0	8,0	601,034	42,763

Tabela 4.5: Valores médios de ensaio, peroba rosa, secos ao ar.

Os resultados de todos os ensaios, para todos os corpos de prova, encontram-se a seguir, tabelas 4.6. a 4.30.

CP. nº	b ₀ (cm)	b ₁ (cm)	ℓ (cm)	A (cm ²)	P _{máx} (daN)	f _c (daN/cm ²)
SVA01	1,959	1,954	7,943	3,828	1530	399,698
SVA02	1,945	1,938	7,951	3,769	1465	388,655
SVA03	1,954	1,923	7,954	3,758	1425	379,237
SVA04	1,941	1,929	7,941	3,744	830	221,677
SVA05	1,930	1,946	7,951	3,756	1535	408,703
SVA06	1,865	1,896	7,918	3,536	1205	340,777
SVA07	1,924	1,896	7,943	3,648	1310	359,110
SVA08	1,921	1,939	7,941	3,725	805	216,118
SVA09	1,933	1,936	7,959	3,742	820	219,117
SVA10	1,915	1,903	7,953	3,644	1415	388,283
SVA11	1,935	1,909	7,951	3,694	1580	427,730
SVA12	1,935	1,909	7,951	3,694	710	192,208
SVA13	1,934	1,899	7,958	3,673	1515	412,507
SVA14	1,940	1,928	7,939	3,740	1040	278,051
SVA15	1,923	1,905	7,945	3,663	1540	420,384

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c (daN/cm ²)
SVA16	1,934	1,929	7,945	3,731	1065	285,470
SVA17	1,920	1,916	7,954	3,679	1545	419,983
SVA18	1,940	1,873	7,941	3,634	1030	283,464
SVA19	1,920	1,911	7,955	3,669	1415	385,651
SVA20	1,935	1,926	7,948	3,727	1055	283,084
SVA21	1,861	1,951	7,940	3,631	1415	389,720
SVA22	1,908	1,921	7,933	3,665	1175	320,577
SVA23	1,893	1,949	7,948	3,689	1510	409,274
SVA24	1,915	1,915	7,936	3,667	570	155,431
SVA25	1,940	1,909	7,948	3,703	1445	390,176
SVA26	1,914	1,906	7,945	3,648	1215	333,052
SVA27	1,933	1,899	7,949	3,671	1290	351,425
SVA28	1,931	1,929	7,929	3,725	1110	297,995
SVA29	1,933	1,926	7,944	3,723	1540	413,650
SVA30	1,945	1,938	7,950	3,769	1540	408,552
SVA31	1,919	1,925	7,944	3,694	975	263,936
SVA32	1,896	1,941	7,931	3,680	1160	315,206
SVA33	1,899	1,949	7,943	3,701	1085	293,152
SVA34	1,888	1,899	7,933	3,585	475	132,485
SVA35	1,936	1,930	7,954	3,736	1505	402,786
SVA36	1,916	1,914	7,945	3,667	725	197,697

Tabela 4.6: Corpos de Prova de eucalipto saligna, verdes, família (a).

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c (daN/cm ²)
SVB01	2,985	3,030	11,885	9,045	3560	393,607
SVB02	2,840	2,963	11,918	8,415	2110	250,745
SVB03	2,935	2,950	11,923	8,658	2300	265,643
SVB04	2,983	2,990	11,885	8,800	3540	402,280
SVB05	2,973	2,935	11,913	8,726	2850	326,619
SVB06	3,003	2,973	11,893	8,928	3760	421,151
SVB07	2,968	2,950	11,875	8,756	1930	220,430
SVB08	2,988	2,968	11,873	8,868	3620	408,192
SVB09	2,995	2,938	11,878	8,799	3220	365,938
SVB10	2,950	2,938	11,925	8,667	2250	259,602
SVB11	2,948	2,975	11,953	8,770	3530	402,495
SVB12	2,823	2,953	11,868	8,336	1250	149,946

CP nº	b_o (cm)	b_l (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c (daN/cm ²)
SVB13	2,953	2,970	11,908	8,770	3040	346,620
SVB14	2,918	2,938	11,890	8,573	1210	141,139
SVB15	2,953	2,963	11,935	8,750	1580	180,577
SVB16	2,953	2,960	11,918	8,741	1480	169,319
SVB17	2,935	2,993	11,915	8,784	3160	359,726
SVB18	2,993	2,958	11,923	8,853	3630	410,017
SVB19	2,953	2,970	11,940	8,770	3400	387,667
SVB20	2,950	2,923	11,913	8,623	3845	445,908
SVB21	2,920	2,938	11,930	8,579	2530	294,908
SVB22	2,983	2,893	11,945	8,630	3030	351,108
SVB23	2,825	2,975	11,900	8,404	2285	271,882
SVB24	2,965	2,923	11,920	8,667	3830	441,922
SVB25	2,943	2,938	11,938	8,647	2380	275,255

Tabela 4.7. Corpos de prova de eucalipto saligna, verdes, família (b)

CP nº	b_o (cm)	b_l (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c (daN/cm ²)
SVC01	4,980	4,915	20,075	24,477	9870	403,241
SVC02	4,895	4,918	20,063	24,074	5250	218,081
SVC03	4,900	4,960	20,063	24,304	8050	331,221
SVC04	4,975	4,958	20,050	24,666	9750	395,280
SVC05	4,958	4,955	20,013	24,567	4300	175,032
SVC06	4,955	4,918	20,075	24,369	7400	303,668
SVC07	4,945	4,913	20,000	24,295	11050	454,830
SVC08	4,953	4,938	20,038	24,458	8500	347,536
SVC09	4,938	4,863	20,050	24,013	7300	303,996

Tabela 4.8. Corpos de prova de eucalipto saligna, verdes, família (c)

CP nº	b_o (cm)	b_l (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c (daN/cm ²)
SVE01	3,500	3,523	13,980	12,331	4670	378,736
SVE02	3,480	3,490	13,983	12,145	1430	117,742
SVE03	3,493	3,453	14,043	12,061	4930	408,744
SVE04	3,513	3,525	13,998	12,383	5490	443,338
SVE05	3,498	3,508	13,980	12,271	3640	296,635
SVE06	3,553	3,518	13,998	12,499	4910	392,817
SVE07	3,440	3,485	13,988	11,998	3070	256,081
SVE08	3,528	3,520	13,968	12,419	5250	422,754

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_C (daN/cm ²)
SVE09	3,508	3,508	14,030	12,306	4620	375,425
SVE10	3,533	3,503	14,020	12,376	5140	415,317
SVE11	3,500	3,503	14,033	12,261	4920	401,289
SVE12	3,505	3,493	13,990	12,243	2620	214,000
SVE13	3,513	3,503	14,023	12,306	5400	438,809
SVE14	3,495	3,533	13,985	12,348	3870	313,415
SVE15	3,503	3,490	14,030	12,225	4100	335,365
SVE16	3,495	3,475	13,990	12,145	3440	283,241

Tabela 4.9. Corpos de prova de eucalipto saligna, verdes, família (e)

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_C (daN/cm ²)
SVF01	6,945	6,930	28,150	48,129	12750	264,914
SVF02	6,933	6,935	28,375	48,080	19250	400,371
SVF03	6,908	6,935	28,150	47,907	20600	430,000
SVF04	6,935	6,943	28,363	48,150	11750	244,031

Tabela 4.10. Corpos de prova de eucalipto saligna, verdes, família (f)

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_C (daN/cm ²)
CVA01	1,973	1,958	7,958	3,863	2840	735,154
CVA02	1,978	1,985	7,989	3,926	2730	695,306
CVA03	2,003	1,985	7,989	3,976	2230	560,872
CVA04	2,010	1,948	7,999	3,915	3080	786,621
CVA05	1,960	1,978	7,974	3,877	2160	557,149
CVA06	2,010	1,945	7,950	3,909	1520	388,801
CVA07	1,980	2,003	7,961	3,966	1840	463,951
CVA08	1,970	2,003	8,006	3,946	2900	734,938
CVA09	1,993	1,995	7,980	3,976	2660	669,008
CVA10	1,965	1,990	7,935	3,910	2130	544,708
CVA11	1,973	2,015	7,958	3,976	2690	676,628
CVA12	1,998	2,000	7,985	3,996	2690	673,106
CVA13	1,965	1,998	7,955	3,926	2470	629,128
CVA14	1,978	2,000	7,990	3,956	2180	551,062
CVA15	1,995	1,950	8,055	3,890	2850	732,601
CVA16	1,968	1,993	8,004	3,922	2310	588,952
CVA17	1,975	1,990	7,990	3,930	2570	653,902

CP nº	b ₀ (cm)	b ₁ (cm)	ℓ (cm)	A (cm ²)	P _{máx} (daN)	f _c (daN/cm ²)
CVA18	1,990	1,983	8,018	3,946	2200	577,503
CVA19	1,965	2,005	7,974	3,940	2565	651,044
CVA20	1,998	2,003	7,974	4,002	2575	643,429
CVA21	2,000	1,970	8,019	3,940	2700	685,279
CVA22	1,943	1,975	7,969	3,837	2050	534,212
CVA23	1,998	2,003	7,995	4,002	2960	739,631
CVA24	1,978	2,008	7,986	3,972	2440	614,327
CVA25	1,970	1,983	8,029	3,907	2265	579,801
CVA26	1,973	1,978	8,003	3,903	1500	384,360
CVA27	1,965	2,005	8,040	3,940	2430	616,779
CVA28	1,963	2,013	7,974	3,952	2560	647,852
CVA29	1,980	1,998	7,993	3,956	2690	679,973
CVA30	1,990	1,960	8,004	3,900	1560	399,959
CVA31	1,990	1,973	8,015	3,926	2420	616,361
CVA32	1,990	1,948	7,989	3,926	2430	618,908
CVA33	1,980	1,958	8,028	3,877	2040	526,202
CVA34	1,983	1,975	7,983	3,916	2700	689,404
CVA35	1,985	1,998	7,974	3,966	2670	673,217
CVA36	1,968	1,965	7,969	3,867	2870	742,154

Tabela 4.11. Corpos de prova de eucalipto citriodora, verdes, família (a)

CP nº	b ₀ (cm)	b ₁ (cm)	ℓ (cm)	A (cm ²)	P _{máx} (daN)	f _c (daN/cm ²)
CVB01	3,018	3,003	12,083	9,063	5525	609,618
CVB02	2,993	3,073	12,020	9,197	6560	713,238
CVB03	3,008	3,148	12,015	9,469	5960	629,410
CVB04	3,155	3,003	12,018	9,474	6190	653,335
CVB05	3,003	3,003	12,063	9,018	5340	592,148
CVB06	3,030	3,013	11,945	9,129	5170	566,303
CVB07	3,015	3,008	11,810	9,069	3740	412,388
CVB08	3,010	3,013	12,020	9,069	6580	725,538
CVB09	3,018	3,000	12,053	9,054	6100	673,735
CVB10	3,030	2,980	11,988	9,029	6050	670,033
CVB11	2,963	3,020	12,018	8,948	5110	571,061
CVB12	3,000	3,043	12,078	9,129	6460	707,635
CVB13	3,035	2,988	12,095	9,069	6070	669,344
CVB14	3,033	3,013	11,900	9,138	5110	559,177
CVB15	3,035	3,003	11,930	9,114	5145	564,510
CVB16	3,015	2,995	12,055	9,030	5440	602,441

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c (daN/cm ²)
CVB17	3,005	3,095	12,030	9,300	6520	701,039
CVB18	3,105	3,030	12,003	9,408	6340	673,884
CVB19	2,990	3,020	11,785	9,030	3460	383,176
CVB20	2,975	3,015	12,048	8,970	6450	719,094
CVB21	3,018	2,983	12,020	9,003	5530	614,261
CVB22	3,015	2,980	12,060	8,985	5640	627,734
CVB23	2,995	3,010	12,018	9,015	5930	657,796
CVB24	3,003	3,003	12,048	9,018	4540	503,437
CVB25	2,993	3,013	11,995	9,018	6830	757,382

Tabela 4.12. Corpos de prova de eucalipto citriodora, verdes, família (b)

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c (daN/cm ²)
CVC01	4,963	4,990	20,150	24,765	17100	690,480
CVC02	4,993	4,950	20,188	24,715	15050	608,933
CVC03	4,938	4,988	20,138	24,631	17450	708,464
CVC04	4,960	4,958	20,138	24,592	15600	634,361
CVC05	4,960	4,960	20,188	24,602	11300	459,320
CVC06	4,928	4,963	20,138	24,458	15750	643,970
CVC07	4,943	4,970	20,150	24,567	16750	681,817
CVC08	4,953	4,973	20,163	24,631	16750	680,030
CVC09	4,953	4,948	20,150	24,507	17250	703,868

Tabela 4.13. Corpos de prova de eucalipto citriodora, verdes, família (c)

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c (daN/cm ²)
CVE01	3,455	3,465	13,980	11,972	8470	707,509
CVE02	3,453	3,455	13,900	11,930	5180	434,195
CVE03	3,478	3,465	13,916	12,051	8250	684,575
CVE04	3,420	3,463	13,951	11,843	5940	501,543
CVE05	3,448	3,473	13,918	11,975	8970	749,067
CVE06	3,478	3,458	13,981	12,027	7450	619,444
CVE07	3,460	3,430	13,938	11,868	8230	693,473
CVE08	3,445	3,458	13,970	11,913	5000	419,716
CVE09	3,433	3,478	13,935	11,940	8500	711,894
CVE10	3,448	3,458	13,926	11,923	8210	688,574
CVE11	3,460	3,458	13,963	11,965	8310	694,544

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c (daN/cm ²)
CVE12	3,460	3,438	13,944	11,895	7955	668,741
CVE13	3,460	3,450	13,946	11,937	5550	464,941
CVE14	3,478	3,448	13,896	11,992	8250	687,950
CVE15	3,445	3,448	13,991	11,878	8100	681,912
CVE16	3,428	3,463	13,946	11,871	7470	629,256

Tabela 4.14. Corpos de prova de eucalipto citriodora, verdes, família (e)

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c (daN/cm ²)
CVF01	6,988	6,954	27,80	48,595	29500	607,064
CVF02	7,072	6,982	27,90	49,377	31000	627,826
CVF03	6,976	6,972	28,05	48,637	31000	637,379
CVF04	6,954	6,970	27,95	48,469	31500	649,895

Tabela 4.15. Corpos de prova de eucalipto citriodora, verdes, família (f)

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c (daN/cm ²)
CVD	15,05	15,10	60,30	227,26	100000	-
CVD'	11,97	11,97	47,95	143,29	86500	603,66
SVD	15,10	15,20	60,25	229,52	61500	267,97

Tabela 4.16. Corpos de prova das famílias (d): eucaliptos citriodora e saligna, verdes.

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c (daN/cm ²)
SVG01	1,935	1,928	2,968	3,731	935	250,625
SVG02	1,900	1,938	2,983	3,682	1225	332,682
SVG03	1,905	1,928	2,970	3,673	1000	272,269
SVG04	1,935	1,900	2,988	3,677	760	260,718
SVG05	1,933	1,890	2,963	3,653	1175	321,621
SVG06	1,905	1,955	2,978	3,724	1475	396,050
SVG07	1,918	1,898	2,948	3,640	1355	372,216
SVG08	1,910	1,933	2,968	3,692	810	219,392
SVG09	1,900	1,918	2,965	3,644	1255	344,383
SVG10	1,943	1,920	2,983	3,731	1020	273,417
SVG11	1,925	1,925	2,985	3,706	655	176,758
SVG12	1,925	1,933	2,960	3,721	1625	436,708

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c (daN/cm ²)
SVG13	1,938	1,940	2,963	3,760	1560	414,925
SVG14	1,903	1,923	2,970	3,659	665	181,720
SVG15	1,925	1,948	2,980	3,750	990	264,007
SVG16	1,925	1,923	2,955	3,702	990	267,439
SVG17	1,915	1,935	2,980	3,706	1135	306,299
SVG18	1,923	1,903	2,970	3,659	530	144,830
SVG19	1,913	1,890	2,963	3,616	1510	417,638
SVG20	1,893	1,940	2,968	3,672	1445	393,474
SVG21	1,943	1,930	2,980	3,750	1650	440,001
SVG22	1,878	1,923	2,973	3,611	1535	425,044
SVG23	1,908	1,925	2,965	3,673	1165	317,188
SVG24	1,913	1,948	2,970	3,727	1555	417,279
SVG25	1,888	1,895	2,950	3,578	1210	338,200
SVG26	1,903	1,885	2,950	3,587	1010	281,560
SVG27	1,950	1,895	2,985	3,695	1435	388,336
SVG28	1,870	1,943	2,950	3,633	1405	386,689
SVG29	1,910	1,915	2,985	3,658	1600	437,439
SVG30	1,933	1,920	2,968	3,711	1470	396,081
SVG31	1,890	1,933	2,978	3,653	1395	381,839
SVG32	1,900	1,918	2,980	3,644	1495	410,241
SVG33	1,935	1,933	2,940	3,740	1620	433,114
SVG34	1,930	1,923	2,978	3,711	1570	423,022
SVG35	1,893	1,928	2,968	3,650	1560	427,432
SVG36	1,875	1,925	2,970	3,609	795	220,260

Tabela 4.17. Corpos de prova extras, de eucalipto saligna, verdes, designado por família (g)

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c (daN/cm ²)
SSA01	1,775	1,814	7,9725	3,219	2250	698,887
SSA02	1,806	1,806	7,944	3,263	2465	755,547
SSA03	1,769	1,795	7,996	3,175	2200	692,934
SSA04	1,793	1,810	7,975	3,244	2135	658,052
SSA05	1,763	1,771	7,974	3,122	1580	506,114
SSA06	1,794	1,811	7,990	3,249	2040	627,812
SSA07	1,804	1,805	7,938	3,256	2485	763,261
SSA08	1,741	1,801	7,986	3,136	1885	601,002
SSA09	1,775	1,800	7,973	3,195	1965	615,023
SSA10	1,775	1,788	7,973	3,173	2085	657,146

CP nº	b_o (cm)	b_l (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c (daN/cm ²)
SSA11	1,783	1,803	7,929	3,213	1530	476,197
SSA12	1,779	1,795	7,964	3,193	2170	679,642
SSA13	1,798	1,801	7,966	3,238	2110	651,688
SSA14	1,755	1,796	7,976	3,152	2245	712,152
SSA15	1,746	1,796	7,954	3,137	2230	710,870
SSA16	1,800	1,813	7,919	3,263	2080	637,548
SSA17	1,801	1,805	7,995	3,251	2255	693,578
SSA18	1,798	1,805	7,974	3,244	2270	699,648
SSA19	1,791	1,794	7,973	3,213	2300	715,830
SSA20	1,793	1,803	8,001	3,231	1690	523,061
SSA21	1,798	1,801	7,975	3,238	2200	679,485
SSA22	1,794	1,796	7,921	3,222	1520	471,753
SSA23	1,720	1,780	7,975	3,062	2070	676,117
SSA24	1,770	1,790	7,965	3,168	2460	776,442
SSA25	1,791	1,794	7,974	3,213	2200	684,707
SSA26	1,808	1,814	7,960	3,278	2050	625,314
SSA27	1,808	1,808	7,956	3,267	2215	677,980
SSA28	1,779	1,800	7,961	3,202	2220	693,371
SSA29	1,780	1,794	7,981	3,193	2225	696,864
SSA30	1,723	1,798	8,009	3,096	1870	603,967

Tabela 4.18. Corpos de prova de eucalipto saligna, secos ao ar, família (a).

CP nº	b_o (cm)	b_l (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c (daN/cm ²)
SSB01	3,003	3,010	11,883	9,038	4810	532,225
SSB02	3,003	3,043	11,884	9,135	5660	619,588
SSB03	2,909	2,998	11,875	8,719	3490	400,276
SSB04	2,973	3,011	11,881	8,951	5480	612,226
SSB05	2,991	3,004	11,873	8,985	6020	670,008
SSB06	2,994	3,029	11,874	9,067	5960	657,306
SSB07	3,009	3,029	11,865	9,113	4780	524,540
SSB08	3,010	3,025	11,880	9,105	6090	668,845
SSB09	3,001	3,029	11,909	9,090	4750	522,550
SSB10	2,955	3,019	11,866	8,920	6130	687,188
SSB11	2,975	2,986	11,843	8,884	5955	670,299
SSB12	2,561	2,574	11,894	6,592	3735	566,594
SSB13	2,538	2,545	11,930	6,458	2350	363,893

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c (daN/cm ²)
SSB14	2,534	2,538	11,865	6,429	3650	567,705
SSB15	2,539	2,571	11,920	6,528	4250	651,066

Tabela 4.19. Corpos de prova de eucalipto saligna, secos ao ar, família (b)

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c (daN/cm ²)
SSC01	4,810	4,905	20,605	23,593	11500	487,432
SSC02	4,790	4,865	20,400	23,303	15150	650,121
SSC03	4,710	4,910	20,610	23,126	12925	558,892
SSC04	4,690	4,905	20,415	23,004	9160	398,184

Tabela 4.20. Corpos de prova de eucalipto saligna, secos ao ar, família (c)

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c (daN/cm ²)
SSE01	3,470	3,520	13,900	12,214	7050	577,188
SSE02	3,485	3,505	14,050	12,215	4720	386,413
SSE03	3,488	3,500	13,925	12,208	4110	336,664
SSE04	3,490	3,495	14,030	12,198	6290	515,677
SSE05	3,415	3,418	13,995	11,672	7130	610,839
SSE06	3,418	3,428	13,918	11,717	5760	491,597
SSE07	3,415	3,415	13,895	11,662	7250	621,665
SSE08	3,408	3,413	13,885	11,632	4670	401,496
SSE09	3,400	3,403	13,965	11,570	6650	574,752
SSE10	3,398	3,418	13,915	11,614	7140	614,756
SSE11	3,388	3,395	13,943	11,502	4380	380,795
SSE12	3,413	3,418	13,915	11,666	5440	466,327
SSE13	3,440	3,465	13,985	11,920	6100	511,762

Tabela 4.21. Corpos de prova de eucalipto saligna, secos ao ar, família (e)

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c (daN/cm ²)
SSF01	5,885	5,891	28,013	34,670	18400	530,718
SSF02	5,876	5,878	27,900	34,538	19850	574,735
SSF03	5,841	5,871	27,988	33,708	17050	505,810
SSF04	6,455	6,969	28,100	44,987	18200	404,444

Tabela 4.22. Corpos de prova de eucalipto saligna, secos ao ar, família (f)

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c (daN/cm ²)
CSA01	2,056	2,060	7,961	4,236	4280	1010,417
CSA02	2,043	2,058	7,923	4,202	4370	1039,871
CSA03	2,059	2,065	7,963	4,251	4280	1006,746
CSA04	2,064	2,064	7,950	4,259	4210	988,480
CSA05	2,041	2,066	7,951	4,218	4220	1000,538
CSA06	2,026	2,051	7,966	4,156	4100	986,444
CSA07	2,030	2,065	8,000	4,192	4270	1018,619
CSA08	2,064	2,076	7,965	4,285	3960	924,184
CSA09	2,038	2,071	8,015	4,220	3940	933,611
CSA10	2,055	2,075	7,456	4,264	4800	1125,671
CSA11	2,061	2,069	7,969	4,264	4570	1071,711
CSA12	2,054	2,055	7,931	4,220	3820	905,115
CSA13	2,035	2,043	7,598	4,156	3270	786,722
CSA14	2,056	2,063	7,968	4,241	4080	962,034
CSA15	2,020	2,035	7,849	4,111	4150	1009,560
CSA16	2,038	2,050	7,926	4,177	3820	914,559
CSA17	2,050	2,056	7,971	4,215	4570	1084,143
CSA18	2,048	2,056	7,241	4,210	4590	1090,217
CSA19	2,020	2,038	7,966	4,116	4600	1117,658
CSA20	2,051	2,064	7,963	4,233	3400	803,162
CSA21	2,048	2,054	7,776	4,205	4370	1039,226
CSA22	2,021	2,059	7,969	4,161	4210	1011,716
CSA23	2,034	2,049	8,005	4,167	4140	993,605
CSA24	2,056	2,061	7,975	4,238	3680	868,243
CSA25	2,025	2,040	7,960	4,131	3250	786,734
CSA26	2,055	2,068	7,928	4,249	4060	955,584
CSA27	2,055	2,059	7,981	4,231	3150	744,552
CSA28	2,045	2,069	7,973	4,231	3700	874,582
CSA29	2,066	2,068	7,923	4,272	4820	1128,285
CSA30	2,053	2,073	7,964	4,254	4430	1041,420
CSA31	2,060	2,060	7,990	4,244	4360	1027,430
CSA32	2,054	2,063	7,570	4,236	4060	958,483
CSA33	2,064	2,066	7,965	4,264	3410	799,677
CSA34	2,060	2,070	7,961	4,264	4500	1055,298
CSA35	2,060	2,065	7,963	4,254	4050	952,068

Tabela 4.23. Corpos de prova de eucalipto citriodora, secos ao ar, família (a).

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c (daN/cm ²)
CSB01	2,965	2,990	12,120	8,865	8800	992,629
CSB02	2,833	2,958	12,105	8,380	7750	924,819
CSB03	2,960	3,035	12,130	8,984	7260	808,139
CSB04	3,020	3,045	12,108	9,196	6590	716,624
CSB05	3,043	3,055	12,148	9,296	5940	638,959
CSB06	2,988	3,000	12,138	8,964	7460	832,218
CSB07	2,973	3,048	12,115	9,062	7950	877,318
CSB08	3,043	3,065	12,128	9,327	5570	597,204
CSB09	3,055	3,058	12,120	9,342	6580	704,332
CSB10	2,980	3,033	12,178	9,038	8340	922,736
CSB11	3,040	3,053	12,138	9,281	6690	790,818
CSB12	2,965	2,985	12,135	8,851	6310	712,952
CSB13	3,005	3,043	12,148	9,144	5560	608,035
CSB14	3,040	3,050	12,150	9,272	5580	601,812
CSB15	3,013	3,033	12,138	9,138	6800	744,110
CSB16	2,880	2,988	12,118	8,605	6400	734,716
CSB17	3,000	3,030	12,128	9,090	5750	632,563
CSB18	3,010	3,038	12,130	9,144	4760	520,538
CSB19	3,035	3,040	12,133	9,226	6870	744,602
CSB20	2,943	3,018	12,133	8,882	6800	765,596

Tabela 4.24. Corpos de prova de eucalipto citriodora, secos ao ar, família (b).

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c (daN/cm ²)
CSC01	4,950	4,880	19,913	24,651	18650	756,562
CSC02	4,933	4,983	19,913	24,780	16850	679,971
CSC03	4,968	4,955	19,925	24,616	18325	744,421
CSC04	4,975	4,998	19,963	24,865	16925	680,674
CSC05	4,945	4,965	19,925	24,552	12400	505,052
CSC06	4,965	5,013	19,950	24,890	18350	737,257
CSC07	4,955	5,000	19,950	24,775	15900	641,776
CSC08	4,948	4,960	19,875	24,542	16000	651,941
CSC09	4,955	5,150	19,925	25,518	17650	691,662

Tabela 4.25. Corpos de prova de eucalipto citriodora, secos ao ar, família (c).

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c (daN/cm ²)
CSE01	3,485	3,490	14,050	12,163	6910	568,133
CSE02	3,445	3,455	13,985	11,902	10350	869,567
CSE03	3,495	3,495	13,995	12,215	11400	933,277
CSE04	3,500	3,505	14,003	12,268	8900	725,494
CSE05	3,500	3,503	14,030	12,261	8000	652,502
CSE06	3,480	3,493	13,935	12,156	10550	867,910
CSE07	3,500	3,508	14,080	12,278	9340	760,710
CSE08	3,503	3,518	13,998	12,324	10650	864,199
CSE09	3,493	3,498	14,013	12,219	8850	724,311
CSE10	3,505	3,510	14,010	12,303	9500	772,198
CSE11	3,488	3,493	13,988	12,184	9600	787,945
CSE12	3,503	3,508	14,013	12,289	9550	777,148
CSE13	3,490	3,520	14,005	12,285	9750	793,664
CSE14	3,470	3,495	13,980	12,128	7350	606,053
CSE15	3,490	3,530	14,020	12,320	11250	913,172
CSE16	3,495	3,523	14,085	12,313	10950	889,312

Tabela 4.26.a. Corpos de prova de eucalipto citriodora, secos ao ar, família (e), primeiro lote.

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c (daN/cm ²)
CSE17	3,516	3,528	13,851	12,404	9000	725,597
CSE18	3,529	3,530	13,851	12,456	10550	846,948
CSE19	3,315	3,515	13,851	11,652	7800	669,400
CSE20	3,329	3,523	13,828	11,726	11660	994,412
CSE21	3,329	3,525	13,829	11,734	10500	894,847
CSE22	3,519	3,523	13,824	12,395	11100	895,537
CSE23	3,528	3,529	13,884	12,448	11600	931,902
CSE24	3,513	3,526	13,851	12,386	12000	968,839
CSE25	3,533	3,533	13,841	12,479	10200	817,402
CSE26	3,519	3,515	13,840	12,346	10800	874,746
CSE27	3,518	3,529	13,850	12,412	8750	704,941
CSE28	3,525	3,525	13,840	12,426	10250	824,908
CSE29	3,533	3,536	13,855	12,492	9100	728,478
CSE30	3,519	3,529	13,843	12,417	10150	817,442
CSE31	3,310	3,469	13,876	11,482	9100	792,575
CSE32	3,518	3,520	13,896	12,382	10500	848,033

Tabela 4.26.b. Corpos de prova de eucalipto citriodora, secos ao ar, família (e), segundo lote.

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c (daN/cm ²)
CSF01	6,956	6,990	27,775	48,624	34300	705,410
CSF02	6,803	6,885	27,688	46,835	33600	717,409
CSF03	6,900	6,928	27,888	47,800	32600	682,012
CSF04	6,933	6,946	27,813	48,155	32300	670,752

Tabela 4.27. Corpos de prova de eucalipto citriodora, secos ao ar, família (f).

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c (daN/cm ²)
PSA01	1,960	1,973	7,928	3,866	2210	571,635
PSA02	1,943	1,948	8,055	3,783	1790	473,167
PSA03	1,975	1,988	8,058	3,925	2240	570,665
PSA04	1,953	1,975	7,934	3,856	2490	645,715
PSA05	1,945	1,963	8,008	3,817	2350	615,657
PSA06	1,938	1,963	7,923	3,802	2330	612,780
PSA07	1,948	1,988	7,939	3,871	2290	591,631
PSA08	1,943	1,973	8,000	3,832	2410	628,983
PSA09	1,963	1,965	7,924	3,856	2310	599,018
PSA10	1,920	1,940	8,084	3,725	2430	652,384
PSA11	1,880	1,963	7,929	3,690	2250	609,839
PSA12	1,958	1,965	8,080	3,846	2370	616,147
PSA13	1,945	1,963	7,941	3,817	2140	560,641
PSA14	1,918	1,963	7,990	3,763	2400	637,773
PSA15	1,898	1,940	8,070	3,681	2410	654,687
PSA16	1,940	1,960	7,949	3,802	2450	644,330
PSA17	1,900	1,973	8,003	3,748	2220	592,355
PSA18	1,898	1,953	8,066	3,705	1980	534,432
PSA19	1,893	1,970	7,980	3,728	2440	654,467
PSA20	1,943	1,970	7,985	3,827	2360	616,715
PSA21	1,948	1,970	7,990	3,837	2200	573,428
PSA22	1,913	1,955	7,984	3,739	2450	655,266
PSA23	1,925	1,963	8,009	3,778	2260	598,230
PSA24	1,908	1,970	7,976	3,758	2200	585,453
PSA25	1,938	1,953	7,994	3,783	2590	684,647
PSA26	1,915	1,978	8,011	3,787	2480	654,887
PSA27	1,948	1,975	7,946	3,846	2230	579,776
PSA28	1,935	1,970	7,984	3,812	2350	616,482
PSA29	1,920	1,968	8,058	3,778	2040	540,025
PSA30	1,958	1,970	8,041	3,856	2260	586,058

CP nº	b_o (cm)	b_l (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c (daN/cm ²)
PSA31	1,908	1,958	7,985	3,734	2050	549,019
PSA32	1,915	1,935	8,006	3,706	2280	615,297
PSA33	1,923	1,958	7,988	3,763	2080	552,707
PSA34	1,910	1,930	8,004	3,686	2180	591,379
PSA35	1,903	1,940	8,016	3,691	2140	579,812
PSA36	1,913	1,918	8,053	3,667	2170	591,729

Tabela 4.28. Corpos de prova de peroba rosa, secos ao ar, família (a).

CP nº	b_o (cm)	b_l (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c (daN/cm ²)
PSE01	3,356	3,459	13,981	11,608	7300	628,856
PSE02	3,440	3,463	14,001	11,911	7310	613,718
PSE03	3,422	3,618	14,000	12,378	6850	553,401
PSE04	3,459	3,461	13,939	11,972	7530	628,989
PSE05	3,346	3,469	13,963	11,607	6500	559,995
PSE06	3,398	3,506	13,905	11,911	7720	648,143
PSE07	3,423	3,433	14,004	11,748	6800	578,835
PSE08	3,453	3,478	13,901	12,006	7240	603,028
PSE09	3,428	3,430	13,951	11,756	4250	361,508
PSE10	3,388	3,393	13,951	11,492	5370	467,278
PSE11	3,425	3,579	13,950	12,259	7420	605,281
PSE12	3,355	3,395	13,983	11,390	6800	597,003
PSE13	3,453	3,455	13,943	11,928	6650	557,494
PSE14	3,381	3,427	13,966	11,587	6880	593,784
PSE15	3,464	3,498	13,901	12,119	7860	648,578
PSE16	3,457	3,485	13,886	12,047	7350	610,131

Tabela 4.29. Corpos de prova de peroba rosa, secos ao ar, família (e)

CP nº	b_o (cm)	b_l (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c (daN/cm ²)
PSF01	7,008	7,169	27,70	50,244	30500	607,038
PSF02	7,143	7,166	28,20	51,182	31250	610,566
PSF03	6,959	7,018	28,15	48,842	27000	552,803
PSF04	6,962	6,977	28,15	48,570	29250	602,1576

Tabela 4.30. Corpos de prova de peroba rosa, secos ao ar, família (f)

4.4. EXPERIMENTAÇÃO COMPLEMENTAR

Dados adicionais foram obtidos de vigas disponíveis na oficina de marcenaria do Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira, sendo 5 amostras de Peroba rosa, 1 amostra de jatobá, 1 amostra de garapa, 1 amostra de Eucalipto tereticornis e 1 amostra de Pinus elliottii, de onde se retiraram corpos de prova de $2,0 \times 2,0 \times 3,0 \text{ cm}^3$ (um); $2,0 \times 2,0 \times 8,0 \text{ cm}^3$ (um); $3,0 \times 3,0 \times 12,0 \text{ cm}^3$ (um), e $5,0 \times 5,0 \times 20,0 \text{ cm}^3$ (um) por amostra.

Os resultados médios dos ensaios estão nas tabelas 4.31 a 4.35 a seguir:

b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	f_{cm} (daN/cm ²)
2,0	2,0	3,0	596,121
2,0	2,0	8,0	576,167
3,0	3,0	12,0	599,476
4,0	4,0	16,0	619,754
5,0	5,0	20,0	614,398

Tabela 4.31. Valores médios de ensaio, Peroba rosa, secos ao ar, (N=5)

b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	f_c (daN/cm ²)
2,0	2,0	3,0	868,83
2,0	2,0	8,0	766,39
3,0	3,0	12,0	825,96
4,0	4,0	16,0	874,81
5,0	5,0	20,0	960,24

Tabela 4.32. Valores de ensaio, Jatobá, secos ao ar (N=1)

b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	f_c (daN/cm ²)
2,0	2,0	3,0	642,95
2,0	2,0	8,0	650,60
3,0	3,0	12,0	630,04
4,0	4,0	16,0	599,27
5,0	5,0	20,0	635,48

Tabela 4.33. Valores de ensaio, garapa, secos ao ar (N=1)

b_o (cm)	b_l (cm)	l (cm)	f_c (daN/cm ²)
2,0	2,0	3,0	560,30
2,0	2,0	8,0	600,93
3,0	3,0	12,0	625,83
4,0	4,0	16,0	659,34
5,0	5,0	20,0	621,55

Tabela 4.34. Valores de ensaio, Eucalipto tereticornis, secos ao ar (N=1)

b_o (cm)	b_l (cm)	l (cm)	f_c (daN/cm ²)
2,0	2,0	3,0	263,88
2,0	2,0	8,0	374,86
3,0	3,0	12,0	278,61
4,0	4,0	16,0	197,31
5,0	5,0	20,0	229,17

Tabela 4.35. Valores de ensaio, Pinus elliottii, secos ao ar (N=1)

4.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.5.1. Análise de variância - teste Fischer

A análise de variância foi realizada tendo-se em vista a verificação de generalidade da amostra, isto é, se todos os corpos de prova, por teor de umidade e por espécie, pertencem a um mesmo universo.

Utilizando os valores apresentados nas tabelas 4.1 a 4.5, para os corpos de prova provenientes das famílias anteriores citadas (figuras 4.3 e 4.4), confeccionam-se as tabelas 4.36 a 4.40 a seguir:

FAMÍLIA	f_{cm} (daN/cm ²)	S_l (daN/cm ²)	S_i^2	F_i	$F_{crít}$
a	618,3	100,5	10099,2	1,682	3,06
b	622,3	91,8	8421,4	1,403	3,12
c	645,7	77,5	6004,1	-	-
e	627,3	108,1	11690,2	1,947	3,22
f	630,5	18,1	326,6	18,384	8,85

Tabela 4.36. Valores para o teste "F", Eucalipto citriodora, saturado, onde:

S : desvio padrão (tabela 4.1)

S²: variância

F_i: valor calculado de F, conforme:

$$F_1 = \frac{S_c^2}{S_i^2} > 1,0 \text{ ou } F_2 = \frac{S_i^2}{S_c^2} > 1,0$$

F_{crít}: valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

FAMÍLIA	f _{cm} (daN/cm ²)	S _i (daN/cm ²)	S _i ²	F _i	F _{crít}
a	327,4	84,2	7092,3	1,115	2,22
b	317,7	94,6	8958,1	1,133	3,12
c	325,9	88,9	7909,3	-	-
e	343,4	91,3	8330,4	1,053	3,22
f	334,8	94,0	8828,7	1,116	4,07

Tabela 4.37. Valores para teste "F", Eucalipto saligna, verde.

FAMÍLIA	f _{cm} (daN/cm ²)	S _i (daN/cm ²)	S _i ²	F _i	F _{crít}
a	971,9	101,6	10312,8	1,787	3,06
b	740,0	124,4	15464,9	2,679	3,16
c	676,6	76,0	5772,2	-	-
e	807,6	102,812	10570,4	1,831	3,08
f	693,9	21,3	454,1	12,711	8,85

Tabela 4.38. Valores para teste "F", Eucalipto citriodora, seco ao ar.

FAMÍLIA	f _{cm} (daN/cm ²)	S _i (daN/cm ²)	S _i ²	F _i	F _{crít}
a	655,4	77,5	5999,6	1,905	2,28
b	581,0	99,0	9803,6	1,166	2,70
c	523,7	106,9	11430,2	-	-
e	499,2	98,7	9739,7	1,174	2,85
f	503,9	72,2	5210,7	2,194	8,85

Tabela 4.39. Valores o teste "F", Eucalipto saligna, seco ao ar.

Com estes parâmetros avaliados, pode-se aceitar a hipótese formulada (os corpos de prova pertencem a um mesmo universo).

4.5.2. Avaliação da Influência do Tamanho do Corpo de Prova na Resistência à compressão paralela às fibras.

Tendo sido ensaiados corpos de prova em diversos teores de umidade e espécies, em número igualmente variável em cada tamanho considerado, optou-se pelo agrupamento dos resultados, em valores médios, reportados ao corpo de prova de referência, 5,0cm x 5,0cm x 20,0cm, cujo limite de resistência, na média do grupo, por espécie e por teor de umidade, assume o valor unitário. Desta maneira estão confeccionadas as tabelas 4.40 a 4.52 a seguir.

4.5.2.1. Madeira Verde

U (%)	A (cm ²)	f _{cm} (daN/cm ²)	f _{cm,5} /f _{cm}
30	4,0	618	1,045
30	9,0	622	1,039
30	12,25	627	1,030
30	25,0	646	1,000
30	49,0	631	1,024
30	144,0	601	1,075

Tabela 4.40. Valores para avaliação, corpos de prova proporcionais de Eucalipto citriodora, verdes, onde:

U (%) - teor de umidade de condicionamento

A (cm²) - área da seção transversal

f_{cm} - médias de limites de resistência de cada grupo

f_{cm,5}/f_{cm} - valores relativos dos limites de resistência, de cada grupo para o grupo de cp de referência

U (%)	A (cm ²)	f _{cm} (daN/cm ²)	f _{cm,5} /f _{cm}
30	4,0	332	0,982
30	9,0	318	1,025
30	12,25	343	0,950
30	25,0	326	1,000
30	49,0	335	0,976
30	225,0	273	1,194

Tabela 4.41. Valores para avaliação, corpos de prova proporcionais de Eucalipto saligna, verdes.

U(%)	A (cm ²)	VRM
30	4,0	0,982
30	9,0	1,032
30	12,25	0,990
30	25,0	1,000
30	49,0	1,024
30	144,0	1,075
30	225,0	1,194

Tabela 4.42. Valores relativos médios de avaliação, para as espécies relatadas acima (tabelas 4.40 e 4.41), verdes.

A análise de regressão aplicada aos valores da tabela 4.43 apresentou a equação:

$$\text{VRM} = 0,0009A + 0,9759 \quad (4.1)$$

cujo coeficiente de correlação tem o valor $r^2 = 0,9630$, bastante satisfatório, desconsiderado o par de valores (9,0; 1,032). O gráfico mostrando os valores e a equação obtida é a figura 4.5.

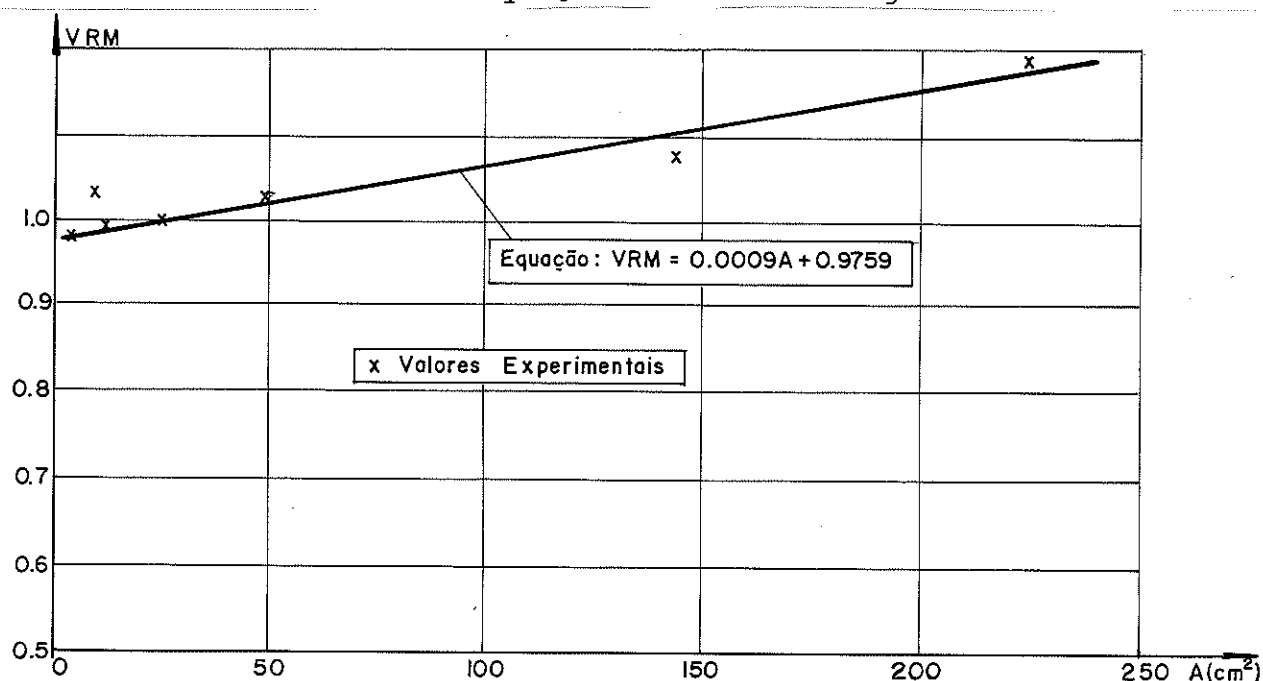


Fig. 4.5. Gráfico com os valores da tabela 4.42 e a equação (4.1).

Comparativamente, são apresentados os valores da tabela 4.43 contra os valores relativos médios obtidos da expressão 4.1 (VRE):

A (cm ²)	VRM	VRE	Δ (%)
4,0	0,982	0,979	- 0,305
12,25	0,990	0,987	- 0,303
25,0	1,000	0,998	- 0,200
49,0	1,024	1,020	- 0,391
144,0	1,075	1,104	+ 2,698
225,0	1,194	1,177	- 1,424

Tabela 4.43. Comparação entre os valores apresentados pela figura 4.5, onde:

$$\Delta = \left(\frac{VRE - VRM}{VRM} \right) 100$$

4.5.2.2. Madeira seca ao ar

Reunindo todos os corpos de prova coletados, são apresentados os valores para madeira seca ao ar, tabelas 4.40 e 4.50.

A (cm ²)	f _{cm} (daN/cm ²)	f _{cm,5} /f _{cm}
4,0	971,9	0,696
9,0	740,0	0,914
12,25	807,5	0,838
25,0	676,6	1,000
49,0	693,9	0,975

Tabela 4.44. Valores para avaliação, corpos de prova proporcionais de Eucalipto citriodora

A (cm ²)	f _{cm} (daN/cm ²)	f _{cm,5} /f _{cm}
4,0	655,4	0,799
9,0	581,0	0,901
12,25	499,2	1,049
25,0	523,7	1,000
36,0	503,9	1,039

Tabela 4.45. Valores para avaliação, corpos de prova proporcionais de Eucalipto saligna.

A (cm ²)	f _{cm} (daN/cm ²)	f _{cm,5} /f _{cm}
4,0	650,6	0,977
9,0	630,0	1,009
16,0	599,3	1,060
25,0	635,5	1,000

Tabela 4.46. Valores para avaliação, corpos de prova proporcionais de Garapa

A (cm ²)	f _{cm} (daN/cm ²)	f _{cm,5} /f _{cm}
4,0	597,97	1,027
9,0	599,5	1,025
12,25	578,5	1,062
16,0	619,8	0,991
25,0	614,4	1,000
49,0	593,2	1,036

Tabela 4.47. Valores para avaliação, corpos de prova proporcionais de Peroba Rosa

A (cm ²)	f _{cm} (daN/cm ²)	f _{cm,5} /f _{cm}
4,0	766,4	1,253
9,0	826,0	1,163
16,0	874,8	1,098
25,0	960,2	1,000

Tabela 4.48. Valores para avaliação, corpos de prova proporcionais de Jatobá

A (cm ²)	f _{cm} (daN/cm ²)	f _{cm,5} /f _{cm}
4,0	374,9	0,611
9,0	268,6	0,853
16,0	197,3	1,161
25,0	229,2	1,000

Tabela 4.49. Valores para avaliação, corpos de prova proporcionais de Pinus elliottii

A (cm ²)	f _{cm} (daN/cm ²)	f _{cm,5} /f _{cm}
4,0	600,9	1,034
9,0	625,8	0,993
16,0	659,3	0,943
25,0	621,5	1,000

Tabela 4.50. Valores para avaliação, corpos de prova proporcionais de Eucalipto tereticornis

A (cm ²)	VRM
4,0	0,8574
9,0	0,9304
12,25	0,9417
16,0	1,0241
25,0	1,0000
36,0	1,0390
49,0	1,0055

Tabela 4.51. Valores relativos médios dos ensaios de corpos de prova proporcionais de madeira seca ao ar.

A análise de regressão aplicada aos valores da tabela 4.51, excluídos os pares (16; 1,0241) e (36; 1,0390), revela as equações:

$$\text{VRM} = 0,0028A + 0,8991 \quad (4.2)$$

$$\text{VRM} = 0,1400 \log A + 0,7864 \quad (4.3)$$

cujos coeficientes de correlação são, respectivamente,

$$r^2 = 0,6901 \quad \text{e} \quad r^2 = 0,9368$$

Os gráficos mostrando os valores e as equações obtidas são as figuras 4.6 e 4.7.

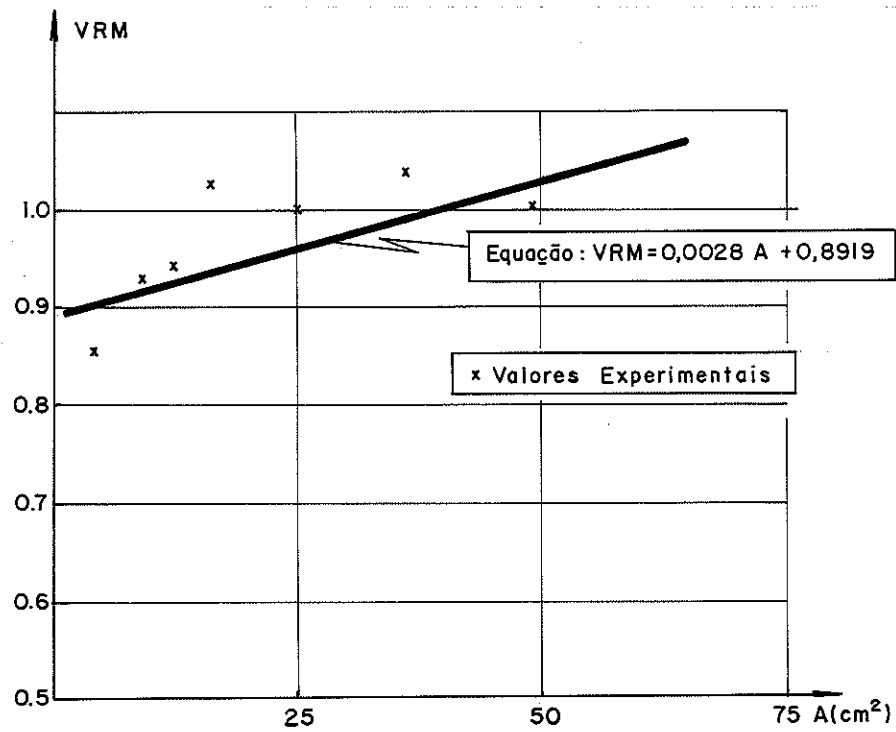


Fig. 4.6. Valores da análise de regressão, equação (4.2)

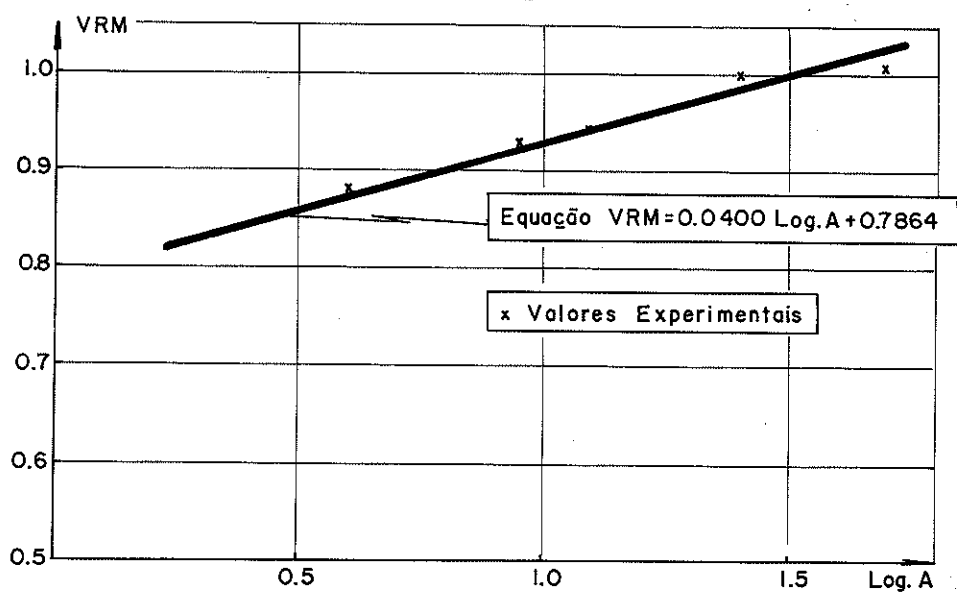


Fig. 4.7. Valores da análise de regressão, equação (4.3)

Comparativamente, são apresentados os valores relativos médios, os valores calculados pelas equações (4.2) e (4.3) e os desvios percentuais ocorrentes.

A (cm ²)	VRM	VRE (4.2)	Δ (%)	VRE (4.3)	Δ (%)
4,0	0,8574	0,9030	+ 5,32	0,8708	+ 1,56
9,0	0,9304	0,9169	- 1,46	0,9201	- 1,11
12,25	0,9417	0,9259	- 1,68	0,9388	- 0,31
25,0	1,0000	0,9613	- 3,87	0,9822	- 1,78
49,0	1,0055	1,0280	+ 2,23	1,0231	+ 1,75

Tabela. 4.52. Comparação entre os valores apresentados nas figuras 4.5 e 4.6.

Diante dos parâmetros de análise obtidos, optou-se pela validade da equação (4.3) para descrever a variação de VRM com a variação do tamanho da seção transversal, para a madeira em umidade de equilíbrio ao ar.

4.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em se tratando da análise de valores relativos, torna-se possível considerar sua variação como uma parcela de um coeficiente γ_m de ponderação das resistências, conforme a NBR 8681/1984 da ABNT [53]. "(...) γ_m (é) o coeficiente de ponderação das resistências, sendo:

$$\gamma_m = \gamma_{m1} \cdot \gamma_{m2} \cdot \gamma_{m3}$$

onde (...), γ_{m2} considera as diferenças entre a resistência efetiva do material da estrutura e a resistência medida convencionalmente em corpos de prova padronizados (...)"

Neste caso, admite-se a validade de se adotar a equação (4.1) para exprimir γ_{m2} , madeira verde, e a equação (4.3) para expressar os valores para madeira seca ao ar.

5. INVESTIGAÇÃO SOBRE A VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA E DA ELASTICIDADE DA MADEIRA COM O AUMENTO DO COMPRIMENTO DOS CORPOS DE PROVA

5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A madeira solicitada à compressão paralela às fibras tem comportamento variável com o comprimento da peça na direção de solicitação, especialmente no que se refere à sua resistência mecânica. Fenômenos relacionados à instabilidade da peça diminuem sensivelmente a resistência. A indicação da NBR 7190/82, "Cálculo e execução de estruturas de madeira", está na figura 5.1.

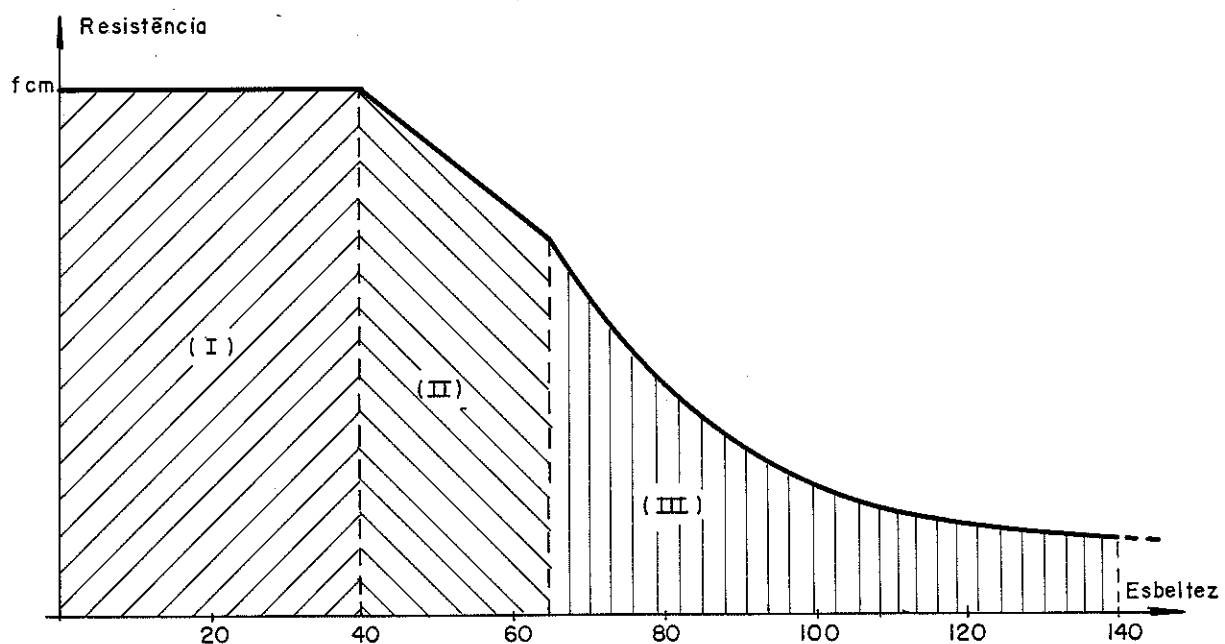


Fig. 5.1. Variação da resistência com a esbeltez, segundo a NBR 7190/82, sem coeficientes de segurança, onde:
 (I) peças curtas
 (II) peças intermediárias
 (III) peças longas

O módulo de elasticidade da madeira, na compressão paralela às fibras, varia ao longo da árvore e é objeto deste estudo detectar algumas flutuações ocorrentes nesta propriedade.

5.2. MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS

Tomando-se uma seção transversal básica em 5cm x 5cm (25cm²),

para todos os ensaios, realizaram-se duas séries de experimentos, uma delas com corpos de prova extraídos de pedaços de vigas de um mesmo lote (figura 5.2), outra com três corpos de prova de três vigas (um de cada). Todos os ensaios foram realizados em umidade de equilíbrio ao ar.

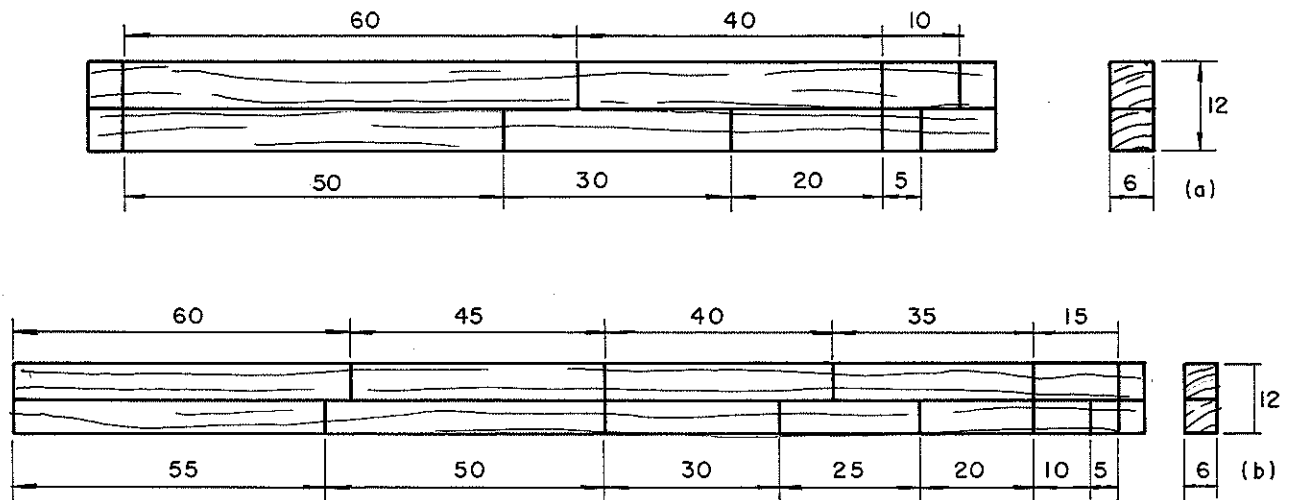


Fig. 5.2. Obtenção dos corpos de prova; (a) vigas com 1,20m disponíveis, (b) vigas com 2,00m disponíveis (dimensões: cm)

Os comprimentos variaram de 60cm até 10cm para a primeira série (ensaios de resistência). Para os ensaios de elasticidade, os corpos de prova foram tomados inicialmente com 60cm, ensaiados, reduzidos de 2,5cm em cada extremidade, novamente ensaiados, e assim, sucessivamente, até atingir 10cm de comprimento, ensaiados e rompidos (figura 5.3).

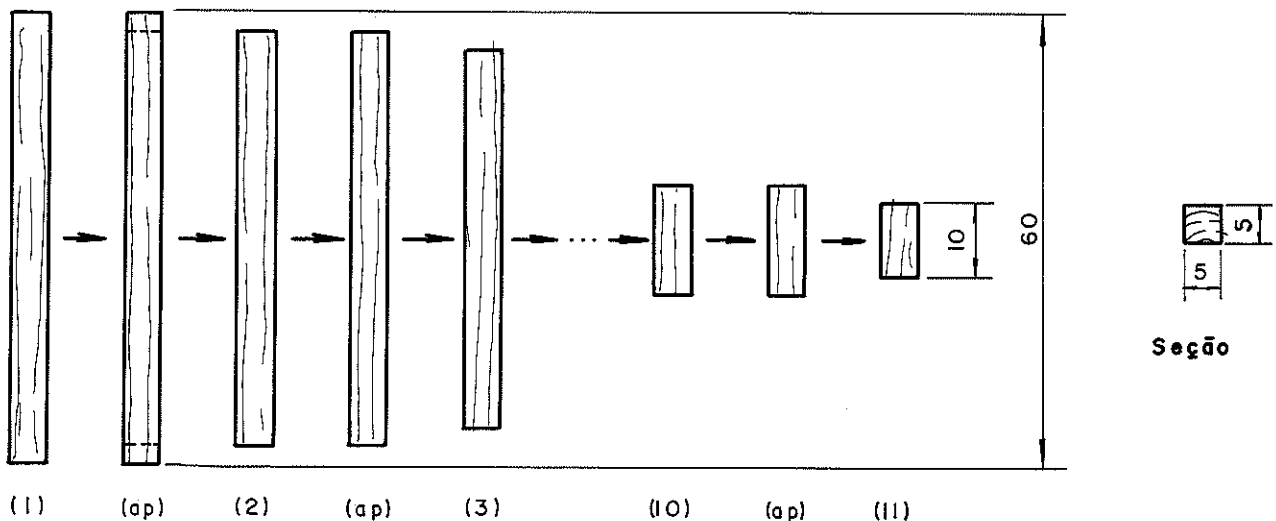


Fig. 5.3. Produção dos corpos de prova, onde: (1) número do ensaio; (ap) corte e aparelhamento das extremidades (dimensões: cm).

Os ensaios de elasticidade foram conduzidos até uma carga de 50.000N, em corpos de prova de Maçaranduba, sendo as deformações avaliadas com extensômetros elétricos "KYOWA", posicionados na seção transversal central (metade do comprimento), instalados em duas faces opostas, três em cada face, afastados de 2,0cm entre si (figura 5.4). Seu "fator gage" é 1,91.

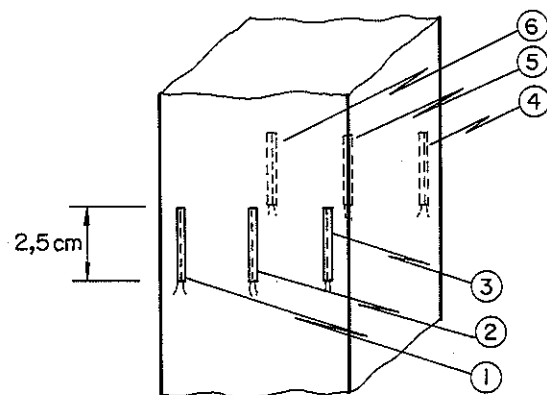


Fig. 5.4. Instalação dos extensômetros elétricos nos corpos de prova

O equipamento utilizado para leitura das deformações e o processamento destes ensaios foi o sistema HP9825T, do Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira.

5.3. RESULTADOS DOS ENSAIOS

5.3.1. Ensaio para Limite de Resistência

As tabelas 5.1 a 5.7 apresentam os valores obtidos nos testes realizados.

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c ($\frac{daN}{cm^2}$)	$\lambda = l/i$
V1C60	5,016	5,025	60,55	25,21	7700	305,49	41,82
V1C50	5,005	5,014	50,20	25,10	8050	320,78	34,74
V1C40	4,986	5,015	40,40	25,00	8500	339,94	28,07
V1C30	5,003	5,008	29,40	25,06	8950	357,21	20,36
V1C20	4,990	5,016	20,025	25,03	8960	357,97	13,90
V1C10	5,05	5,10	10,05	25,76	9700	376,63	6,89
V1C05	5,00	5,05	4,95	25,25	10600	419,80	3,43

Tabela 5.1. Valores de ensaio, Castanheira, viga 1, umidade de 13,3%

CP nº	b_o (cm)	b_l (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c ($\frac{daN}{cm^2}$)	$\lambda = l/i$
V2C60	5,013	5,024	60,25	25,185	8420	334,322	41,63
V2C50	5,006	5,023	50,10	25,145	8400	334,061	34,67
V2C40	5,038	5,064	40,35	25,512	8770	343,754	27,74
V2C30	4,986	5,000	30,10	24,930	8070	323,706	20,91
V2C20	4,993	4,998	20,10	24,955	8310	332,999	13,95
V2C10	5,035	5,065	9,863	25,523	9300	364,384	6,79
V2C05	4,978	4,983	4,918	24,805	10000	403,138	3,42

Tabela 5.2. Valores de ensaio, Castanheira, viga 2, umidade de 14,8%.

CP nº	b_o (cm)	b_l (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c ($\frac{daN}{cm^2}$)	$\lambda = l/i$
V3C60	5,103	5,160	60,25	26,331	7590	288,248	40,90
V3C50	5,110	5,165	50,425	26,393	7575	287,006	34,18
V3C40	5,140	5,153	40,325	26,486	6290	237,480	27,18
V3C30	5,113	5,115	30,225	26,153	7750	296,333	20,48
V3C20	5,078	5,100	20,15	25,898	8385	323,773	13,75
V3C10	5,068	5,080	10,05	25,745	8425	327,242	6,87
V3C05	5,090	5,090	4,948	25,908	8425	325,188	3,37

Tabela 5.3. Valores de ensaio, Castanheira, viga 3, umidade de 12,7%

CP nº	b_o (cm)	b_l (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c ($\frac{daN}{cm^2}$)	$\lambda = l/i$
V4C60	5,025	5,088	60,175	25,567	5200	203,386	41,48
V4C50	5,095	5,158	50,325	26,280	6525	248,288	34,22
V4C40	5,078	5,145	40,40	26,126	7810	298,932	27,56
V4C30	5,083	5,138	30,375	26,116	7670	293,685	20,70
V4C20	5,098	5,115	20,30	26,076	7440	285,317	13,79
V4C10	5,110	5,160	10,10	26,368	7930	300,748	6,85
V4C05	5,123	5,173	5,045	26,501	7960	300,363	3,41

Tabela 5.4. Valores de ensaio, Castanheira, viga 4, umidade de 14,1%

CP nº	b_o (cm)	b_l (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c ($\frac{daN}{cm^2}$)	$\lambda = l/i$
P60	5,05	5,05	60,30	25,503	12825	502,89	41,36
P55	5,00	5,10	55,20	25,500	12650	496,08	38,24
P50	5,05	5,10	50,20	25,755	14280	554,46	34,44
P45	5,05	5,10	45,10	25,755	13550	526,11	30,94
P40	5,00	5,05	40,20	25,250	14050	556,44	27,85
P35	5,05	5,10	35,20	25,775	13050	506,70	24,15
P30	5,05	5,05	30,20	25,503	14550	570,53	20,72
P25	5,05	5,08	25,20	25,629	14300	557,97	17,29
P20	5,02	5,10	20,10	25,602	14800	578,08	13,87
P15	5,02	5,04	15,10	25,276	14700	581,59	10,42
P15	5,03	5,08	15,00	25,527	16000	626,78	10,33
P10	5,01	5,03	10,20	25,200	16250	644,83	7,05

Tabela 5.5. Valores de ensaio; Peroba Rosa, umidade 11,1%

CP nº	b_o (cm)	b_l (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c ($\frac{daN}{cm^2}$)	$\lambda = l/i$
D55	5,105	5,125	55,33	26,163	8150	311,51	37,55
D50	5,125	5,175	50,40	26,522	8000	301,64	34,07
D45	5,138	5,140	45,30	26,409	7850	297,24	30,54
D40	5,130	5,165	40,24	26,496	7120	268,72	27,17
D35	5,133	5,160	35,19	26,486	8300	313,37	23,75
D30	5,140	5,170	30,25	26,574	9596	361,10	20,39
D25	5,160	5,170	25,30	26,677	9464	354,74	16,98
D20	5,158	5,163	20,05	26,631	9265	347,90	13,47
D15	5,115	5,175	15,18	26,470	9265	350,02	10,28
D10	5,145	5,175	10,24	26,625	8750	328,63	6,90

Tabela 5.6. Valores de ensaio, Cambará, umidade de 15,75%

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c ($\frac{daN}{cm^2}$)	$\lambda = l/i$
E55	4,925	5,005	55,13	24,650	10450	423,94	38,78
E50	5,035	5,040	50,34	25,376	13900	547,75	34,63
E45	5,018	5,025	45,30	25,215	13775	546,29	31,27
E40	5,010	5,028	40,08	25,190	12300	488,28	27,71
E35	5,028	5,040	35,10	25,341	14175	559,37	24,18
E30	5,015	5,023	30,23	25,190	14427	572,72	20,88
E25	5,020	5,033	25,20	25,266	13633	539,57	17,39
E20	5,005	5,020	20,30	25,125	12574	500,41	14,05
E15	5,010	5,013	15,13	25,115	12144	483,52	10,46
E10	5,023	5,025	10,10	25,241	14200	562,59	6,96

Tabela 5.7. Valores de ensaio, Eucalipto tereticornis, umida de de 11,0%

5.3.2. Ensaio para m3dulos de elasticidade

As tabelas 5.8 a 5.10 apresentam os valores dos testes, de acordo com a metodologia descrita em 5.2.

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$ ($\times 10^{-6}$)	E ($\frac{daN}{cm^2}$)
A60	4,920	4,956	59,113	24,384	5000	1859,92	110476
A55	4,951	4,959	54,900	24,552	5000	1837,91	111802
A50	4,950	4,963	49,925	24,564	5000	1815,34	110764
A45	4,946	4,980	44,588	24,629	5000	1870,04	109021
A40	4,940	4,968	39,875	24,542	5000	1888,35	108009
A35	4,929	4,975	34,700	24,522	5000	1863,00	110702
A30	4,907	4,948	29,938	24,280	5000	1842,14	111949
A25	4,913	4,956	24,988	24,349	5000	1844,31	111519
A20	4,924	4,954	20,075	24,393	5000	1815,72	112920
A15	4,913	4,951	15,080	24,324	5000	1726,12	119126
A10	4,917	4,955	10,175	24,364	17200	3698,25*	115808

Tabela 5.8. Valores de ensaio, Maçaranduba, peçã A, umidade de 14,0%

(*) M3ximo valor computado elasticamente

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$ ($\times 10^{-6}$)	E ($\frac{daN}{cm^2}$)
B60	4,979	4,976	59,588	24,776	5000	1907,53	105869
B55	4,994	4,966	55,000	24,797	5000	1882,36	106954
B50	4,938	4,988	49,925	24,629	5000	1937,49	105771
B45	4,979	4,986	44,850	24,822	5000	1906,52	106130
B40	4,968	4,973	39,800	24,706	5000	1948,03	104536
B35	4,973	4,984	35,113	24,785	5000	1908,49	105389
B30	4,952	4,966	29,750	24,592	5000	1962,75	103763
B25	4,948	4,963	24,950	24,557	5000	1905,19	107084
B20	4,953	4,959	19,975	24,562	5000	1819,67	112023
B15	4,950	4,970	15,100	24,602	5000	1827,46	110799
B10	4,952	4,958	9,954	24,552	19250	2914,99*	117312

Tabela 5.9. Valores de ensaio, Maçaranduba, peça B, umidade de 13,6%.

(*) Máximo valor computado elasticamente

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$ ($\times 10^{-6}$)	E ($\frac{daN}{cm^2}$)
C60	4,911	4,963	60,000	24,372	5000	1695,63	121976
C55	4,924	4,966	54,925	24,456	5000	1689,18	121453
C50	4,929	4,966	49,950	24,474	5000	1673,11	122632
C45	4,921	4,963	44,775	24,425	5000	1677,13	122507
C40	4,921	4,979	39,888	24,502	5000	1701,14	120262
C35	4,928	4,978	34,788	24,532	5000	1705,69	119945
C30	4,908	4,946	29,763	24,275	5000	1684,00	122458
C25	4,903	4,946	25,013	24,397	5000	1711,99	120932
C20	4,898	4,944	20,200	24,216	5000	1649,98	125506
C15	4,911	4,955	14,925	24,334	5000	1580,64	130242
C10	4,919	4,968	9,963	24,438	20850	3246,71*	133754

Tabela 5.10. Valores de ensaio, Maçaranduba, peça C, umidade de 14,0%

(*) Máximo valor computado elasticamente

5.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.4.1. Limites de Resistência

5.4.1.1. Preliminares

São apresentados os resultados relativos médios, de modo semelhante ao que consta do item 4.5. anterior, referentes à resistência do corpo de prova padrão de 5cm x 5cm x 20cm.

5.4.1.2. Valores relativos

Estão apresentados nas tabelas 5.11. a 5.16. os valores nos quais se baseia a análise estatística dos resultados.

CP nº	$(l/b)_t$	$(l/b)_e$	f_{ci}/f_{c20}	CP nº	$(l/b)_t$	$(l/b)_e$	F_{ci}/f_{c20}
V1C05	1,0	0,990	1,1727	V3C05	1,0	0,9721	1,0044
V1C10	2,0	1,990	1,0521	V3C10	2,0	1,9830	1,0107
V1C20	4,0	4,013	1,0000	V3C20	4,0	3,9681	1,000
V1C30	6,0	5,876	0,9979	V3C30	6,0	5,9114	0,9152
V1C40	8,0	8,103	0,9496	V3C40	8,0	7,8453	0,7335
V1C50	10,0	10,030	0,8961	V3C50	10,0	9,8679	0,8864
V1C60	12,0	12,071	0,8534	V3C60	12,0	11,8068	0,8903
V2C05	1,0	0,988	1,2106	V4C05	1,0	0,9848	1,0527
V2C10	2,0	1,959	1,0942	V4C10	2,0	1,9765	1,0541
V2C20	4,0	4,026	1,000	V4C20	4,0	3,9820	1,000
V2C30	6,0	6,037	0,9721	V2C30	6,0	5,9758	1,0293
V2C40	8,0	8,009	1,0323	V2C40	8,0	7,9559	1,0477
V2C50	10,0	10,008	1,0032	V2C50	10,0	9,8773	0,8702
V2C60	12,0	12,019	1,0040	V2C60	12,0	11,9751	0,7125

Tabela 5.11.: Valores relativos, Castanheira seca ao ar, onde (l/b) é a razão entre o comprimento do corpo de prova e sua largura menor, t indica valor teórico, e indica valor efetivo, e (f_{ci}/f_{c20}) é o valor relativo das resistências entre o corpo de prova e o corpo de prova de 20cm de comprimento.

CP nº	$(l/b)_t$	$(f_{ci}/f_{c20})_{méd}$	CP nº	$(l/b)_t$	$(f_{ci}/f_{c20})_{méd}$
C05	1,0	1,1101	C40	8,0	0,9408
C10	2,0	1,0528	C50	10,0	0,9140
C20	4,0	1,0000	C60	12,0	0,8651
C30	6,0	0,9786			

Tabela 5.12.: Valores relativos médios, Castanheira seca ao ar.

CP nº	$(l/b)_t$	$(l/b)_e$	$f_{ci}/f_{c\ 20}$
D10	2,0	1,9903	0,9446
D15	3,0	2,9677	1,0061
D20	4,0	3,8872	1,0000
D25	5,0	4,9031	1,0197
D30	6,0	5,8852	1,0379
D35	7,0	6,8556	0,9007
D40	8,0	7,8441	0,7724
D45	9,0	8,8167	0,8544
D50	10,0	9,8341	0,8670
D55	11,0	10,8384	0,8954

Tabela 5.13.: Valores relativos, Cambará seco ao ar.

CP nº	$(l/b)_t$	$(l/b)_e$	$f_{ci}/f_{c\ 20}$
E10	2,0	2,0108	1,1243
E15	3,0	3,0200	0,9662
E20	4,0	4,0559	1,0000
E25	5,0	5,0199	1,0783
E30	6,0	6,0279	1,1445
E35	7,0	6,9809	1,1178
E40	8,0	8,0000	0,9758
E45	9,0	9,0275	1,0917
E50	10,0	9,9980	1,0946
E55	11,0	11,1939	0,9871

Tabela 5.14.: Valores relativos, Eucalipto tereticornis secos ao ar.

CP nº	$(l/b)_t$	$(l/b)_e$	$f_{ci}/f_{c\ 20}$
P10	2,0	2,0359	1,1155
P15	3,0	2,9821	1,0842
P15	3,0	3,0080	1,0061
P20	4,0	4,0040	1,0000
P25	5,0	4,9901	0,9652
P30	6,0	6,0400	0,9869
P35	7,0	6,9703	0,8765
P40	8,0	8,0400	0,9626
P45	9,0	8,9307	0,9121
P50	10,0	9,9406	0,9591
P55	11,0	11,0400	0,8582
P60	12,0	11,9496	0,8699

Tabela 5.15.: Valores relativos, Peroba rosa seca ao ar.

N	$(l/b)_t$	VRM
4	1,0	1,1101
7	2,0	1,0565
4	3,0	1,0157
7	4,0	1,0000
3	5,0	1,0211
7	6,0	1,0120
3	7,0	0,9650
7	8,0	0,9248
3	9,0	0,9521
7	10,0	0,9395
3	11,0	0,9136
5	12,0	0,8660

Tabela 5.16.: Valores relativos médios ($VRM = (f_{ci}/f_{c20})_{méd}$) para os ensaios anteriormente citados (tabelas 5.12. a 5.16.); total: 60 corpos de prova.

5.4.1.3. Equações de regressão

Os valores da tabela 5.16. foram submetidas à análise de regressão linear e polinomial. As equações obtidos e os coeficientes de correlação são:

$$VRM = 1,0968 - 0,0178(l/b) \quad r^2 = 0,8980 \quad (5.1)$$

$$VRM = 1,0732 - 0,0151(l/b) \quad r^2 = 0,9316 \quad (5.2)$$

(excluídos $l/b = 1,5,6e8$)

$$VRM = 1,105014 - 0,021273(l/b) + 0,00027(l/b)^2, \quad r^2 = 0,8980 \quad (5.3)$$

$$VRM = 1,15221 - 0,05775(l/b) + 0,00701(l/b)^2 - 0,000346(l/b)^3, \quad r^2 = 0,8981 \quad (5.4)$$

O diagrama apresentado na figura 5.5. relaciona os dados (tabela 5.16.) e as equações (5,1), (5.3) e (5.4).

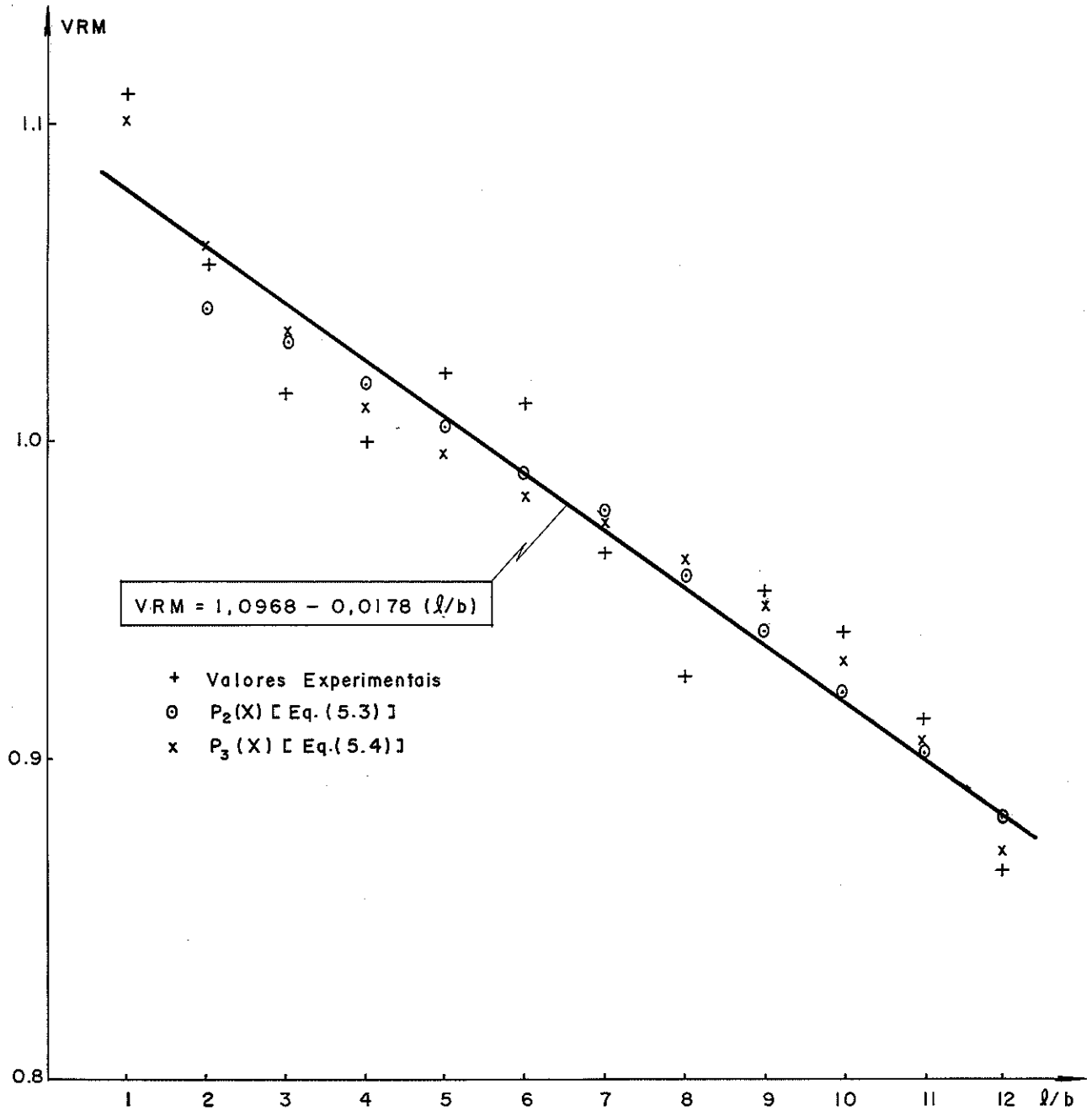


Figura 5.5.: Valores experimentais e curvas de correlação obtidas.

5.4.2. Módulos de elasticidade

5.4.2.1. Valores relativos

Estão apresentados na tabela 5.17. os valores nos quais se baseia a análise estatística dos resultados, já apresentados (tabela 5.8. a 5.10.).

(l/b)	$(E/E_{20})_A$	$(E/E_{20})_B$	$(E/E_{20})_C$	Média
2	1,026	1,047	1,066	1,046
3	1,055	0,989	1,038	1,027
4	1,000	1,000	1,000	1,000
5	0,988	0,956	0,964	0,969
6	0,991	0,926	0,976	0,964
7	0,980	0,941	0,956	0,959
8	0,957	0,933	0,958	0,949
9	0,965	0,947	0,976	0,963
10	0,981	0,944	0,977	0,967
11	0,990	0,955	0,968	0,971
12	0,978	0,945	0,972	0,965

Tabela 5.17.: Valores relativos dos módulos de elasticidade e valores relativos médios, onde: (l/b) - valor teórico da razão comprimento/largura menor ($E/E_{20})_A$ - valor relativo dos módulos de elasticidade (referidos ao comprimento de 20cm), obtidos da viga A(B,C).

5.4.2.3. Equações de regressão

Na tabela 5.18. estão reunidos os valores aos quais será aplicada a análise.

(l/b)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
(E/E_{20})	1,046	1,046	1,027	1,000	0,969	0,959	0,949	0,963	0,967	0,971	0,965

Tabela 5.18.: Valores utilizados para a análise de regressão.

Foi obtida a equação (5.5) utilizando-se todos os valores:

$$(E/E_{20}) = 1,028 - 0,007(l/b) ; r^2 = 0,5450 \quad (5.5)$$

Separando-se dois grupos complementares, $2 \leq (l/b) \leq 5$ e $5 \leq l/b \leq 12$, obtiveram-se respectivamente:

$$(E/E_{20}) = 1,1008 - 0,0258(l/b) \quad ; \quad r^2 = 0,9891 \quad (5.6)$$

$$(E/E_{20}) = 0,9588 + 0,0005(l/b) \quad ; \quad r^2 = 0,0363 \quad (5.7)$$

Desta forma, evidenciou-se um grupo tem alta dependência linear ($2 \leq l/b \leq 5$), ocorrendo o contrário com o outro ($5 \leq l/b \leq 12$).

As equações (5.6) e (5.7) e os valores da tabela 5.18 estão na figura 5.6.

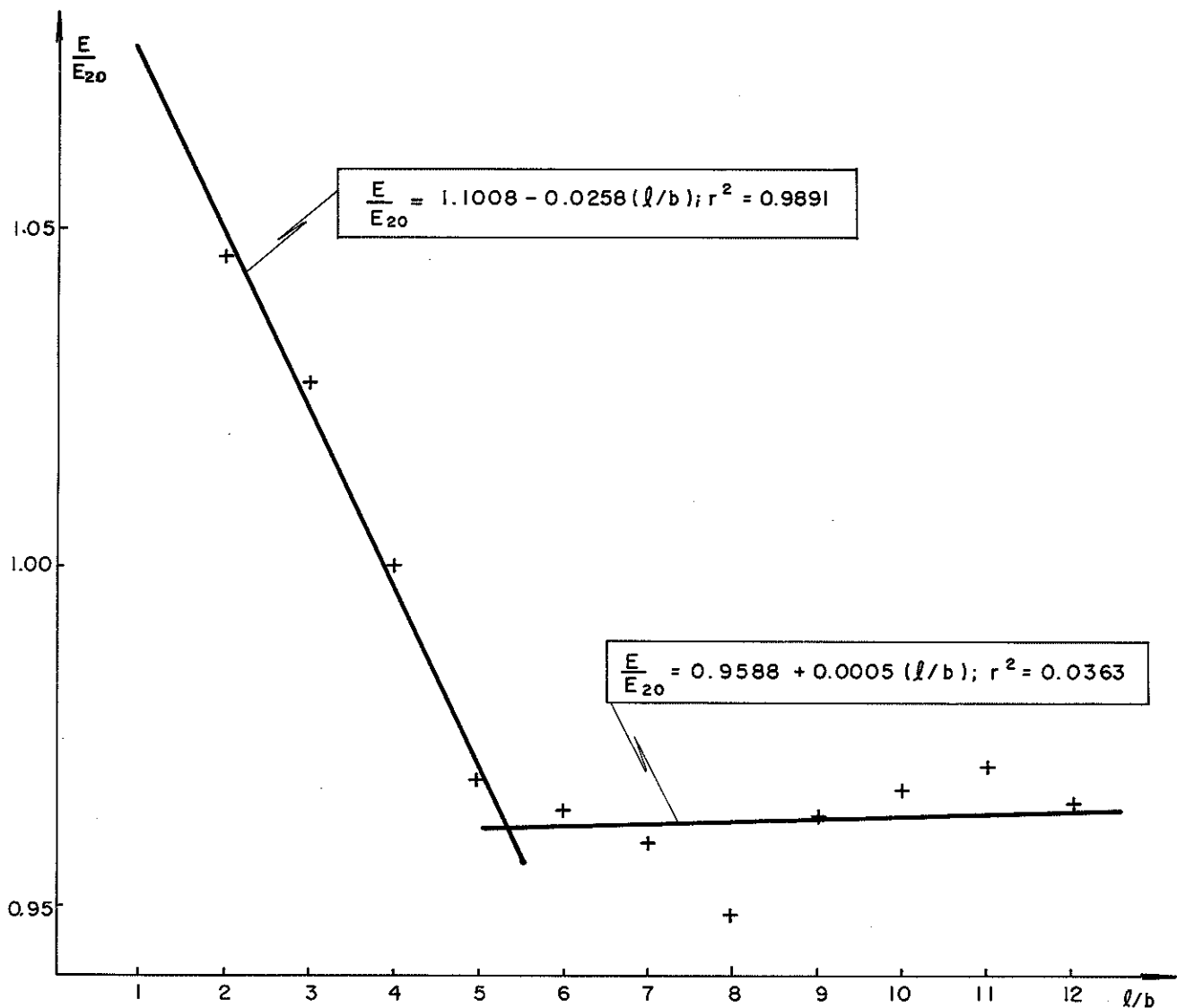


Figura 5.6.: Valores experimentais e retas obtidas na análise de regressão.

5.5. CONCLUSÕES

5.5.1. Limites de Resistência

Para esta característica, a análise de regressão aplicada aos valores, pelo método dos mínimos quadrados, equações (5.1) a (5.4), forneceu três polinômios com mesmo coeficiente de correlação, $r^2=0,898$, a saber:

$$\text{VRM} = 1,0968 - 0,0178(l/b) \quad (5.1)$$

$$\text{VRM} = 1,10501 - 0,02127(l/b) + 0,00027(l/b)^2 \quad (5.3)$$

$$\text{VRM} = 1,15221 - 0,05775(l/b) + 0,00701(l/b)^2 - 0,000346(l/b)^3 \quad (5.4)$$

Obteve-se pela equação (5.1) entre acima relacionados por ser mais simples e rápida a avaliação de VRM, no mesmo grau de correlação. Porém, entre as equações (5.1) e (5.2) o coeficiente de correlação variou, respectivamente, de 0,8980 para 0,9316. Ambas equações são polinômios do primeiro grau (figura 5.7):

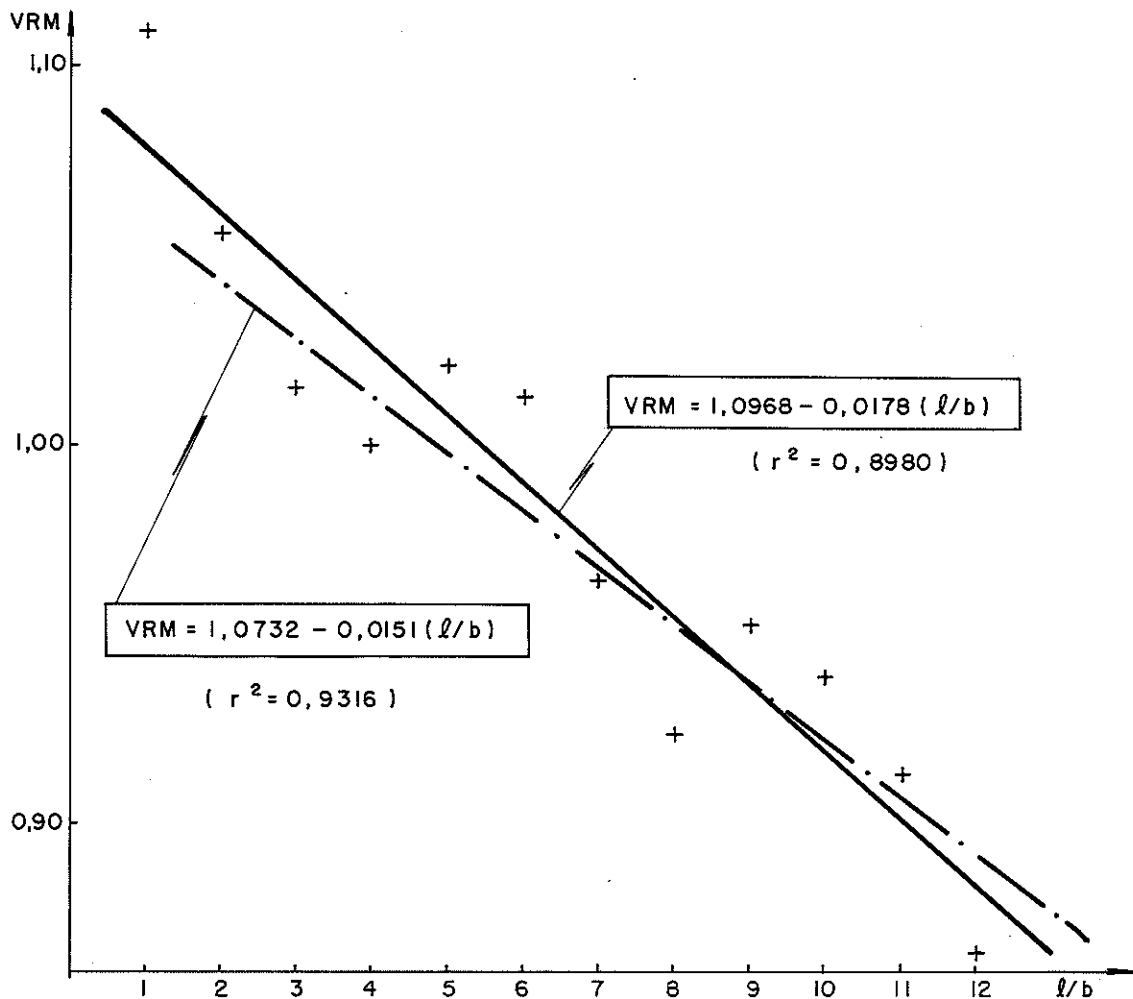


Figura 5.7.: Comparação entre as equações (5.1) e (5.2).

Ao aumento de 3,5% na correlação correspondeu a eliminação dos valores de (l/b) iguais a 1,5,6 e 8, excluindo 21 corpos de prova (35% do total). Desta forma, por ser mais representativa, a equação (5.1) é atribuída significância para descrever a variação de resistência à compressão paralela com o aumento da relação comprimento/largura dos corpos de prova.

5.5.2. Módulos de Elasticidade

Para esta propriedade, a análise de regressão linear aplicada aos valores forneceu as equações (5.6) e (5.7):

$$(E/E_{20}) = 1,1008 - 0,0258(l/b), \quad r^2 = 0,9891, \quad 2 \leq (l/b) \leq 5 \quad (5.6)$$

$$(E/E_{20}) = 0,9588 - 0,0005(l/b), \quad r^2 = 0,0363, \quad 5 \leq (l/b) \leq 12 \quad (5.7)$$

Avaliando-se em $(l/b) = 5$, encontram-se:

$$(E/E_{20}) = 0,9718 \quad \text{pela equação (5.6)}$$

$$(E/E_{20}) = 0,9613 \quad \text{pela equação (5.7)}$$

$$\Delta = 1,09\% \quad \text{diferença}$$

Com os coeficientes de correlação obtidos, pode-se concluir que, para comprimentos superiores a cinco vezes a largura menor, os módulos de elasticidade avaliados flutuam próximos a uma reta paralela ao eixo (l/b) , praticamente independentemente de quanto maior é o comprimento em relação à largura (figura 5.6.).

Para os comprimentos inferiores a cinco vezes a largura, o módulo de elasticidade varia com o comprimento, conforme a equação (5.6).

6. ESTUDO DA RESISTÊNCIA DE CORPOS DE PROVA SECCIONADOS

6.1. INTRODUÇÃO

As peças comprimidas de madeira tem comportamento variável com a esbelteza de cada peça, com a densidade e a umidade da madeira, com a espécie de madeira.

Diretrizes para o seu dimensionamento devem incluir, adicionalmente, considerações sobre as emendas das peças comprimidas. É necessário estabelecer parâmetros relativos à flutuação ocorrente quanto à resistência de cada sistema de ligação, projetado para desempenhar adequadamente sua função estrutural, visando o dimensionamento mais vantajoso economicamente.

6.2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os corpos de prova foram obtidos a partir de vigas em umidade de equilíbrio ao ar, nas espécies Eucalipto tereticornis (*Eucalyptus tereticornis*), Cambarã (*Erisma uncinatum*) e Peroba rosa (*Aspidosperma polyneuron*). Foram montados conforme indicado na figura 6.1.

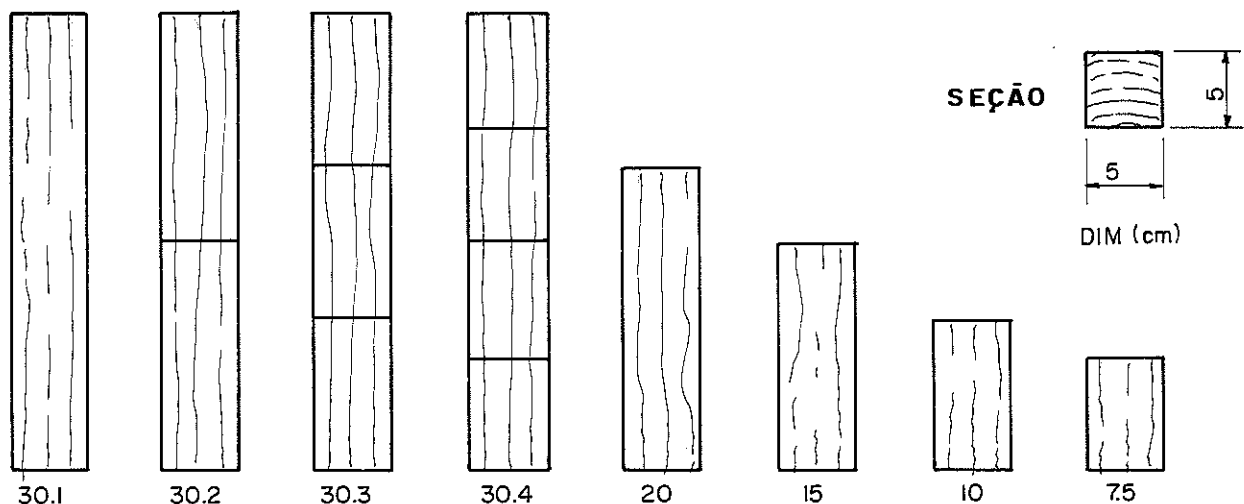


Figura 6.1. Composição e nomenclatura dos corpos de prova

Tratando-se de um grupo de corpos de prova de mesma seção transversal (5cm x 5cm), cada corpo de prova tem por nome o seu comprimento e, quando for o caso, o número de frações que o com-

põem. Assim, o corpo de prova "30.3" tem 30cm de comprimento e é formado por três partes iguais de 10cm cada. Desta forma, tem-se o corpo de prova único, para 30cm, 20cm, 15cm, 10cm e 7,5cm. E os corpos de prova compostos, duas partes de 15cm, três partes de 10cm e quatro partes de 7,5cm.

A justaposição das partes e sua influência na resistência da madeira à compressão paralela são o objeto desta investigação.

6.3. RESULTADOS DOS ENSAIOS

Estão apresentados nas tabelas 6.1 a 6.3. os resultados dos ensaios por espécie.

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c (daN/cm ²)
30.1	4,983	4,990	30,100	24,863	8405	338,04
30.2	4,980	4,990	30,180	24,850	7941	319,57
30.3	4,980	4,990	30,175	24,850	7346	295,60
30.4	4,975	4,980	29,720	24,776	8008	323,20
20	5,158	5,163	20,050	26,631	9265	347,90
15	4,993	4,995	15,100	24,938	8272	331,72
10	4,985	4,990	10,375	24,875	8372	336,54
7,5	4,975	4,985	7,291	24,800	9000	362,91

Tabela 6.1. Corpos de prova de Cambará

CP nº	b_0 (cm)	b_1 (cm)	l (cm)	A (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (daN)	f_c (daN/cm ²)
30.1	4,985	5,000	30,100	24,925	13864	556,24
30.2	4,985	5,005	30,275	24,950	13600	545,08
30.3	4,975	5,015	30,450	24,950	13037	522,54
30.4	4,970	4,990	29,955	24,800	11912	480,32
20	5,005	5,020	20,300	25,125	12575	500,41
15	4,970	5,025	15,150	24,974	13434	537,92
10	4,995	5,035	10,210	25,150	12508	497,32
7,5	4,985	5,000	7,525	24,925	13633	546,95

Tabela 6.2. Corpos de prova de Eucalipto tereticornis

CP nº	b ₀ (cm)	b ₁ (cm)	ℓ (cm)	A (cm ²)	P _{máx} (daN)	f _c (daN/cm ²)
30.1	5,043	5,075	30,125	25,591	12805	500,39
30.2	5,030	5,048	30,275	25,389	14427	568,23
30.3	5,015	5,035	30,600	25,251	15089	597,56
30.4	4,945	5,025	30,723	24,849	14758	593,75
20	5,020	5,100	20,100	25,602	14800	578,08
15	5,060	5,071	14,963	25,661	13666	532,56
10	4,953	5,044	10,234	24,979	15717	629,22
7,5	5,015	5,040	7,670	25,276	17206	680,75

Tabela 6.3. Corpos de prova de Peroba rosa

6.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.4.1. Valores Relativos

Estão relacionados na tabela 6.4 os valores de ensaio, com referência ao corpo de prova padrão (5cm x 5cm x 20cm).

CP nº	(ℓ/b)	Cambarã	E.tereticornis	Peroba Rosa	vrn
		(f _{ci} /f _{c20})	(f _{ci} /f _{c20})	(f _{ci} /f _{c20})	
7,5	1,50	1,043	1,093	1,178	1,105
10	2,00	0,967	0,994	1,088	1,016
15	3,00	0,953	1,075	0,921	0,983
20	4,00	1,000	1,000	1,000	1,000
30.1	6,00	0,972	1,112	0,866	0,983
30.2	6,00	0,919	1,089	0,983	0,997
30.3	6,00	0,850	1,044	1,034	0,976
30.4	6,00	0,929	0,960	1,027	0,972

Tabela 6.4. Valores relativos e valores relativos médios (vrn) dos ensaios

6.4.2. Análise por Regressão Linear

Tomando-se como base a variação do comprimento, através da equação (5.1), obtém-se a flutuação apresentada na tabela 6.5 a seguir.

$$VRM_{est} = 1,0968 - 0,0178 (\ell/b) \quad , \quad r^2 = 0,8980 \quad (5.1)$$

CP nº	(ℓ/b)	VRm	VRm _{est}	Diferença	(%)
7,5	1,50	1,105	1,073	- 0,032	- 2,95
10	2,00	1,016	1,065	+ 0,049	+ 4,62
15	3,00	0,983	1,049	+ 0,066	+ 6,33
20	4,00	1,000	1,034	+ 0,034	+ 3,25
30.1	5,00	0,983	1,002	+ 0,019	+ 1,90
			Σ =	+ 0,136	13,15

Tabela 6.5. Flutuação verificada entre os valores relativos médios em função do comprimento.

A análise de regressão linear aplicada aos valores relativos médios da tabela 6.5, com cinco pares de valores, mostra:

$$\text{vr}m = 1,0820 - 0,0196.(\ell/b); \quad r^2 = 0,4743 \quad (6.1)$$

Utilizando-se os oito pares, obtêm-se:

$$\text{vr}m = 1,0743 - 0,0163.(\ell/b); \quad r^2 = 0,5370 \quad (6.2)$$

Com referência à equação (5.1), utilizando os seis primeiros pares de valores (ver tabela 5.16), extrai-se:

$$\text{VR}M = 1,0971 - 0,0175.(\ell/b); \quad r^2 = 0,6365 \quad (6.3)$$

Acrescentando-se à tabela 5.16 os cinco pares de valores de vr_m da tabela 6.5, obtêm-se:

$$\text{VR}M = 1,0993 - 0,0182.(\ell/b); \quad r^2 = 0,8832 \quad (6.4)$$

em contraposição a:

$$\text{VR}M = 1,0968 - 0,0178.(\ell/b); \quad r^2 = 0,8980 \quad (5.1)$$

6.4.3. Outras Considerações

A alteração realizada no corpo de prova foi seccioná-lo uma, duas ou três vezes, formando um conjunto de ensaio com as arestas cuidadosamente posicionadas e direitas para que o corpo de prova permanecesse no prumo depois de montado. A análise da flutuação encontrada devida à sobreposição das partes é referida ao corpo de prova de 30cm não seccionado (tabela 6.6. e figura 6.2).

CP nº	vr,c	vr,e	vr,p	vr,m
30.1	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
30.2	0,9454	0,9799	1,1356	1,0203
30.3	0,8745	0,9394	1,1942	1,0027
30.4	0,9561	0,8635	1,1866	1,0021

Tabela 6.6. Valores relativos para a superposição, onde:

- vr,c - valores relativos, cambará
 vr,e - valores relativos, eucalipto tereticornis
 vr,p - valores relativos, peroba rosa
 vr,m - valores relativos, média dos anteriores

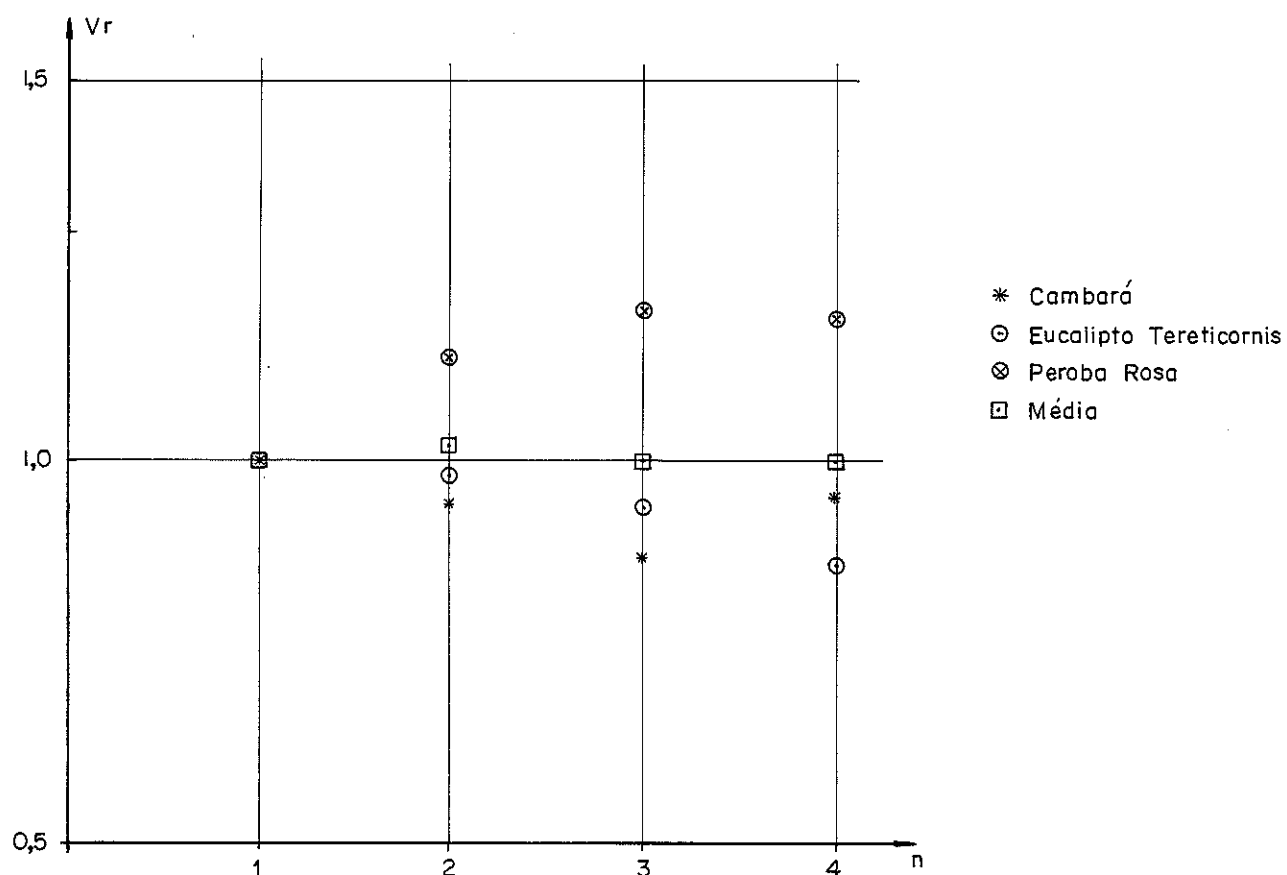


Fig. 6.2- Valores relativos (vr) em função do número de partes componentes do corpo de prova (n), tabela 6.6.

6.5. CONCLUSÕES

A análise de regressão aplicada aos valores permite inferir que a secção dos corpos de prova comprimidos axialmente, em peças curtas, não introduz variação na resistência à compressão significativamente maior que a variação própria da resistência da madeira à compressão, em corpos de prova simples (uma só parte).

Os valores apresentados na tabela 6.6 auxiliam a análise ao detectar flutuação dos valores relativos em torno da unidade (no máximo 2% maior). Como o corpo de prova é curto (índice de esbeltez da ordem de 21), não houve influência de instabilidade nas juntas superpostas comprimidas: o pleno contato de superfícies ajustadas, perpendiculares ao eixo de carregamento, não modifica a resistência da madeira à compressão paralela às fibras.

CAPÍTULO 7

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Ao longo da pesquisa desenvolvida a respeito da compressão paralela às fibras em peças de madeira, algumas conclusões e observações importantes foram registradas e apresentadas nos capítulos precedentes. Aqui, levantam-se algumas considerações a este respeito.

O ensaio de corpos de prova de madeira à compressão paralela às fibras, em diversos tamanhos, é realizado basicamente em peças curtas. A razão entre o comprimento e a maior dimensão da seção transversal (l/b), recomendada para o ensaio, é igual a 4 (quatro).

Entre as verificações exigidas para o ensaio, são essenciais:

- a - Corte das superfícies sempre paralelas entre si (duas a duas) e perpendiculares entre superfícies adjacentes (ângulo reto).
- b - Medida das dimensões da seção transversal com boa precisão (por exemplo, 0,05mm ou menos) e medidas de comprimento e massa do corpo de prova antes de ensaiar.
- c - Posicionar o corpo de prova - já preparado para a instrumentação - entre os pratos perfeitamente lisos, nivelados e paralelos da máquina de ensaio.
- d - Carregar o corpo de prova com velocidade constante.

É desejável que se tenha indicação da forma da superfície de fratura desenvolvida, que permite aceitar ou rejeitar o ensaio conforme os fins a que se destinam. Por exemplo, a fibrilação de extremidade é inaceitável em corpos de prova de madeira climatizada, mesmo no nível de umidade de saturação; o fendilhamento longitudinal é inaceitável para os corpos de prova de madeira isentas de defeitos (peças de primeira categoria), de acordo com as classificações mostradas no capítulo 2.

Quando as instruções acima estão satisfeitas, nenhum bloco esférico para o carregamento é exigido. Instala-se um bloco esférico para que as deformações desenvolvidas na fase de ruptura possam ocorrer sem serem transformadas em esforços excêntricos adicionais nesta fase do ensaio. Esta articulação, posicionada acima do corpo de prova, é lubrificada com grafite ou óleos compostos que admitam a acomodação do dispositivo de ensaio aos deslocamentos eventuais da superfície de contato. O conjunto de carregamento e apoio do corpo de prova deve ser tal que todas as arestas do corpo de prova sejam

envolvidas no carregamento, figura 7.1.

A superfície inferior do corpo de prova deve ser perfeita-
mente lisa para que o material, carregado axialmente, não desenvolva
contato com imbricações na superfície, o que aumenta o atrito e a re-
sistência imposta às deformações transversais no ensaio, especial-
mente na fase final, conforme a figura 7.1.

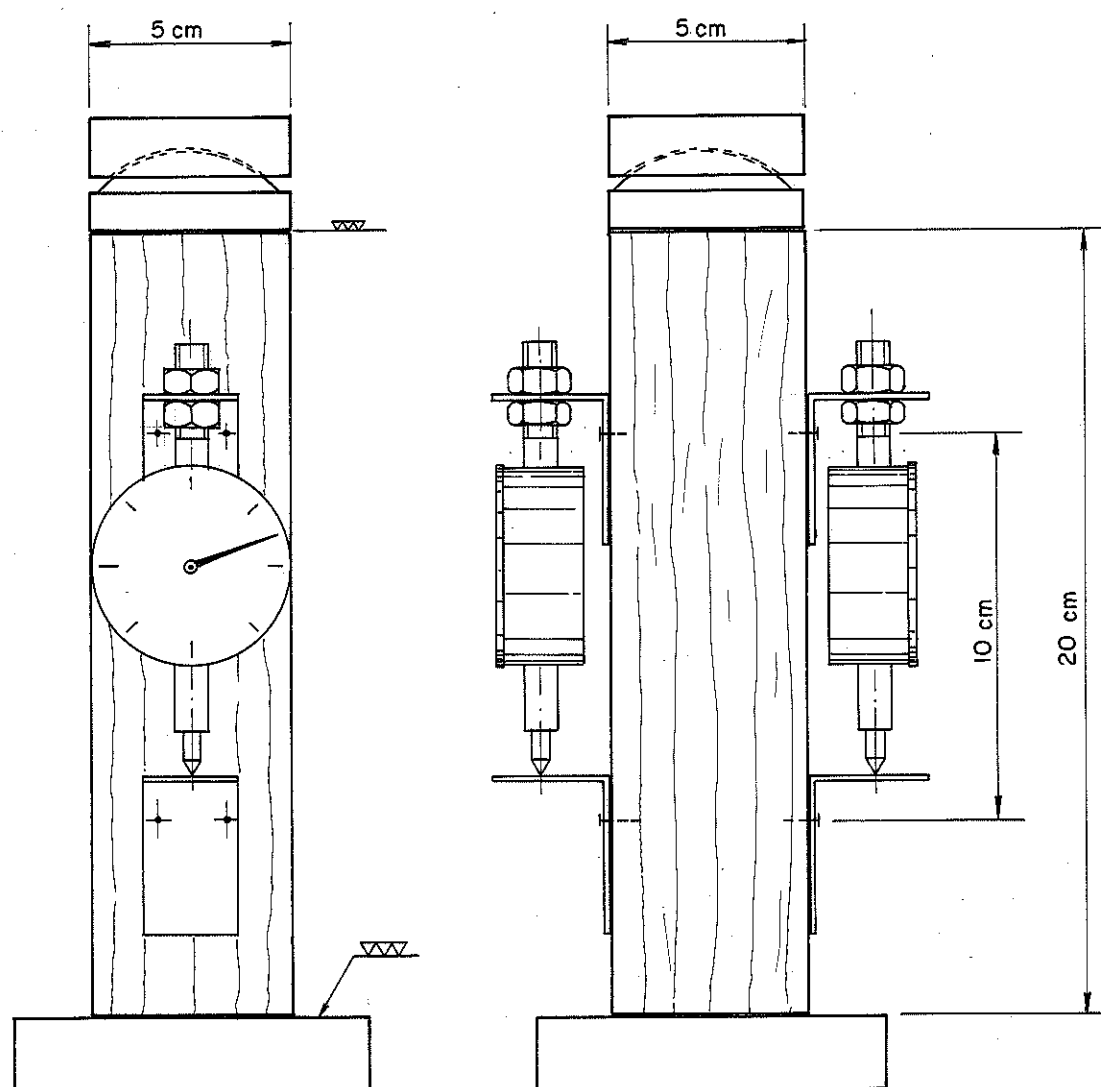


Figura 7.1: Vinculação do corpo de prova para o ensaio de compressão paralela às fibras:

Uma vez delimitadas as condições de extremidade do corpo de prova, foram encontradas as equações a seguir:

$$\frac{f_{wc}}{f_{wc20}} = 0,0009 A + 0,9759 \quad (7.1a)$$

$$\frac{f_{wc}}{f_{wc20}} = 0,14 \log A + 0,7864 \quad (7.1b)$$

$$\frac{f_{wc}}{f_{wc20}} = 1,0968 - 0,0178 (\ell/b) \quad [1 \leq (\ell/b) \leq 12] \quad (7.2)$$

$$\frac{E}{E_{20}} = 1,1008 - 0,0258 (\ell/b) \quad [1 \leq (\ell/b) \leq 5] \quad (7.3)$$

Os valores da equação (7.1a) referem-se à madeira verde ($u \cong 30\%$), exprimindo a razão de resistência entre os corpos de prova ensaiados e o padrão (5cm x 5cm x 20cm) com a variação da área de seção transversal (A), em prismas proporcionais de madeira. A equação (7.1b) é da mesma análise, para a madeira seca ao ar.

As equações seguintes mostram as variações encontradas entre as propriedades de resistência (7.2) e elasticidade (7.3) com o comprimento do corpo de prova.

Foi verificado também que não houve redução na resistência das peças comprimidas quando seccionadas e mantidas em contato por toda a seção transversal.

No anexo I desta dissertação está apresentada uma proposta de metodologia para o ensaio de peças de madeira à compressão paralela às fibras. Essa proposta foi redigida com base nos resultados conclusivos da pesquisa realizada.

LITERATURA CITADA

- [1] MOREY, Philip R. - O crescimento das árvores. São Paulo, 1980. p.13-24. (Coleção "Temas de Biologia" - v. 19).
- [2] GEMMEL, Alan R. - Anatomia do vegetal em desenvolvimento. São Paulo, 1981. p. 24-30. (Coleção "Temas de Biologia" - v. 12).
- [3] MATEUS, Tomás J.E. - Bases para o dimensionamento de estruturas de madeira. Lisboa, LNEC, 1961. p.57-58. Parte 2, capítulo VI.
- [4] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - Pequenos corpos de prova de madeira isentos de defeitos - ASTM D143-52. Parte I: Métodos Principais. In: _____ - Annual Book of ASTM Standards, Part 22. Philadelphia, 1982.
- [5] _____ - Pequenos corpos de prova de madeira isentos de defeitos - ASTM D143-52. Parte II: Métodos Secundários. In: _____ - Annual Book of ASTM Standards, Part 22. Philadelphia, 1982.
- [6] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG - Bestimmung der druckfestigkeit parallel zur faser - DIN 52185. Berlin, 1976. 5p.
- [7] HELLMEISTER, João C. - Sobre a determinação das características físicas da madeira. São Carlos, LAMEM-EESC-USP, 1973. 119p. Tese (Doutor Engenheiro).
- [8] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM D143-52) - op. cit., item 57, p.68.
- [9] WANGAARD, Frederick F. - The mechanical properties of wood. New York, John Wiley & Sons, 1950. p.304-309.
- [10] BODIG, J. & JAYNE, B.A. - Mechanics of wood and wood composites. New York, Van Nostrand Reinhold, 1982. p.419.
- [11] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - Standard methods of static tests of timber in structural sizes - ASTM D198-76. In: _____ - Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, 1982. v.22 - p.126.

- [12] BODIG, J. e JAYNE, B.A. - op. cit., p.420.
- [13] BODIG, J. & GOODMAN, J.R. - A New Apparatus for compression testing of wood. Wood and Fiber, 1 (2): 146-153, 1969.
- [14] TIMOSHENKO, S. - Mecânica dos Sólidos. Rio de Janeiro, McGraw-Hill, 1982. v.1.
- [15] BODIG, J. & JAYNE, B.A. - op. cit., p.127
- [16] BODIG, J. & JAYNE, B.A. - op. cit., p.127.
- [16] BODIG, J. & JAYNE, B.A. - op. cit., p.131-132.
- [17] BODIG, J. & JAYNE, B.A. - op. cit., p. 167-168.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Cálculo e execução de estruturas de madeira - NBR 7190/82. Rio de Janeiro, ABNT, 1982. 23p.
- [19] _____ - Cálculo e execução de estruturas de madeira - Norma Recomendada - NB 11R. Rio de Janeiro, ABNT, 1950. 28p.
- [20] NATIONAL FOREST PRODUCTS ASSOCIATION - National Design specification for wood Constructions. Washington, NFPA, 1977. 78p.
- [21] OZELTON, E.C. & BAIRD, J.A. - Timber designer's manual. London, Crosby Lockwood Staples, 1976. 518p.
- [22] L'ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION - Qualités des bois et contraintes admissibles - NF B52001. Paris, AFNOR, 1946. 15p.
- [23] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG - Holzbauteile - DIN 1052. Berlin, 1988. 67p.
- [24] KOLLMANN, F.F.P. & Côté Jr., W.A. - Principles of wood science and technology. Berlin, Springer-Verlag, 1968. v.I - Solid Wood. p.336.
- [25] LOBO CARNEIRO, F. - Galileu e os efeitos do tamanho. In: Ciência Hoje, 9 (50): 30-39, 1989.
- [26] SALLENAVE, P. - Propriétés physiques et mécaniques des bois tropicaux. Nogent-sur-Marne, Centre Technique Forestier Tropical, 1971. (Deuxième Supplément).

- [27] KOLLMANN, F.F.P. & Côté Jr., W.A. - op.cit., p.167.
- [28] HELLMEISTER, J.C. - op.cit., p.50.
- [29] KOLLMANN, F.F.P. & Côté Jr., W.A. - op. cit., p.342-346.
- [30] KOLLMANN, F.F.P. & Côté Jr., W.A. - op. cit., p.346.
- [31] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Ensaio físicos e mecânicos de madeiras nacionais - NBR 6230. Rio de Janeiro, ABNT, 1982.
- [32] HELLMEISTER, J.C. - op.cit., p.58-64.
- [33] PIGOZZO, Júlio C. - Influência da umidade e da densidade na resistência à compressão da madeira. Orientador: Prof. Dr. João C. Hellmeister. São Carlos, LAMEM-EEESC-USP, Maio 1982. Dissertação (Mestre-Engª de Estruturas).
- [34] NORÉN, Bengt - Relation between compressive strength and rate of deformation in testing swedish fir. ASTM Bulletin: 43-50, December, 1954.
- [35] CASTRO OTTO, Rodrigo I. - Velocidade de ensaio na flexão de peças de madeira. Orientador: Prof. Dr. João C. Hellmeister. São Carlos, LAMEM-EEESC-USP, 1985. p.23-24. Dissertação (Mestre-Engª de Estruturas).
- [36] DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG (DIN 52185) - op.cit., p.2.
- [37] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - (ASTM D143-52) - op. cit., p.68.
- [38] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - (ASTM D198-76) - op. cit., p.127.
- [39] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - (NBR 6230) - op.cit., p.7.
- [40] L'ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION - Essai de Compression Axiale - NF B51007. Paris, AFNOR, 1946. p.3.
- [41] FOREST PRODUCTS LABORATORY - Wood handbook: wood as and engineering material. Washington, D.C., USDA-FS-FPL, 1987. p.4.37 - 4.40. (Agriculture Handbook nº72).

- [42] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - Standard Methods for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber - ASTM D245-81. In: _____ Annual Book of ASTM Standards, Part 22. Philadelphia, 1982. p.168.
- [43] _____ - Standard Methods for Establishing Clear Wood Strength Values - ASTM D2555-81. In: _____ Annual Book of ASTM Standards, Part 22. Philadelphia, 1982. p.759.
- [44] FOREST PRODUCTS LABORATORY - op.cit., p.4.40-4.41.
- [45] FOREST PRODUCTS LABORATORY - op.cit., p.4.41.
- [46] KOLLMANN, F.F.P. & Côté Jr., W.A. - op. cit., p. 355.
- [47] KOLLMANN, F.F.P. & Côté Jr., W.A. - op. cit., p.311-313.
- [48] FOREST PRODUCTS LABORATORY - op. cit., p.4.36-4.38.
- [49] FOREST PRODUCTS LABORATORY - op. cit., p.4.38-4.41.
- [50] KOLLMANN, F.F.P. & Côté Jr., W.A. - op. cit., p.349-353.
- [51] WILKINSON, Thomas L. - Effect of confining pressure-on the compression parallel - to-the-grain strength of small clear wood specimens. USDA-FS-FPL, Madison, Wis., 1964. 9p. (Research Note, FPL-057).
- [52] LABORATÓRIO DE MADEIRAS E DE ESTRUTURAS DE MADEIRA - Madeira-Determinação de Suas Características - São Carlos, 1987. 48p.
- [53] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Ações e Segurança nas Estruturas - NBR 8681. Rio de Janeiro, ABNT, 1984, 21p.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Símbolos Gráficos para Projetos de Estruturas - NBR 7808. Rio de Janeiro, ABNT, 1983. 18p.
- BUSSAB, W.O. & MORETTIN, P.A. - Estatística básica. São Paulo, Atual Editora, 1987. 321p.
- BUSSAB, W.O. & PEREIRA, J.S.C. - Tábuas de estatística. São Paulo, Harper & Row do Brasil, 1985. 22p.
- FUSCO, P.B. - Fundamentos do Projeto Estrutural. São Paulo, Mc Graw-Hill do Brasil da Universidade de São Paulo, 1976. 298p.
- MORETTI Fº, Justo - Redação de dissertações e teses. Piracicaba, ESALQ-USP, 1982. 67p.
- NOGUEIRA, João B. & NOGUEIRA, Maria Christina de A. - Manual de redação de trabalhos científicos. São Carlos, EESC-USP, 1985. 18p. (Publ. 003/87).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Relógios Comparadores com Leitura de 0,01 mm - Especificação - NBR 6388. Rio de Janeiro, ABNT, 1983. 6p.

ANEXO I

PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA O ENSAIO DE PEÇAS
DE MADEIRA À COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS

METODOLOGIA PARA O ENSAIO DE COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS

1- INTRODUÇÃO

A metodologia do ensaio de corpos de prova de madeira, na compressão paralela às fibras, constitui as etapas de preparação dos corpos de prova, instrumentação e ensaio, avaliação e obtenção dos resultados.

Na preparação dos corpos de prova a partir de um lote de vigas, toras, barras, deve-se controlar o teor de umidade de conjunto até que se obtenha o teor desejado para o corte. Podem ser realizados cortes intermediários para melhorar o desempenho da secagem quando for o caso (Figura 1) porém mantendo as partes com dimensões superiores a 5cm x 5cm na seção transversal. O corte final dos corpos de prova visa obter corpos de prova de 5cm x 5cm x 20cm, em esquadro, com fibras retas (Figura 2).

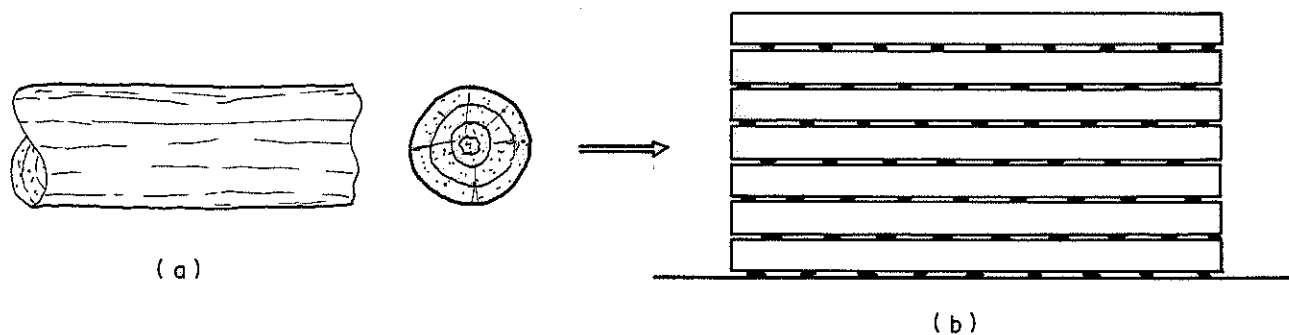


Figura 1- Corte intermediário para a preparação dos corpos de prova
(a) Material bruto (b) Material desdobrado e entabicado, aguardando corte final.

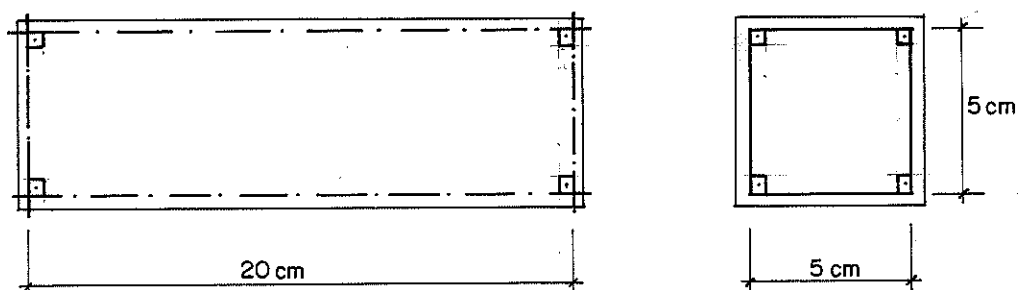


Figura 2- Cortes finais do corpo de prova padrão

1.1- Verificação do Teor de Umidade do Material Bruto

Toras, vigotas, pranchas, o material do qual serão obtidos os corpos de prova para ensaio, deverá apresentar sanidade (isto é, sem ataques de fungos e insetos, sem rachaduras, sem fendilhamento excessivo) pelo menos na parte da qual será extraída a amostra.

O corte de testemunhos pequenos, de dimensões facilmente verificáveis, permite controlar a umidade do material estocado. Um pedaço de madeira de dimensões 5,0cm x 5,0cm x 2,0cm poderá ser levado a uma balança de precisão 0,5g, terá sua massa anotada e será colocado em uma estufa, à temperatura de 103±3°C por 24-48h, terá sua massa novamente anotada e sua umidade determinada:

$$u_n = \frac{m_n - m_o}{m_o} \cdot 100 \quad (1)$$

onde: u_n : teor de umidade (n%)

m_n : massa do testemunho, úmida

m_o : massa do testemunho, completamente seca em estufa.

Estendendo este procedimento a todo o material, coleta-se vários testemunhos até que seja encontrado um teor de umidade igual ou ligeiramente superior (em até três pontas percentuais), o material (o todo ou a parte do lote que o admita) deve ser encaminhado para o desdobro e corte de preparação do ensaio.

1.2- Corte dos Corpos de Prova

O material deverá ser cortado em faces perpendiculares, já nas dimensões finais, após a estabilização do teor de umidade necessário à realização dos ensaios.

Cada linha de corte deverá respeitar o alinhamento das fibras, o esquadro (90°) entre faces adjacentes e as medidas especificadas (Figura 3).

Desta forma, o corpo de prova padrão para o ensaio de compressão paralela às fibras tem 5cm por 5cm na seção transversal e 20 cm na direção do carregamento. O corpo de prova é o mesmo para as determinações de Módulo de Elasticidade (E) e Limite de Resistência à compressão paralela (f_{wc}).

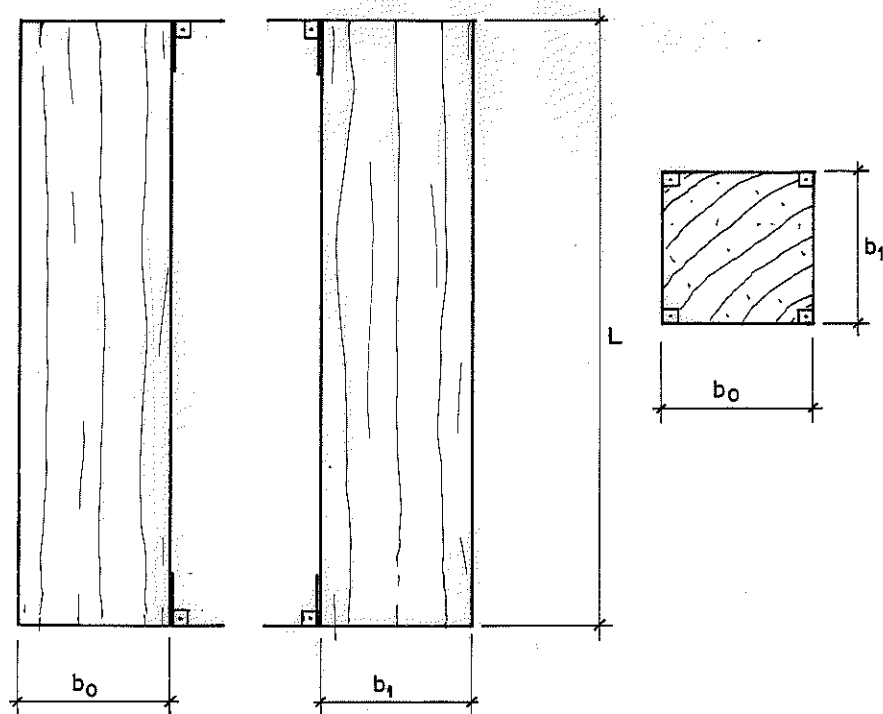


Figura 3 - Corpo de prova padrão para determinação de propriedades de compressão paralela às fibras, onde:

- b_0 : menor dimensão da seção transversal, 5cm, com tolerância de 0,5 %
- b_1 : maior dimensão da seção transversal, 5cm, com tolerância de 0,5 %
- L : comprimento do corpo de prova, 20 cm, com tolerância de 1,0 %.

2- INSTRUMENTAÇÃO

Uma vez obtidos os corpos de prova, os procedimentos de ensaio são:

- . medidas dos corpos de prova
- . pesagem
- . instalação de medidores
- . carregamento
- . pesagem após secar os cp em estufa

2.1- Medidas dos Corpos de Prova

O uso de equipamentos de precisão (parafuso micrométrico ou paquímetro) é necessário tanto à padronização das medidas quanto ao controle de qualidade da execução dos cortes (máquinas e pessoal envolvidos).

São necessários pelo menos quatro medidas de cada dimensão representativa do corpo de prova (neste caso, recomenda-se medir junto aos vértices do cp) para que a média obtida destas leituras seja efetivamente a dimensão a considerar. Estas leituras devem ser realizadas com precisão de 0,05 mm ou maior, através de Palmer (parafuso micrométrico) ou paquímetro.

O comprimento estipulado para o corpo de prova padrão, 20 cm, é maior que os comprimentos máximos de leitura usualmente admitidos para os instrumentos disponíveis em laboratório e, para contornar esta dificuldade, aceitam-se pelo menos quatro medidas com uma escala graduada em milímetros, com precisão de 0,5 mm. O comprimento adotado para o corpo de prova é a média das medidas efetuadas.

Constatando-se irregularidades nos cortes, nos alinhamentos das fibras, nos esquadros ou nas medidas, deve-se refutar o material (Figura 4).

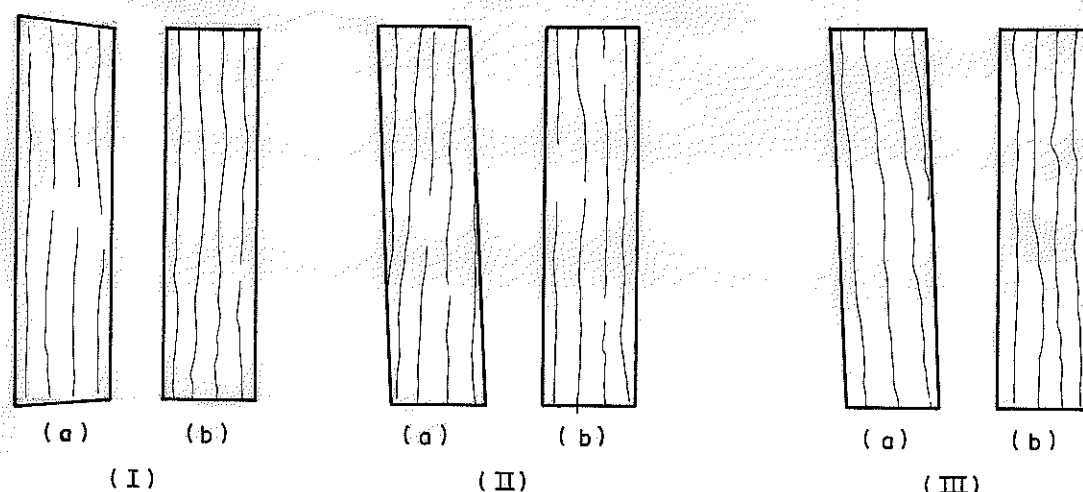


Figura 4 - Irregularidades nas dimensões: (I) Arestas paralelas às fibras, faces de topo não-paralelas (convergentes); (II) Arestas não paralelas às fibras, apesar das faces de topo paralelas; (III) Arestas paralelas às fibras mas não em esquadro, apesar das faces de topo paralelas. (a) e (b) são lados adjacentes e perpendiculares do mesmo corpo de prova.

2.2- Pesagem

Cada corpo de prova deverá ser pesado imediatamente antes de ser ensaiado, para se permitir o acompanhamento de sua densidade aparente (massa dividida pelo volume ao mesmo teor de umidade) e a determinação do teor de umidade. Usa-se uma balança de precisão $\pm 0,02g$ para esta determinação.

Ao se ensaiar um lote, todos os corpos de prova devem ter determinadas a densidade aparente. Pode-se tomar parte do lote (25%) para a determinação do teor de umidade ou, então, tomar-se testemunhas da parte não danificada de cada corpo de prova (5cm x 5cm x 2cm) e proceder à secagem em estufa por 24-48h à temperatura de $103 \pm 3^{\circ}C$ para se conhecer o teor de umidade da madeira quando da realização dos ensaios.

2.3- Instalação de Medidores

2.3.1- Medidores Ópticos

Constituem medidores ópticos os extensômetros de leitura direta como relógios comparadores, extensômetros Galileu, que permitem acompanhar os deslocamentos do corpo de prova com grande simplicidade.

de. São usados, portanto, nos ensaios de determinação de módulo de elasticidade na compressão, e são afixados no corpo de prova em lados paralelos, no sentido do carregamento (Figura 5). Apoiam-se em cantoneiras L de chapa dobrada, de pequena espessura (1/8"), pregadas no corpo de prova, através de dois furos prévios, por pregos 6x6 ou 7x7.

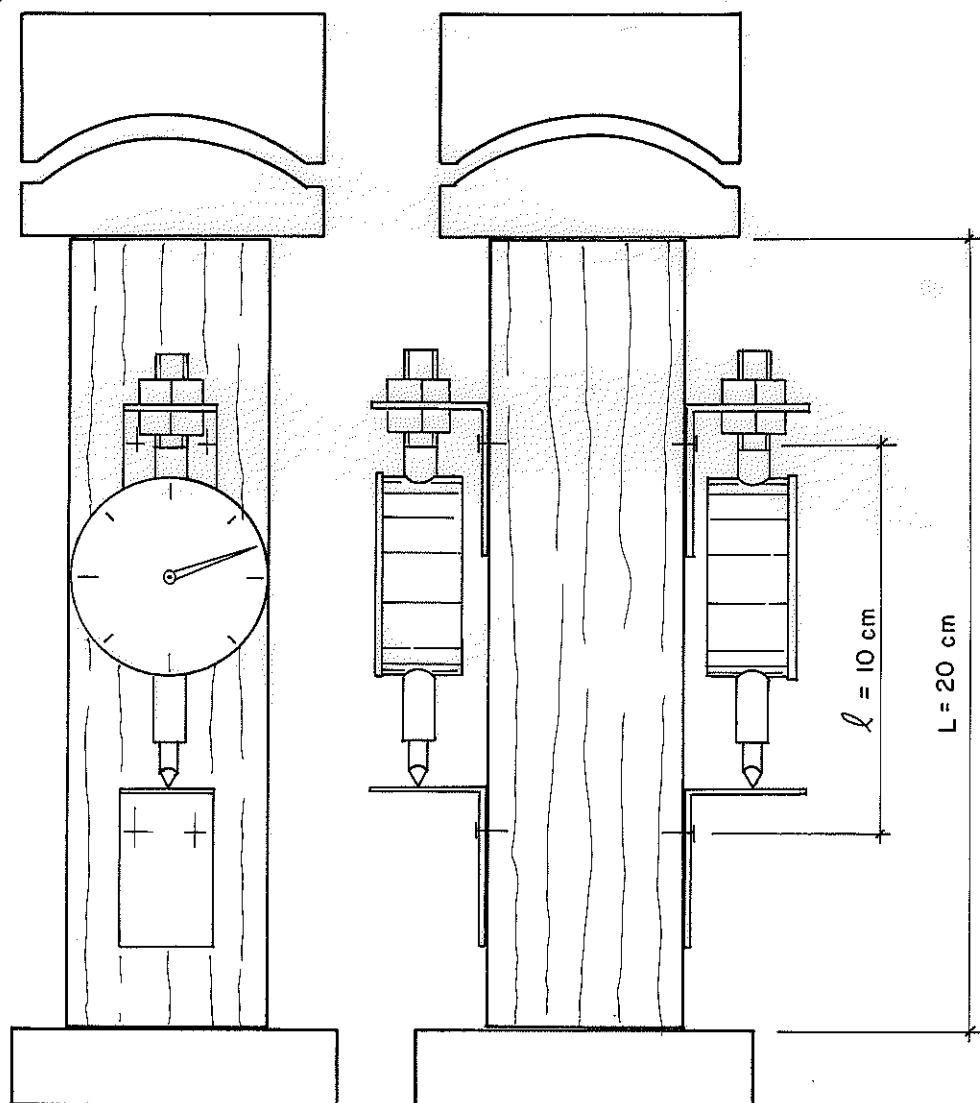


Figura 5 - Instrumentação para leitura óptica dos deslocamentos, recomendada para o ensaio de compressão paralela às fibras.

É importante salientar que a precisão dos relógios comparadores é decisiva nas medidas para obtenção de resultados padronizados, motivo pelo qual se recomenda o uso de relógio com leitura de 0,001 mm e curso de 10 mm. Com alguma perda de precisão, pode-se usar relógios comparadores de leitura 0,01 mm e curso de 10 ou 20 mm (NBR 6388), ou extensômetros do tipo Galileu.

2.3.2- Outros Medidores

Pode-se utilizar, alternativamente, outros extensômetros que permitam avaliar as deformações de modo completo, citando-se os transdutores de deslocamentos (LVDT), extensômetros elétricos ("Strain gauges"), taqueômetros. A disponibilidade limitada destes dispositivos e todos os seus complementos leva, porém, a restrições de ordem econômica e material para padronizá-los no País.

2.4- Carregamento

Os corpos de prova devem ser instalados na máquina de ensaio em pratos paralelos, nivelados, tais que o prato superior tenha um dispositivo esférico para distribuição da carga e o prato inferior seja uma placa plana, com superfícies perfeitamente lisas (Figura 5). O raio da esfera do dispositivo superior deve ser entre uma vez e duas vezes a largura do corpo de prova.

Para se obter o módulo de elasticidade (E) e se determinar o limite de proporcionalidade (f_{CP}), é recomendada a velocidade de carregamento de $1\text{KN}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ ($100\text{Kgf}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$). Na execução do ensaio, recomenda-se a obtenção de pelo menos dez leituras dos carregamentos e seus respectivos deslocamentos para, com estes valores, se determinar o módulo de elasticidade do material. Deve-se anotar na folha de ensaios:

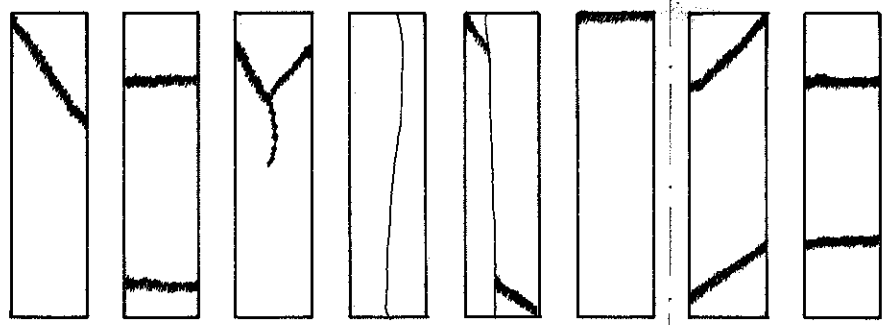
- (a) a média das dimensões do corpo de prova (b_0, b_1, L) e o comprimento de medida (l);
- (b) os valores de P (N) e Δl (mm);
- (c) as formas de ruptura observadas (esquemas, croquis, fotos).

Uma folha de ensaio com os registros necessários à aquisição de informações que permitam obter os valores acima referidos é esquematizada no Quadro I.

Os valores serão analisados por lotes e devem ter determinados:

- . o módulo de elasticidade avaliado;
- . a tensão no limite de resistência;
- . os números de corpos de prova total e aproveitados;
- . as densidades aparentes e os teores de umidade.

São motivo de recusa de resultados os corpos de prova excluídos no item 21 e, ainda, aqueles que apresentem rupturas como as indicadas em (d), (e), (f), no Quadro I. Este critério torna-se opcional se o objetivo da realização de ensaios for caracterizar o material disponível e não apenas o material isento de defeitos.

Força (N)	$\Delta l (10^{-3} \text{ mm})$	Diferença	$\Delta l (10^{-3} \text{ mm})$	Diferença	$\Delta l (10^{-3} \text{ mm})$	Obs.
0	0	-	0	-	0	
10000	25	25	22	22	23,5	
20000	49	24	46	24	47,5	
150000	238	22	239	23	238,5	LP
160000	265	27	270	31	267,5	
212500	-	-	-	-	-	LR
						$b_0 = 5,005 \text{ cm}$ $b_1 = 5,010 \text{ cm}$ $L = 20,05 \text{ cm}$ $l = 10,00 \text{ cm}$
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(1) (2)

Quadro I - Exemplo de Tabela de Ensaio de um corpo de prova, onde:

- LP : força no limite de proporcionalidade
- LR : força no limite de resistência
- (a), (b), (c), (d), (e), (f) : formas de ruptura mais comuns
- (1) e (2) : esquema de ruptura do cp ensaiado, preenchido pelo operador do ensaio.

3- ANÁLISE DE RESULTADOS

3.1- Confeção de Gráficos Sobre o Ensaio

Uma vez obtidos os valores pareados $(P, \Delta l)$, transforma-se cada par em novas variáveis (f, ϵ) através de:

$$f = \frac{P}{b_0 \cdot b_1} \left(\frac{N}{\text{mm}^2} \right) ; \quad \epsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (2)$$

Com as novas variáveis, traça-se o gráfico $(f \times \epsilon)$, exemplificado na Figura 6.

Anotadas as resistências no limite de proporcionalidade (f_{cp}) e no limite de resistência (f_{wc}) , determina-se o módulo de elasticidade (E) :

$$E = \frac{f_{cp}}{\epsilon_{cp}} \left(\frac{N}{\text{mm}^2} \right), \quad (\text{MPa})$$

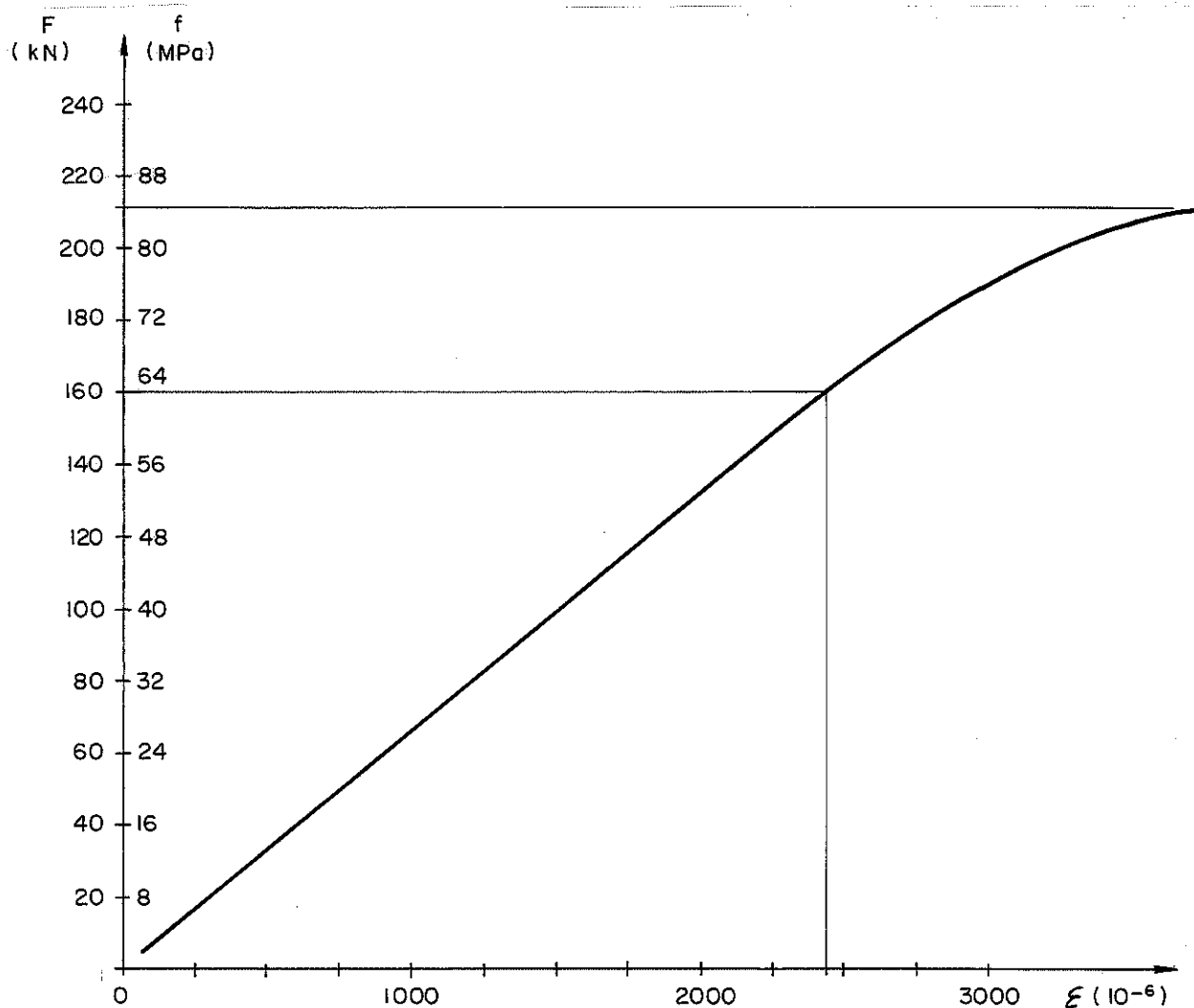


Figura 6 - Gráfico característico do ensaio de compressão paralelo às fibras

3.2- Análise por Regressão Linear

Utilizando-se o método dos mínimos quadrados, é possível a determinação do Módulo de Elasticidade (E), a partir dos pares de valores anotados no relatório de ensaio, (F, Δl). Encontra-se uma reta de correlação, do tipo $y = a + bx$, onde a e b são constantes a determinar:

$$b = \frac{\sum P \cdot \epsilon - N \cdot \bar{P} \cdot \bar{\epsilon}}{\sum P^2 - N \bar{P}^2}, \quad a = \bar{\epsilon} - b \bar{P} \quad (3)$$

utilizando

$$k = \frac{\sum P \epsilon}{\sum P^2}, \quad \bar{\epsilon} = \frac{\Delta l}{l} \quad (4)$$

encontra-se

$$E = k \cdot \frac{10^5}{A}, \quad r = \frac{\sum P \cdot \epsilon - N \bar{P} \bar{\epsilon}}{\sqrt{\sum \epsilon^2 - N \bar{\epsilon}^2} \cdot \sqrt{\sum P^2 - N \bar{P}^2}} \quad (5)$$

onde: \bar{P} e $\bar{\epsilon}$ são os valores médios do ensaio;

r é o coeficiente de correlação;

N é o número de pares de valores usados no cálculo;

A é a área de seção transversal do corpo de prova.

A reta de correlação encontrada é:

$$P = (a + b\epsilon) \cdot \frac{10^5}{N} \quad (6)$$

ANEXO II

LISTAGEM DE PROGRAMA UTILIZADO PARA O ENSAIO
DE PEÇAS COMPRIMIDAS (CAP. 5)

```

0:  dsr  "ENSAIO DE UMA PECA COMPRIMIDA DE MACARANDUBA";wait 1500
1:  dim  A[30,30],PI[26],B[30,30],W[30,30],D[30,30]
2:  dim  F[30,30],X[30],E#[1],Q#[1]
3:  ent  "NUMERO DO ENSAIO = ",E#[1]
4:  ent  "ESPESSURA DA PECA = ",T
5:  ent  "LARGURA DA PECA EM CM = ",H
6:  ent  "ALTURA DA PECA EM CM = ",L
7:  ent  "GAGE FACTOR = ",G
8:  fmt  1,9x,"ENSAIO DE UMA PECA COMPRIMIDA DE MACARANDUBA",/
9:  fmt  2,10x,"LARGURA DA PECA ..... : ",f7.2," CM ",/
10:  fmt  3,10x,"ESPESSURA DA PECA ..... : ",f7.2," CM ",/
11:  fmt  4,10x,"ALTURA DA PECA ..... : ",f7.2," CM ",/
12:  fmt  7,10x,"GAGE FACTOR ..... : ",f7.2,/
13:  wtb  705,27,38,107,50,83
14:  wrt  705.1;wrt 705.3,T;wrt 705.2,H;wrt 705.4,L
15:  wrt  705.7,G
16:  wrt  705;wrt 705
17:  fmt  7,1x,"CARGA(KGF)",30x,"DEFORMACOES NOS EXTENSOMETROS(x10(-6))"
18:  fmt  9,f11.0,z
19:  wrt  705.7
20:  wrt  705;wrt 705
21:  fmt  8,20x,z
22:  wrt  705.8
23:  for  I=1 to 6;wrt 705.9,I;next I
24:  wrt  705
25:  wrt  705
26:  for  I=1 to 26
27:  ent  "PROXIMA CARGA",Q#[I]
28:  wrt  709,"AC10";red 709,X[I]
29:  (I-1)*500)P[I]
30:  OK
31:  wrt  709,"AF0"
32:  wrt  709,"AL6"
33:  wrt  709,"AC0"
34:  for  J=1 to 7
35:  K+1)K
36:  red 709,A[I,K]
37:  wrt  709,"AS";wrt 709,"VT1"
38:  next J
39:  for  C=1 to 7
40:  A[I,C1/X[I]]B[I,C]
41:  next C
42:  fmt  1,3x,f4.0,x,z
43:  for  Q=1 to 7
44:  A[I,Q1/X[I]]-B[I,Q]D[I,Q]
45:  -8*D[I,Q1/(G*(1+2*D[I,Q]))W[I,Q]
46:  next Q
47:  for  Z=1 to 7
48:  W[I,Z1-W[I,7]]F[I,Z]
49:  F[I,Z1*10(-6)F[I,Z]
50:  next Z
51:  fmt  1,f8.0,z
52:  wrt  705.1,P[I]
53:  fmt  4,18x,z
54:  wrt  705.4
55:  for  J=1 to 6
56:  fmt  2,f11.2,z
57:  wrt  705.2,F[I,J]
58:  next J
59:  fmt  3,
60:  wrt  705.3
61:  next I
62:  end

```