

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
Departamento de Estruturas

# CLASSIFICAÇÃO ESTRUTURAL DE PEÇAS DE MADEIRA

Eng.º MARCOS FURIATI

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



COMISSÃO EXAMINADORA

Dr. João Cesar Hellmeister-Orientador (EESC-USP)  
Dr. José Elias Laier (EESC-USP)  
Dr. Péricles BrasiLiense Fusco (EPUSP)

SÃO CARLOS, setembro de 1981

Para  
Aldo, Lúcia e Nídia,  
pelo sacrifício, amor e compreensão.

## MEUS SINCEROS AGRADECIMENTOS

Ao Prof. JOÃO CESAR HELLMEISTER, pelo tema proposto, pelo incentivo, apoio moral e material demonstrados.

Ao Prof. JOSÉ FERREIRA DE CARVALHO, pela colaboração prestada nas análises estatísticas desenvolvidas neste trabalho.

À minha esposa, pela incansável e paciente ajuda nas revisões dos manuscritos, pelo amor e compreensão sem precedentes.

Ao Sr. ANGELO DE ÁVILA, pela dedicação com que executou as revisões finais deste trabalho.

Ao Sr. LUCAS SEABRA DA COSTA, pelo esmero com que fez os desenhos.

Aos colegas e funcionários do LaMEM, pela contribuição na realização dos ensaios, pelo intercâmbio de idéias e pelo apoio manifestado.

Ao CONSELHO NACIONAL DE PESQUISA - CNPq, pela ajuda financeira.

A todos que de uma forma ou de outra colaboraram para a realização deste trabalho.

## R E S U M O

O presente trabalho tem por objetivo principal apresentar um processo de Classificação de Peças Estruturais de Madeira, pela Resistência, com a finalidade de aplicá-las com segurança e economia.

São apresentados, inicialmente, os fundamentos do primeiro processo utilizado para a classificação de peças de madeira: a "Classificação Visual". Em linhas gerais, este processo baseia-se nas características de crescimento da árvore, tais como a orientação das fibras, o número de nós, o número de fendas e o número de anéis anuais existentes na madeira.

Através do conhecimento dos princípios básicos da "Classificação Visual", relativos às alterações nas propriedades físicas e mecânicas da madeira, e da realização de diversos ensaios de peças estruturais, em laboratório, foi possível a sistematização de um processo de selecionamento da madeira, com base em sua resistência, definindo-se assim a Classificação Estrutural desenvolvida neste trabalho.

## SUMÁRIO

	<u>PÁGINA</u>
I. INTRODUÇÃO.....	06
I.1 - GENERALIDADES.....	06
I.2 - DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO DE CLASSIFICAÇÃO DA MADEIRA.....	07
I.3 - FUNDAMENTOS DA "CLASSIFICAÇÃO VISUAL" E DA CLASSIFICAÇÃO ESTRUTURAL.....	12
II. DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂ- NICAS DA MADEIRA.....	32
II.1 - DENSIDADE.....	32
II.2 - UMIDADE.....	34
II.3 - MÓDULO DE ELÁSTICIDADE E TENSÃO DE RUPTURA NA FLEXÃO ESTÁTICA.....	35
III. IDEALIZAÇÃO DO ENSAIO DE OBRA PARA A DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELÁSTICIDADE.....	38
III.1 - O ENSAIO DE OBRA.....	39
III.2 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS.....	42
IV. ANÁLISE DE REGRESSÃO E CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁ- VEIS.....	50
IV.1 - ENSAIOS PRELIMINARES.....	50
IV.2 - DETERMINAÇÃO DA EQUAÇÃO DE REGRESSÃO DEFI- NITIVA.....	59
V. CLASSIFICAÇÃO DA MADEIRA.....	65
V.1 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS.....	65
V.2 - ESTABELECIMENTO DAS CATEGORIAS PARA A CLAS- SIFICAÇÃO DA MADEIRA.....	71
V.3 - APLICAÇÃO DOS RESULTADOS.....	77
VI. EXPERIMENTAÇÃO EM LABORATÓRIO.....	86
VI.1 - INTRODUÇÃO.....	86
VI.2 - DEFINIÇÃO DOS MODELOS ESTRUTURAIIS.....	87
VI.3 - MODELO ESTRUTURAL Nº 1.....	88
VI.3.1 - ENSAIOS PRELIMINARES.....	88
VI.3.2 - CONSTRUÇÃO DOS MODELOS.....	90
VI.3.3 - ENSAIOS PRINCIPAIS.....	91

	<u>PÁGINA</u>
VI.4 - MODELO ESTRUTURAL Nº 2.....	96
VI.4.1 - ESTUDO DOS MODELOS REDUZIDOS.....	96
VI.4.2 - CONSTRUÇÃO DOS MODELOS REDUZIDOS EM ESCALA 1:3.....	102
VI.4.2.1 - ENSAIOS PRELIMINARES.....	102
VI.4.2.2 - CONSTRUÇÃO DOS MODELOS E MONTAGEM DOS APARE- LHOS DE ENSAIO.....	109
VI.4.3 - ENSAIO DO ARCO Nº 1.....	110
VI.4.3.1 - INSTALAÇÃO DOS APARE- LHOS MEDIDORES DE DE- FORMAÇÃO.....	110
VI.4.3.2 - DISTRIBUIÇÃO DAS PEÇAS PARA O ARCO Nº 1.....	112
VI.4.4 - ENSAIO DO ARCO Nº 2.....	121
VI.4.4.1 - INSTALAÇÃO DOS APARE- LHOS MEDIDORES DE DE- FORMAÇÃO.....	121
VI.4.4.2 - DISTRIBUIÇÃO DAS PEÇAS PARA O ARCO Nº 2.....	121
 VII.    COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÕES.....	 129
VIII.   BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	130

## I - INTRODUÇÃO

### I.1 - GENERALIDADES

De acordo com a nova filosofia de segurança das estruturas, exige-se frequentemente maior conhecimento do material a ser empregado, com a finalidade de aplicá-lo adequadamente, ou seja com segurança e economia. Desenvolveu-se, então, uma tecnologia considerável para o controle das propriedades físicas e mecânicas de materiais como o concreto e o aço. Para estes materiais tornou-se possível minimizar as variáveis que afetam seus elementos constituintes, e consequentemente, promover maior segurança em suas utilizações. Dentro deste enfoque de segurança estrutural, é inadmissível o uso de qualquer material desprovido de controle tecnológico sobre suas propriedades.

Entretanto, para as espécies de madeira de aplicação estrutural, não se verificou avanço tecnológico semelhante ao que ocorreu com o aço e o concreto. Ao invés disto, as normas que regulamentam o uso das estruturas de madeira mantem-se inalteradas desde 1951, recomendando apenas o "Boletim 185 do Forest Products Laboratory", como critério para a classificação de peças de madeira, enquanto inexistirem especificações brasileiras. Pretende-se, portanto, com este trabalho elaborar, através da Classificação pela Resistência, um controle tecnológico deste material a fim de que possa ser usado racionalmente, desta forma permitindo:

- a) maior segurança na construção;
- b) economia de madeira e
- c) ampliação dos vãos livres das estruturas de madeira, geralmente reduzidos no Brasil.

## I.2 - DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO DA CLASSIFICAÇÃO DA MADEIRA

Desde os tempos imemoriais o homem tem utilizado a madeira, de uma forma ou de outra, para satisfazer as suas necessidades. Provavelmente, este é o mais antigo material de construção que se conhece, quiçá anterior à utilização da própria pedra, empregado que foi nas construções polafíticas.

As facilidades de obtenção e adaptação aos fins desejados permitiram seu uso pelas populações primitivas, mesmo com os escassos meios então disponíveis.

Como material de construção, a madeira apresenta uma série de vantagens dificilmente reunidas em outro material, a saber:

- a) pode ser obtida em grandes quantidades a preços razoáveis, relativamente baixos. As reservas podem ser renovadas, tornando o material permanentemente disponível;
- b) pode ser produzida em peças com dimensões estruturais que permitem desdobrar-se rapidamente em peças menores, de excepcional delicadeza;
- c) pode ser trabalhada com ferramentas simples, e ser reempregada várias vezes com aproveitamento econômico;
- d) foi o primeiro material empregado capaz de resistir tanto a esforços de compressão como de tração;
- e) possui massa específica baixa e grande resistência mecânica. Apresenta resistência à compressão equivalente ao concreto de alta resistência, sendo superior ao mesmo quanto à flexão e cisalhamento;
- f) permite fáceis ligações e emendas e, como consequência, uma grande flexibilidade na montagem ou na substituição de peças na estrutura;
- g) não estilhaça quando golpeada. Sua resiliência permite absorver choques que romperiam ou fendilhariam outro material;
- h) apresenta boas condições naturais de isolamento térmico, absorção acústica, e grande variedade de padrões;

Em contraposição, apresenta as seguintes e principais desvantagens que devem ser cuidadosamente levadas em consideração no seu emprego, como material de construção, a saber:

- a) é combustível;
- b) é um material fundamentalmente heterogêneo e anisótropo;
- c) é bastante vulnerável aos agentes externos (umidade, fungos, insetos, etc.), e sua durabilidade quando desprotegida, é limitada;
- d) mesmo depois de transformada (madeira reconstituída, madeira aglomerada e madeira compensada), ainda é um material muito sensível aos agentes ecológicos, aumentando ou diminuindo de dimensões com as variações de temperatura e umidade.

Tais inconvenientes determinaram, em certa época, que a madeira fosse suplantada pelo aço e concreto armado, e relegada à execução de estruturas provisórias - cimbres e formas.

Na moderna técnica de utilização da madeira na construção civil, algumas destas características negativas podem ser atenuadas.

A madeira natural, não tratada, pega fogo espontaneamente em temperaturas da ordem de 275°C. Isso acontece quando há suficiente oxigênio em contato com ela, para que tenha lugar a combustão. No início, esta combustão é superficial: forma-se uma verdadeira cortiça de madeira dura, meio calcinada, sem as primitivas características físico-mecânicas, não possuindo mais gases de fácil inflamação.

Mantendo-se a temperatura em torno de 275°C, o fogo interrompe quando a espessura da madeira calcinada atinge 10mm, aproximadamente. Constata-se, por outro lado, que, num incêndio normal, a velocidade de combustão da madeira é da ordem de 10mm cada 15 minutos.

Aumentando-se a temperatura exterior, a madeira continua a queimar e, em certos casos, alimenta o incêndio. De qualquer maneira, num incêndio de 1000°/1100° C, um viga maciça não rompe rapidamente, ela conserva durante certo tempo uma

relativa resistência mecânica, ocorrendo o colapso por diminuição da seção transversal. Um perfil metálico, ao contrário, tem sua resistência completamente alterada e pode entrar em colapso, por escoamento da resistência do metal, com temperaturas da ordem de 300°C.

As peças de madeira com mais de 50cm de espessura podem ser empregadas normalmente: do ponto de vista de segurança, sempre serão menos perigosas que as metálicas. Além disso, existem no comércio numerosos produtos que são ignífugos ou retardantes do fogo, que atenuam, significativamente, a combustibilidade da madeira.

A heterogeneidade e anisotropia, próprias da constituição fibrosa da madeira, são atenuadas por processos de beneficiamento. Estes processos consistem em uma reestruturação do material através do rearranjo de suas fibras resistentes: são os denominados processos de transformação das madeiras.

Os principais tipos de madeira transformada existentes no comércio são os seguintes:

1º) Madeira Laminada: são tábuas de pequena espessura associadas umas as outras por colagem resistente, de maneira a compor peças com seções adequadas.

2º) Madeira Laminada Compensada: são diversas lâminas finas de madeira, coladas umas sobre as outras, de maneira que as fibras de uma disponham normalmente em relação às lâminas vizinhas.

3º) Madeira Aglomerada: são fragmentos menores de madeiras - aparas, virutas - aglomerados com cimentos minerais ou resinas, sob pressão variada.

4º) Madeira Reconstituída: consiste na reaglomeração de fibras celulósicas, sob pressão, tendo como aglomerante as resinas sintéticas. Esta reaglomeração dá origem a um novo material no qual as fibras deixam de ter orientação predominante.

Há outros produtos que poderiam ainda ser identificados como madeira transformada: madeira comprimida ou densificada, madeiras impregnadas com resinas, plásticos ou metais de baixo ponto de fusão, etc. Estas madeiras, no entanto, não tem maior interesse como material de construção civil.

O importante é que em todos os processos de transfor

mação da madeira, se obtêm valiosos beneficiamentos, a saber:

- a) satisfatória homogeneidade de composição e razoável isotropia no comportamento físico e mecânico;
- b) possibilidades ampliadas de secagem e efetivos tratamentos de preservação e ignifugação, quando o material, antes da aglomeração está reduzido a lâminas finas ou pequenos fragmentos;
- c) melhoria, em relação à madeira natural, de determinadas características físicas (retrabilidade, peso específico) ou mecânicas (cisalhamento, fendilhamento, etc.), por meio de alternativas nos processos de fabricação;
- d) fabricação de chapas e blocos com dimensões adequadas à moderna tecnologia de pré-fabricação modular;
- d) finalmente, apresentam a grande vantagem econômica de representar um aproveitamento integral de todo o material lenhoso contido nas árvores;

A durabilidade das madeiras é a resistência que apresentam aos agentes de alteração e destruição de seu tecido lenhoso: fungos insetos, etc.

Verifica-se que a durabilidade natural nas madeiras é uma característica extremamente relativa, pois depende não somente de fatores decorrentes da própria natureza do material - espécie lenhosa, cerne ou alburno, presença de taninos, óleos e resinas em seus vasos lenhosos -, como também de fatores externos, relacionadas às condições de temperatura e umidade. No entanto, como para os demais materiais de construção, pode ser-lhe incorporada vantajosamente, processos adequados de tratamento e preservação de grande eficiência, como é mostrado na prática .

A umidade, responsável pelo surgimento de tensões internas, é anulada pelos processos de secagem artificial controlada o que, além de necessária, apresenta algumas vantagens a saber:

- a) Diminui consideravelmente o peso do material, favorecendo o transporte e o projeto das estruturas.
- b) A madeira seca torna-se estável.

- c) Na medida em que for sendo eliminada a água de impregnação do tecido lenhoso, a resistência do material aumentará de maneira considerável e progressiva.
- d) A madeira seca é mais resistente aos agentes de deterioração, principalmente à ação de fungos, que necessitam de teores elevados de umidade para sobreviver.
- e) Os produtos de impregnação nos processos de preservação das madeiras, para atingirem uma penetração satisfatória, exigem determinado estágio de secagem ou, pelo menos, ausência de água livre.
- f) A madeira precisa estar seca para receber pintura ou envernizamento de proteção.

Entretanto, quando a madeira é submetida à secagem natural ou à artificial mal conduzida, surgem os chamados defeitos de secagem que compreendem as rachaduras, fendas, empenamentos, etc. Estes defeitos, bem como os defeitos naturais, oriundos do crescimento anômalo da árvore (nós, desvios de veio, e deslocamento entre as fibras ou entre anéis de crescimento), interferem decisivamente na resistência da madeira (Fig. 1).

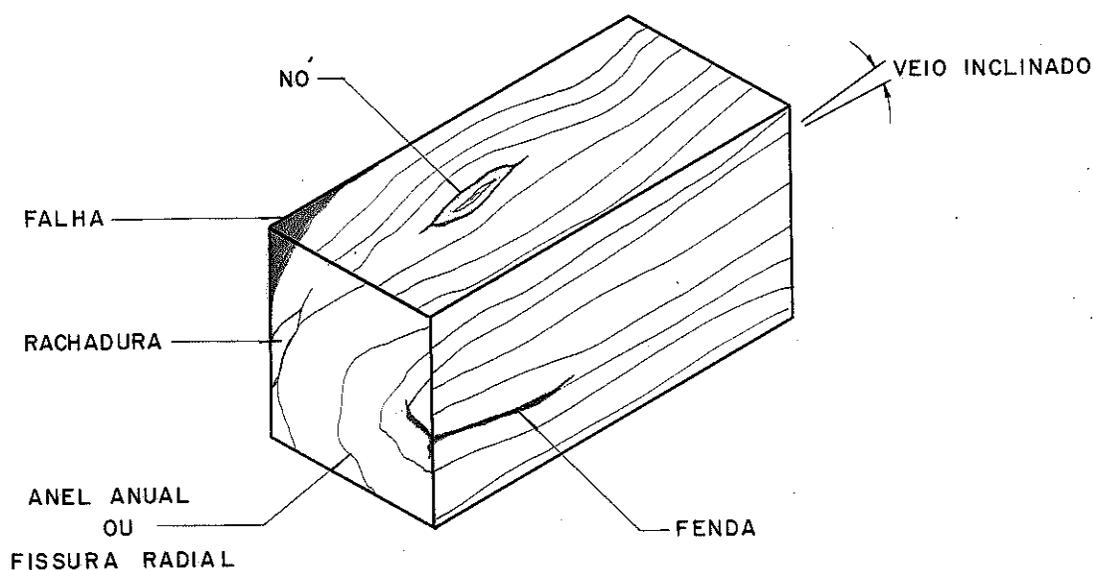


FIG. 1 PRINCIPAIS DEFEITOS DA MADEIRA

Pela presença frequente dos defeitos de secagem e dos defeitos naturais (que não podem ser combatidos por quaisquer processos de beneficiamento) nas peças de madeira, utilizadas em estruturas, houve a necessidade de classificá-las em categorias-padrão de qualidade, conforme sua resistência mecânica. Tais categorias são definidas por especificações que limitam os principais defeitos e o tipo de peça.

As especificações, portanto, além de tipificar os defeitos permissíveis em cada categoria, fixam sua localização, dimensão e grupamentos em função da redução que determinam na resistência das peças, em comparação com a resistência de peças idênticas isentas de defeitos.

Somente a classificação tecnológica das peças de madeira permite uma avaliação inicial da madeira. Esta classificação, conhecida por "Classificação Visual", é detalhada no próximo item.

### I.3 - FUNDAMENTOS DA "CLASSIFICAÇÃO VISUAL" E DA CLASSIFICAÇÃO ESTRUTURAL

As peças de madeira de uma determinada espécie, fornecidas pelas serrarias, possuem propriedades diversas, mesmo aparentando relativa ausência de defeitos naturais, tais como: nós, fibras transversas, rachaduras e outras características de crescimento. De modo idêntico, essas peças denunciam grande variação de resistência e serventia. Assim, considerando-se que se faça uma comercialização convenientemente ordenada por parte das serrarias, torna-se imprescindível a fixação de classes de qualidade, que venham possibilitar ao consumidor adquirir madeiras de determinada qualidade e em qualquer quantidade.

Entretanto, essa sistemática ainda não foi adotada no Brasil, nem mesmo foram elaboradas regras para o controle e utilização racional deste material, motivo pelo qual a comercialização da madeira continua sendo tão arbitrária como a sua própria utilização, em nosso país.

A Norma Brasileira (NB-11), que regulamenta o uso da madeira em aplicações estruturais, permanece inalterada até o presente momento, no que concerne ao controle tecnológico deste material e recomenda apenas o "Boletim-185" do Forest Products Laboratory", como critério a ser utilizado na "Classificação Visual".

A "Classificação Visual", descrita a seguir, consiste em avaliar a presença de defeitos naturais através de inspeção visual, e em seguida, classificar a madeira segundo regras normalizadas. Todavia, não há especificação de defeitos citados na "NB-11", e por esse motivo torna-se necessário recorrer-se a outras normas.

A Norma Americana, "D-245 - Parte 22", baseia-se no antigo "Boletim 185 do Forest Products Laboratory, Guide to the Grading of Structural Timbers, 1934", no qual são fixadas as limitações dos principais defeitos para três classes de peças estruturais, a saber:

- a) Vigas e Longarinas;
- b) Caibros e Pranchas;
- c) Postes e Colunas.

As dimensões nominais e os requisitos de utilização de cada uma dessas classes são as seguintes:

- a) Vigas e Longarinas, que são peças retangulares de seção transversal de 5 x 8 pol. ou mais, classificadas, principalmente, para resistirem a esforços de flexão quando o carregamento for aplicado em sua face estreita:
- b) Caibros e Pranchas, que são peças retangulares de seção transversal, variando de 2 a 4 pol. de espessura por 4 pol., ou mais, de largura, classificadas para resistirem a esforços de flexão tanto na face estreita, como na face larga;
- c) Postes e Colunas, que são peças quadradas de seção transversal, de 4 x 4 pol., ou mais, classificadas, principalmente, para resistirem a esforços de compressão, embora possam ser utilizadas para outros fins, nos quais a flexão não seja a solicitação predominante.

Para estas três classes estruturais, são especificados os defeitos máximos permissíveis a serem obedecidos para uma determinada categoria de resistência. As categorias de resistência, para uma determinada classe, são especificações de resistência que variam de 50 a 100%, em relação à madeira ver

de, isenta de defeitos. Assim, por exemplo, uma capacidade de resistência de 75% aplica-se a uma categoria na qual a redução máxima de resistência compara-se a 25% da madeira verde, isenta de defeito. Isto significa que as categorias de resistência são estabelecidas em função do tipo de solicitação para a qual a peça se destina e do defeito máximo permissível existente na madeira.

Sabe-se por exemplo, que o veio transverso (fibra não paralela ao eixo da peça) é prejudicial em peças submetidas a esforços de compressão paralela, visto que o mesmo origina componentes de tensão que agem através dele, em cuja direção a madeira é mais fraca. Além disso, o veio transverso contribui para o rápido empenamento das peças, por ocasião da variação do teor de umidade da madeira.

Os nós interrompem a direção das fibras dando origem ao veio transverso localizado, com pronunciadas inclinações, e quando estão localizados próximos às fibras extremas de uma viga, reduzem consideravelmente sua resistência à flexão e à tração, na proporção da largura que eles ocupam na viga.

As fendas reduzem a resistência ao cisalhamento em peças solicitadas à flexão, e admite-se que este efeito seja aproximadamente proporcional à redução da área resistente ao cisalhamento. Entretanto, as fendas não afetam a resistência de peças submetidas a esforços de compressão paralela, cuja limitação de emprego de tais peças, neste caso, deve-se tão somente ao fato de que as fendas contribuem para o rápido apodrecimento da madeira.

Por influírem muito pouco na resistência da madeira, normalmente despreza-se a presença de bolsas de resina no estabelecimento de categorias de resistência. Entretanto, se determinado número de bolsas de resina se situar dentro de uma camada de crescimento, é possível que exista separação entre estas camadas; e, em razão disso, a peça deve ser cuidadosamente examinada para certificar-se se houve ocorrência de fendas.

Os buracos são provocados pelas quedas dos nós, por insetos e vermes que atacam a madeira, ou por instrumentos utilizados no manejo das toras. O principal efeito, causado pela

presença dos buracos na resistência da madeira, é a diminuição da área útil numa seção transversal, e os requisitos de aproveitamento, neste caso, são os mesmos adotados para os nós.

Seguem-se, abaixo, diversas formas para o desenvolvimento de especificações das categorias de resistência, referentes às três classes, com espaços em branco a serem preenchidos, conforme as indicações dadas nas tabelas de 1 a 7.

A. - Requisitos de Especificações para Vigas e Longarinas de Categoria \_\_\_\_\_:

1º) - As capacidades de resistência desta categoria são \_\_\_\_\_%, para a tensão de flexão na fibra extrema, e \_\_\_\_\_% para a tensão de cisalhamento.

2º) - Uso principal: como vigas com cargas aplicadas na face estreita.

3º) - Dimensões nominais: de 5 pol. ou mais de espessura por 8 pol. ou mais de largura. Em todo o comprimento da peça, não é permitido uma variação no serramento da mesma, que exceda 1/4 de pol. da dimensão nominal. Além disso, nenhuma remessa de madeira poderá conter mais de 20% de peças com dimensões abaixo da dimensão nominal.

4º) - Qualidade da madeira: não é permitido o uso de madeira excepcionalmente leve.

5º) - Apodrecimento: somente serão aceitas peças de madeira isentas de defeito, livres de qualquer forma de apodrecimento incipiente, ou que contenham partes levemente apodrecidas.

6º) - Inclinação do veio: deve ser medida numa grande extensão, sem levar em conta pequenos desvios locais. Na metade central do comprimento da peça, a inclinação não poderá exceder a \_\_\_\_\_.

7º) - O tamanho de um nó, numa face larga, é o seu menor diâmetro.

89) - O tamanho de um nó, numa face estreita, é medido pela sua largura entre as linhas que o circundam, paralelas às extremidades da peça. Quando o nó estender-se até a quarta parte da largura da face adjacente, sua medida será a sua menor dimensão.

99) - A soma dos diâmetros de todos os nós, medidos na metade central do comprimento de qualquer face, não poderá exceder a quatro vezes o tamanho do maior nó admitido naquela face.

109) - Não são permitidos nós agrupados.

119) - Os buracos são medidos e limitados da mesma maneira que os nós.

129) - As fendas são medidas nas extremidades da peça. Consideram-se apenas as fendas situadas na metade central da largura ou da altura da peça. O tamanho de uma fenda é a distância entre as linhas que a circundam, paralelas às extremidades da peça, e o seu tamanho permissível é determinado em função da largura (face estreita) da peça.

139) - As rachaduras e as pequenas fissuras são medidas e limitadas da mesma maneira que as fendas. A soma dos tamanhos das fendas, rachaduras ou pequenas fissuras, não poderá exceder ao tamanho permissível da fenda admitida naquela peça. A profundidade das rachaduras, na metade central da altura da peça, não poderá exceder ao tamanho permissível da fenda.

149) - Em qualquer ponto de qualquer face, a chanfradura não poderá exceder a \_\_\_\_\_ da largura da face.

B. - Requisitos de Especificações para Caibros e Pranchas de Categoria \_\_\_\_\_:

19) - As capacidades de resistência dessa categoria são \_\_\_\_\_%, para a tensão de flexão na fibra extrema, e \_\_\_\_\_% para a tensão de cisalhamento.

29) - Uso principal: como vigas com cargas aplicadas, tanto na face estreita como na face larga.

39) - Dimensões nominais: de 2 a 4 pol. de espessura por 4 pol. ou mais de largura. Em todo o comprimento da peça, não é permitido uma variação no serramento da mesma, que

exceda 1/4 de pol. da dimensão nominal. Além disso, nenhuma remessa de madeira poderá conter mais de 20% de peças com dimensões abaixo da dimensão nominal.

49) - Qualidade da madeira; não é permitido o uso de madeira excepcionalmente leve.

59) - Apodrecimento: somente serão aceitas peças de madeira isentas de defeito, livres de qualquer forma de apodrecimento incipiente, ou que contenham partes levemente apodrecidas.

69) - Inclinação do veio: deve ser medida numa grande extensão, sem se levar em conta pequenos desvios locais. Na metade central do comprimento da peça, a inclinação não poderá exceder a \_\_\_\_\_.

79) - O tamanho de um nó, numa face larga, é o seu diâmetro médio, isto é, a média aritmética dos diâmetros dos nós contidos nesta face. O tamanho de um nó alongado é a média aritmética da soma do seu maior comprimento com a sua maior largura.

89) - O tamanho de um nó, numa face estreita, é medido pela sua largura entre as linhas que o circundam, paralelas às extremidades da peça. Os nós medidos, nesta face, não podem estender-se nas faces largas adjacentes.

99) - A soma dos diâmetros de todos os nós, medidos na metade central de qualquer face, não poderá exceder a quatro vezes e meia o tamanho do maior admitido naquela face.

109) - Não são permitidos nós agrupados.

119) - Os buracos são medidos e limitados da mesma maneira que os nós.

129) - As fendas são medidas nas extremidades da peça. Consideram-se apenas as fendas situadas na metade central da largura ou da altura da peça. O tamanho de uma fenda é a distância entre as linhas que a circundam, paralelas às extremidades da peça, e o seu tamanho permissível é determinado em função da largura (face estreita) da peça.

139) - As rachaduras e as pequenas fissuras são medidas e limitadas da mesma maneira que as fendas. A soma dos tamanhos das fendas, rachaduras ou pequenas fissuras, não pode-

rã exceder ao tamanho permissível da fenda admitida naquela peça. A profundidade das rachaduras, na metade central da altura da peça, não poderá exceder ao tamanho permissível da fenda.

149) - Em qualquer ponto de qualquer face, a chanfradura não poderá exceder a \_\_\_\_\_ da largura da face.

C. - Requisitos de Especificações para Postes e Colunas de Categoria \_\_\_\_\_:

19) - A capacidade de resistência desta categoria é \_\_\_\_\_%, para a tensão de compressão paralela às fibras.

29) - Uso principal: como postes ou colunas submetidas a esforços de compressão paralela.

39) - Dimensões nominais: de 4 por 4 pol. ou mais. Em todo o seu comprimento, nenhuma peça com dimensões compreendidas entre 3 a 7 pol. não poderá exceder mais do que 3/16 de pol. da dimensão nominal, e nem mais do que 1/4 de pol. da dimensão nominal quando esta for de 8 pol. ou mais. Além disso, nenhuma remessa poderá conter mais de 20% de peças com dimensões abaixo da dimensão nominal.

49) - Qualidade da madeira: não é permitido o uso de madeira excepcionalmente leve.

59) - Apodrecimento: somente serão aceitas peças de madeira isentas de defeito, livres de qualquer forma de apodrecimento incipiente ou que contenham partes levemente apodrecidas.

69) - Inclinação do veio: deve ser medida numa grande extensão, sem se levar em conta pequenos desvios locais. Em qualquer parte da peça, a inclinação não poderá exceder a \_\_\_\_\_.

79) - O tamanho de um nó é a média aritmética dos diâmetros dos nós contidos nesta face. O tamanho de um nó alongado é a média aritmética da soma do seu comprimento com a sua largura.

89) - A soma dos diâmetros de todos os nós, medidos num comprimento de 6 pol. da peça, não poderá exceder a duas vezes o tamanho do maior nó admitido naquela face, e dois nós

com diâmetro igual ao máximo permissível, não poderão situar-se num mesmo comprimento de 6 pol.

99) - Não são permitidos nós agrupados.

109) - Os buracos são medidos e limitados da mesma que os nós.

119) - As fendas são medidas nas extremidades da peça, e o seu tamanho é a distância entre as linhas que a circundam, paralelas às faces.

129) - As rachaduras e as pequenas fissuras são medidas e limitadas da mesma maneira que as fendas. A soma dos tamanhos das fendas, rachaduras ou pequenas fissuras, não poderá exceder ao tamanho permissível da fenda. A profundidade das rachaduras, na metade central da dimensão da peça, não poderá exceder ao tamanho permissível da fenda.

139) - Em qualquer ponto de qualquer face, a chanfradura não poderá exceder a          da largura da face.

A seguir, são apresentadas as tabelas que fornecem os valores a serem inseridos nas partes em branco, das especificações anteriores, para que se estabeleçam as categorias com a capacidade de resistência desejada. Estas tabelas incluem informações que permitem a descrição de especificações, para categorias com resistências dentro de um intervalo de 50 a 100%, em relação à resistência da madeira verde isenta de defeitos.

#### A. - Inclinação do Veio

A tabela 1 fornece os coeficientes de resistência para a tensão de flexão nas fibras extremas e para a tensão de compressão paralela às fibras, em função de diversas inclinações do veio.

INCLINAÇÃO DO VEIO	COEFICIENTE MÁXIMO DE RESISTÊNCIA	
	PARA A TENSÃO DE FLEXÃO NA FIBRA EXTERNA (VIGAS E LONGARINAS - PARTE VI ) OU CAIBROS E PRANCHAS	PARA A TENSÃO DE COM- PRESSÃO PARALELA AS FIBRAS ( POSTES E COLUNAS - PARTE VI )
	( PORCENTAGENS - % )	( PORCENTAGENS - % )
I EM 6	—	56
I EM 8	53	66
I EM 10	61	74
I EM 12	69	82
I EM 14	74	87
I EM 15	76	100
I EM 16	80	100
I EM 18	85	100
I EM 20	100	100

TABELA 1 - COEFICIENTES DE RESISTÊNCIA CORRESPONDENTES AS VÁRIAS INCLINAÇÕES DO VEIO

#### B. - Nós

Os coeficientes de resistência, para diferentes combinações de tamanho de nós em função das larguras das peças, estão indicadas nas tabelas 2, 3 e 4.

A tabela 2 fornece os coeficientes de resistência para a tensão de flexão nas fibras extremas, de nós situados na face estreita, e na terça parte central do comprimento da peça. Esses coeficientes são válidos para Vigas e Longarinas, Caibros e Pranchas.

A tabela 3 fornece os coeficientes de resistência para a tensão de flexão nas fibras extremas, de nós situados na face larga, e ao longo da linha central do comprimento da peça. Esses coeficientes são válidos tanto para Vigas e Longarinas, como para Postes e Colunas.

Para os Postes e Colunas, esta tabela fornece os coeficientes de resistência para a tensão de compressão, de nós situados em qualquer ponto e em qualquer face da peça.

A tabela 4 fornece os coeficientes de resistência para a tensão de flexão nas fibras extremas, de nós situados na face larga, e na terça parte central do comprimento da peça. Esses coeficientes são válidos para Caibros e Pranchas.

TAMANHO DO NÓ (POL.)	COEFICIENTES DE RESISTÊNCIA (%) PARA PEÇAS COM LARGURAS NOMINAIS (POL.)										TAMANHO DO NÓ (POL.)	COEFICIENTES DE RESISTÊNCIA (%) PARA PEÇAS COM LARGURAS NOMINAIS (POL.)									
	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16		2	3	4	5	6	8	10	12	14	16
1/4"	90	93	95	96	96	97	97	97	98	98	2 5/8"					57	63	67	70	72	74
3/8"	83	89	92	93	94	95	96	96	96	97	2 3/4"					55	61	65	68	70	72
1/2"	77	85	88	91	92	93	94	95	95	95	2 7/8"					53	59	63	67	69	71
5/8"	71	81	85	88	90	92	92	93	94	94	3"					51	57	62	65	68	70
3/4"	65	76	82	86	88	90	91	92	92	93	3 1/8"					55	60	64	66	68	
7/8"	58	72	79	83	86	88	89	90	91	91	3 1/4"					54	59	62	65	67	
1"	52	68	76	81	84	86	88	89	89	90	3 3/8"					52	57	61	64	66	
1 1/8"		64	73	78	82	84	86	87	88	89	3 1/2"					50	55	59	62	65	
1 1/4"		60	70	76	80	83	84	86	87	88	3 5/8"					54	58	61	63		
1 3/8"		56	67	73	78	81	83	84	85	86	3 3/4"					52	56	59	62		
1 1/2"		51	63	71	76	79	81	83	84	85	3 7/8"					50	55	58	61		
1 5/8"			60	68	74	77	80	81	83	84	4"							53	57	60	
1 3/4"			57	66	71	75	78	80	81	83	4 1/8"							52	55	58	
1 7/8"			54	63	69	73	76	78	80	81	4 1/4"							50	54	57	
2"			51	61	67	72	75	77	79	80	4 3/8"								53	56	
2 1/8"				58	65	70	73	75	77	79	4 1/2"								51	54	
2 1/4"				56	63	68	71	74	76	77	4 5/8"								50	53	
2 3/8"				53	61	66	70	72	74	76	4 3/4"									52	
2 1/2"				51	59	64	68	71	73	75	4 7/8"										51

TABELA 2 - COEFICIENTES DE RESISTÊNCIA CORRESPONDENTES A VÁRIAS COMBINAÇÕES DE TANHOS DE NÓS E LARGURA DAS PEÇAS

TAMANHO DO NÓ (POL.)	COEFICIENTES DE RESISTÊNCIA (%) PARA PEÇAS COM LARGURAS NOMINAIS (POL.)												TAMANHO DO NÓ (POL.)	COEFICIENTES DE RESISTÊNCIA (%) PARA PEÇAS COM LARGURAS NOMINAIS (POL.)											
	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24		4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
1/4"	95	96	96	97	98	98	98	98	99	99	99	99	4 1/2"					55	63	66	68	70	71	73	74
1/2"	88	91	92	94	95	96	96	97	97	97	97	97	4 3/4"					53	61	64	66	68	70	71	72
3/4"	82	86	88	91	93	94	94	95	95	95	96	96	5"					50	59	62	64	66	68	70	71
1"	76	81	84	88	90	92	93	93	93	94	94	94	5 1/4"					57	60	62	65	66	68	69	
1 1/4"	70	76	80	85	88	90	91	91	92	92	93	93	5 1/2"					54	58	61	63	65	66	68	
1 1/2"	63	71	76	82	85	88	89	89	90	91	91	91	5 3/4"					52	56	59	61	63	65	66	
1 3/4"	57	66	71	79	83	86	87	88	88	89	89	90	6"					50	54	57	59	61	63	65	
2"	51	61	67	75	80	84	85	86	87	87	88	88	6 1/4"						52	55	58	60	62	63	
2 1/4"		56	63	72	78	82	83	84	85	86	86	87	6 1/2"						50	53	56	58	60	62	
2 1/2"		51	59	69	75	79	81	82	83	84	85	85	6 3/4"							52	54	57	59	60	
2 3/4"			55	66	73	77	79	80	82	82	83	84	7"							50	53	55	57	59	
3"			51	63	70	75	77	79	80	81	82	83	7 1/4"								51	53	56	57	
3 1/4"				60	68	73	75	77	78	79	80	81	7 1/2"									52	54	56	
3 1/2"				57	65	71	73	75	76	78	79	80	7 3/4"									50	53	55	
3 3/4"				54	63	69	71	73	75	76	77	78	8"										51	53	
4"				50	60	67	69	71	73	74	76	77	8 1/4"											52	
4 1/4"					58	65	67	70	71	73	74	75	8 1/2"												50

TABELA 3 - COEFICIENTES DE RESISTÊNCIA CORRESPONDENTES A VÁRIAS COMBINAÇÕES DE TANHOS DE NÓS E LARGURA DAS PEÇAS

TAMANHO DO NÓ (POL.)	COEFICIENTES DE RESISTÊNCIA (%) PARA PEÇAS COM LARGURAS NOMINAIS (POL.)												TAMANHO DO NÓ (POL.)	COEFICIENTES DE RESISTÊNCIA (%) PARA PEÇAS COM LARGURAS NOMINAIS (POL.)											
	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	4		6	8	10	12	14	16	18	20	22	24		
1/4"-----	90	93	95	96	97	97	97	97	97	97	98	2 3/4"-----				53	60	63	65	66	68	69	71		
3/8"-----	84	89	92	93	94	95	95	95	96	96	96	2 7/8"-----				51	58	61	63	65	67	68	69		
1/2"-----	78	85	89	91	92	93	93	94	94	94	95	3"-----				50	57	60	62	64	65	67	68		
5/8"-----	73	81	86	89	90	91	92	92	93	93	93	3 1/8"-----					55	58	60	62	64	66	67		
3/4"-----	68	78	83	86	88	89	90	91	91	91	92	3 1/4"-----					54	57	59	61	63	64	66		
7/8"-----	63	74	80	84	87	88	88	89	89	90	90	3 3/8"-----					52	55	58	60	62	63	65		
1"-----	58	71	77	82	85	86	87	87	88	89	89	3 1/2"-----					51	54	56	58	60	62	63		
1 1/8"-----	53	67	75	79	83	84	85	86	86	87	88	3 5/8"-----						52	55	57	59	61	62		
1 1/4"-----		64	72	77	81	82	83	84	85	86	86	3 3/4"-----						51	54	56	58	60	61		
1 3/8"-----		60	69	75	79	80	82	83	83	84	85	3 7/8"-----						50	52	55	57	58	60		
1 1/2"-----		57	67	73	77	79	80	81	82	83	84	4"-----							51	53	55	57	59		
1 5/8"-----		54	64	71	75	77	78	80	81	81	82	4 1/8"-----							50	52	54	56	58		
1 3/4"-----		51	62	69	74	75	77	78	79	80	81	4 1/4"-----								51	53	55	57		
1 7/8"-----			59	67	72	74	75	77	78	79	80	4 3/8"-----								50	52	54	55		
2"-----			57	65	70	72	74	75	76	77	78	4 1/2"-----									51	53	54		
2 1/8"-----				55	63	68	70	72	74	75	76	4 5/8"-----									50	51	53		
2 1/4"-----				52	61	67	69	71	72	73	75	4 3/4"-----										50	52		
2 3/8"-----				50	59	65	67	69	71	72	73	4 7/8"-----											51		
2 1/2"-----					57	63	66	68	69	71	72	5"-----											50		
2 5/8"-----					55	62	64	66	68	69	71														

TABELA 4 - COEFICIENTES DE RESISTÊNCIA CORRESPONDENTES A VÁRIAS COMBINAÇÕES DE TAMANHOS DE NÓS E LARGURA DAS PEÇAS

Desejando-se, por exemplo, encontrar os tamanhos permissíveis de nós situados numa peça com dimensões nominais de 8 x 16 pol., para um coeficiente de resistência de flexão na fibra extrema de 70%, procede-se da seguinte maneira: para a face menor, procura-se na tabela 2 a coluna que indica um coeficiente de resistência igual ou maior do que 70%. e verifica-se, na primeira coluna da esquerda (Tamanho do Nó), a dimensão permissível de 2 1/8 de pol. O mesmo coeficiente de resistência para a face de 16 pol., é encontrado na tabela 3 e indica o nó permissível de 4 1/4 de pol. Portanto, os tamanhos permissíveis são: 2 1/8 na face de 8 pol. e 4 1/4 ao longo da linha central da face de 16 pol.

G. - Fendas

As tabelas 5 e 5A fornecem os coeficientes de resistência para a tensão de cisalhamento na flexão, correspondentes às várias combinações de tamanho de fendas e larguras das peças.

A tabela 5 fornece os coeficientes de resistência relativos ao material verde, para Vigas e Longarinas, Caibros e Pranchas:

TAMANHO DAS FENDAS (POL.)	COEFICIENTES DE RESISTÊNCIA (%) PARA PEÇAS COM ESPESSURAS NOMINAIS (POL.)										TAMANHO DAS FENDAS (POL.)	COEFICIENTES DE RESISTÊNCIA (%) PARA PEÇAS COM ESPESSURAS NOMINAIS (POL.)									
	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16		2	3	4	5	6	8	10	12	14	16
1/4"	90	93	95	96	96	97	98	98	98	99	3"				51	63	70	75	79	81	
3/8"	83	89	92	93	94	96	97	97	98	98	3 1/4"					60	68	73	77	80	
1/2"	77	85	88	91	92	94	95	96	97	97	3 1/2"					57	65	71	75	78	
5/8"	71	81	85	88	90	93	94	95	96	96	3 3/4"					54	63	69	73	77	
3/4"	65	76	82	86	88	91	93	94	95	96	4"					50	60	67	72	75	
7/8"	58	72	79	83	86	90	92	93	94	95	4 1/4"						58	65	70	74	
1"	52	68	76	81	84	88	90	92	93	94	4 1/2"						55	63	68	72	
1 1/8"		64	73	78	82	86	89	91	92	93	4 3/4"						53	61	66	71	
1 1/4"		60	70	76	80	85	88	90	91	92	5"						50	59	65	69	
1 3/8"		56	67	73	78	83	87	89	90	92	5 1/4"							57	63	67	
1 1/2"		51	63	71	76	82	85	88	90	91	5 1/2"							54	61	66	
1 5/8"			60	68	74	80	84	87	89	90	5 3/4"							52	59	64	
1 3/4"			57	66	71	79	83	86	88	89	6"							50	57	63	
1 7/8"			54	63	69	77	82	85	87	88	6 1/4"								56	61	
2"			51	61	67	75	80	84	86	88	6 1/2"								54	60	
2 1/8"				58	65	74	79	83	85	87	6 3/4"								52	58	
2 1/4"				56	63	72	78	82	84	86	7"								50	56	
2 3/8"				53	61	71	77	81	83	85	7 1/4"									55	
2 1/2"				51	59	69	75	79	82	85	7 1/2"									53	
2 5/8"					57	68	74	78	81	84	7 3/4"									52	
2 3/4"					56	66	73	77	81	83	8"									50	
2 7/8"					53	65	72	76	80	82											

TABELA 5 - COEFICIENTES DE RESISTÊNCIA CORRESPONDENTES A VÁRIAS COMBINAÇÕES DE TAMANHOS DE FENDAS E ESPESSURA DAS PEÇAS

A tabela 5A fornece os coeficientes de resistência relativos ao material seco, para Vigas e Longarinas, Caibros e Pranchas:

TAMANHO DAS FENDAS (POL.)	COEFICIENTES DE RESISTÊNCIA (%) PARA PEÇAS COM ESPESSURAS NOMINAIS (POL.)										TAMANHO DAS FENDAS (POL.)	COEFICIENTES DE RESISTÊNCIA (%) PARA PEÇAS COM ESPESSURAS NOMINAIS (POL.)										
	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16		2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	
1/4"-----	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	3 1/2"-----					48	64	74	80	85	88	
3/8"-----	94	100	100	100	100	100	100	100	100	100	3 3/4"-----						60	71	78	83	86	
1/2"-----	87	95	100	100	100	100	100	100	100	100	4"-----						57	68	75	81	85	
5/8"-----	80	91	96	99	100	100	100	100	100	100	4 1/4"-----						53	65	73	79	83	
3/4"-----	73	86	93	97	99	100	100	100	100	100	4 1/2"-----						50	62	71	77	81	
7/8"-----	66	81	89	94	97	100	100	100	100	100	4 3/4"-----							59	68	75	79	
1"-----	59	77	85	91	94	99	100	100	100	100	5"-----							57	66	73	78	
1 1/8"-----	52	72	82	88	92	97	100	100	100	100	5 1/4"-----							54	64	71	76	
1 1/4"-----		67	78	85	90	95	99	100	100	100	5 1/2"-----							51	61	69	74	
1 3/8"-----		62	75	82	87	94	97	100	100	100	5 3/4"-----								59	67	72	
1 1/2"-----		58	71	80	85	92	96	99	100	100	6"-----								57	65	71	
1 5/8"-----		53	68	77	83	90	95	98	100	100	6 1/4"-----								54	63	69	
1 3/4"-----			64	74	80	88	93	96	99	100	6 1/2"-----								52	61	67	
1 7/8"-----			61	71	78	87	92	95	98	100	6 3/4"-----								50	59	65	
2"-----				57	68	76	85	90	94	97	7"-----									57	64	
2 1/8"-----				54	66	73	83	89	93	96	7 1/4"-----										55	62
2 1/4"-----				50	63	71	81	88	92	95	7 1/2"-----										53	60
2 3/8"-----					60	69	80	86	91	94	7 3/4"-----										51	58
2 1/2"-----					57	66	78	85	89	93	8"-----											56
2 5/8"-----					54	64	76	83	88	92	8 1/4"-----											55
2 3/4"-----					52	62	74	82	87	91	8 1/2"-----											53
2 7/8"-----						59	73	81	86	90	8 3/4"-----											51
3"-----						57	71	79	85	89	9"-----											49
3 1/4"-----						52	67	76	82	87												

**TABELA 5A - COEFICIENTES DE RESISTÊNCIA CORRESPONDENTES A VÁRIAS COMBINAÇÕES DE TANHOS DE FENDAS E ESPESSURA DAS PEÇAS**

A tabela 6 fornece os coeficientes de resistência para a tensão de compressão paralela às fibras, correspondentes às várias combinações de tamanho de fendas e larguras das peças. Esses coeficientes são válidos para Postes e Colunas.

TAMANHO DAS FENDAS (POL.)	MATERIAL VERDE						MATERIAL SECO					
	COEFICIENTES DE RESISTÊNCIA (%) PARA PECAS COM ESPESSURAS NOMINAIS (POL.)						COEFICIENTES DE RESISTÊNCIA (%) PARA PECAS COM ESPESSURAS NOMINAIS (POL.)					
	4	5	6	8	10	12	4	5	6	8	10	12
3/4"	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1"	95	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1 1/4"	87	95	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1 1/2"	79	89	95	100	100	100	92	100	100	100	100	100
1 3/4"	72	82	89	98	100	100	84	95	100	100	100	100
2"	64	76	84	94	100	100	76	88	97	100	100	100
2 1/4"	56	70	79	90	97	100	68	82	91	100	100	100
2 1/2"	48	63	74	87	94	99	61	76	86	99	100	100
2 3/4"		57	69	83	91	97	53	70	81	95	100	100
3"		51	63	79	88	94	45	63	76	91	100	100
3 1/4"			58	75	85	92		57	71	87	97	100
3 1/2"			53	71	82	89		51	65	83	94	100
3 3/4"			48	67	79	86			60	80	91	99
4"				63	75	84			55	76	88	96
4 1/4"				59	72	81			50	72	85	94
4 1/2"				55	69	79				68	82	91
4 3/4"				51	66	76				64	79	88
5"					63	73				60	75	86
5 1/4"					60	71				56	72	83
5 1/2"					57	68				52	69	81
5 3/4"					54	65				48	66	78
6"					50	63					63	75
6 1/4"						60					60	73
6 1/2"						58					57	70
6 3/4"						55					54	68
7"						52					50	65
7 1/4"						50						62
7 1/2"												60
7 3/4"												57
8"												55
8 1/4"												52
8 1/2"												49

TABELA 6-COEFICIENTES DE RESISTÊNCIA CORRESPONDENTES  
A VÁRIAS COMBINAÇÕES DE TANHOS DE FEN.  
DAS E ESPESSURA DAS PECAS

D. - Chanfraduras

A tabela 7 fornece os coeficientes de resistência correspondentes às várias larguras de chanfraduras para a tensão de flexão nas fibras extremas de Vigas e Longarinas,

Caibros e Pranchas, e para a tensão de compressão paralela às fibras de Postes e Colunas:

LARGURAS DE CHANFRADURAS-FRAÇÃO DA LARGURA DA FACE NOMINAL	COEFICIENTE DE RESISTÊNCIA
1/4 -----	ENTRE 50% E 60%
1/5 -----	ACIMA DE 60% E ABAIXO DE 66%
1/6 -----	ACIMA DE 66% E ABAIXO DE 75%
1/8 -----	ACIMA DE 75% E ABAIXO DE 87%
1/10 -----	ACIMA DE 87%

**TABELA 7- COEFICIENTES DE RESISTÊNCIA CORRESPONDENTES A VÁRIAS LARGURAS DE CHANFRADURAS**

E. - Exemplo de Aplicação das tabelas 1 a 7, para a Elaboração de Especificações de Categorias de Resistência

1º) - Os coeficientes de resistência desta categoria são 70%, para tensão de flexão nas fibras extremas e de 75% para a tensão de cisalhamento na flexão.

2º) - Uso principal: como vigas, com cargas aplicadas na face estreita.

3º) - Dimensões nominais: de 5 x 8 pol., com as mesmas restrições especificadas para Vigas e Longarinas.

4º) - Qualidade da madeira: não é permitido o uso de madeira excepcionalmente leve.

5º) - Apodrecimento: não é permitido.

6º) - Inclinação do veio: não maior do que 1 em 14.

7º) - Tamanho do nó: o tamanho máximo permissível para a face de 5 pol. é de 1 e 1/2 pol. na terça parte central do comprimento da peça e de 2 1/4 de pol. para a face de 8 pol. ao longo da linha central dessa face.

8º) - Tamanho da fenda: o tamanho da fenda não deve exceder a 1 1/4 de pol. da largura de uma peça de madeira verde e nem 1 5/8 de pol. da largura de uma peça de madeira seca.

99) - A chanfradura em qualquer ponto de qualquer face não deve exceder a 1/6 de pol. da largura da face.

As Normas Alemãs classificam a madeira em três categorias:

- a) de alta resistência;
- b) de resistência comum;
- c) de baixa resistência.

Nestas normas, como em todas as demais, são fixados valores máximos permissíveis:

- a) dos diâmetros dos nós, segundo suas localizações;
- b) da quantidade de nós, que é determinada pela soma de seus diâmetros em determinado comprimento da peça;
- c) da inclinação do veio.

A tabela 8, anexa, resume uma indicação de defeitos permissíveis em cada categoria de madeira.

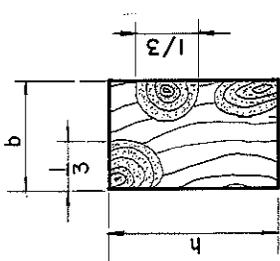
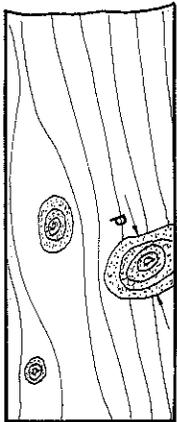
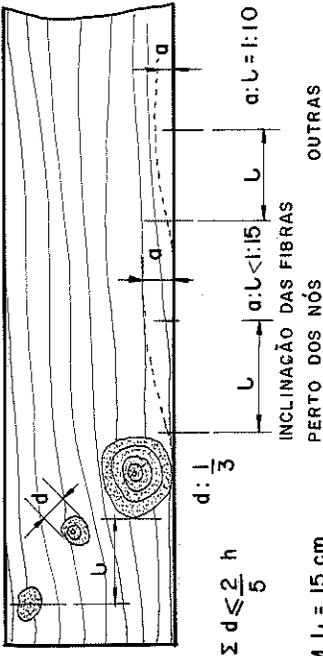
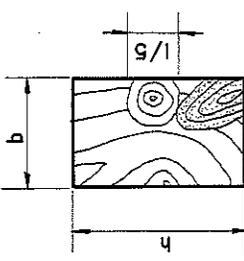
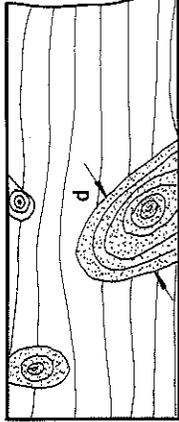
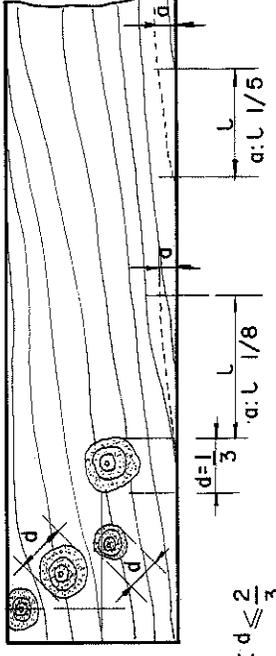
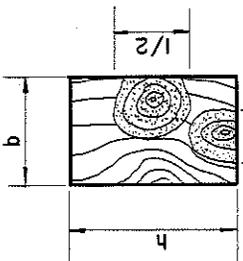
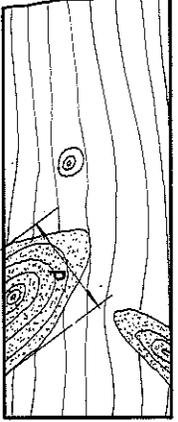
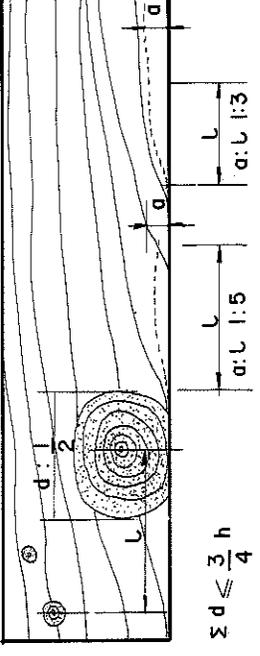
No Brasil, existe apenas uma classificação de madeira de pinho para exportação, que poderia ser adotada para fins de classificação visual (Decreto 30/835, de 21/12/1951).

Esta classificação é apresentada na tabela 9.

As regras de utilização da "Classificação Visual", como as próprias normas comprovam, são conservadoras e, no Brasil, restritas a uma única espécie de madeira.

Observa-se ainda, que estas regras não são utilizadas na prática, pois:

- a) é possível, dentro de um lote de madeira, separar intuitivamente as peças de boa qualidade das demais, com a mesma eficiência, menos trabalho e mais rapidez;
- b) dentre as peças de boa aparência, é impossível pela "Classificação Visual", saber-se quais as mais resistentes ou melhores sob o ponto de vista estrutural.

<p>MADEIRA DE 1ª QUALIDADE</p> <p>(DE ALTA RESISTÊNCIA)</p>	 <p>PARA COMPRESSÃO E FLEXÃO b:h 1/2 OUTROS CASOS 1/5</p>	<p>LADO COM NÓS INCLINADOS</p>  <p>DIÂMETRO DO MAIOR NÓ 5 cm; <math>d \leq \frac{1}{5} h</math></p>	<p>LADO COM NÓS REDONDOS</p>  <p><math>\Sigma d \leq \frac{2}{5} h</math> EM L = 15 cm INCLINAÇÃO DAS FIBRAS PERTO DOS NÓS <math>\alpha:L = 1:10</math> OUTRAS <math>\alpha:L = 1:5</math></p>
<p>MADEIRA DE 2ª QUALIDADE</p> <p>(DE RESISTÊNCIA COMUM)</p>	 <p>PARA COMPRESSÃO E FLEXÃO b:h 1/2 OUTROS CASOS 1/3</p>	 <p>DIÂMETRO DO MAIOR NÓ 7 cm; <math>d \leq \frac{1}{3} h</math></p>	 <p><math>\Sigma d \leq \frac{2}{3}</math></p>
<p>MADEIRA DE 3ª QUALIDADE</p> <p>(DE BAIXA RESISTÊNCIA)</p>	 <p>PARA COMPRESSÃO E FLEXÃO b:h 1/2 OUTROS CASOS 1/3</p>	 <p>DIÂMETRO DO MAIOR NÓ 8 cm; <math>d \leq \frac{3}{4} h</math></p>	 <p><math>\Sigma d \leq \frac{3}{4} h</math></p>

ESQUEMA DE CLASSIFICAÇÃO DE DEFEITOS

- TABELA 8. -

**Defeitos permitidos nas madeiras de pinho de 1ª e 2ª categorias\***

D E F E I T O S	Dimensões máximas permitidas relativamente às faces e outras limitações	
	Madeira de 1ª categoria	Madeira de 2ª categoria
<b>NÓS</b>		
a) Nas faces estreitas	1/4 da espessura	2/5 da espessura
b) Nas faces largas (marginais)	1/8 da largura	1/5 da largura
c) Nas faces largas (centrais)	1/4 da largura	2/5 da largura
<b>FIO DIAGONAL E FIO TORCIDO</b>		
	1/14 (em flexão)	1/10 (em flexão)
	1/11 (em compressão)	1/8 (em compressão)
<b>FENDAS</b> (limitadas para os esforços de corte)		
	1/3 da largura em madeira abrigada	1/2 da largura em madeira abrigada
	1/4 da larg. em madeira exposta ao tempo.	2/5 da larg. em madeira exposta ao tempo.
<b>DESCAIMENTO</b> (medido na face mais larga)	1/6 a 1/8 da largura	1/4 a 1/5 da largura
<b>EMPENOS</b> (medidos num comprimento de 3m)		
a) Em arco	6 mm	12 mm
b) Em hélice	Ângulo de 3°	Ângulo de 6°
c) Em meia cana (medido em seção transversal)	1 mm em 10mm	2mm em 10mm
d) Em aduela	Não permitido	Não permitido
<b>BOLSAS DE RESINA</b>	Permitidas, quando em pequeno numero	Permitidas
<b>ATAQUES DE INSETOS</b>	Não permitidos	Permitidos quando devidos a xilófagos que só atacam a madeira na árvore.
<b>ATAQUES DE FUNGOS</b>		
a) Ardido	Não permitido	Permitido
b) Cardido	Não permitido	Permitido quando for muito limitado em extensão.
c) Azulado	Permitidas pequenas manchas.	Permitido
d) Podridões	Não permitidas	Não permitidas

\* Estas categorias são definidas por forma a corresponderem a material com 85% e 60% da resistência da madeira sem defeitos.

Além disso, a adoção do "Boletim-185", como critério para a "Classificação Visual" de madeiras brasileiras, é totalmente inviável, uma vez que as condições de clima e de solo contribuem para tornar as características de crescimento da árvore, específicas a uma determinada região.

Aliados a estas dificuldades, o tempo gasto e o custo operacional, despendidos na aplicação desta Classificação, desestimularam, por certo, os engenheiros e construtores em utilizá-la.

A classificação estrutural de peças de madeira, desenvolvida neste trabalho, tem o propósito de contornar as dificuldades impostas pela "Classificação Visual", até então, em total desuso em nosso país.

Através de um grande número de pesquisas experimentais, desenvolvidas no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira, da E.E.S.C. - USP, foi comprovado o princípio básico do trabalho, que propõe uma classificação baseada na resistência efetiva da madeira.

Sabe-se que a resistência de um elemento estrutural mede-se em função da tensão que este elemento requer para se romper. Nas madeiras, a tensão de ruptura na flexão, para uma determinada espécie, varia principalmente em função dos seguintes parâmetros: módulo de elasticidade (E), densidade (D), e umidade (H). Por outro lado, tais parâmetros se interrelacionam, e dessa maneira, não é possível analisá-los isoladamente sem considerar a influência dos demais.

A relação das três variáveis apresentadas com a tensão de ruptura na flexão, e suas interrelações podem ser entendidas por um simples diagrama (Fig. 2), construído para uma determinada espécie de madeira encontrada nos Estados Unidos. (Diagrama inserto no texto "A New Approach to Stress Grading Lumber" - John F. Senft).

Este diagrama apresenta uma simples correlação entre todas as variáveis. As barras com traços cheios indicam correlação positiva, isto é, com o aumento de uma destas variáveis, mantendo as demais constantes, verifica-se um aumento na tensão de ruptura, e vice-versa. As barras tracejadas indicam correlação negativa, ou seja, com o aumento destas va

riáveis, ocorre um decréscimo na tensão de ruptura.

Os coeficientes de correlação simples apresentados serviram como indicação relativa da importância das variáveis envolvidas. Os parâmetros adotados neste trabalho, idênticos aos do diagrama acima, envolveram uma intensa análise estatística, que será apresentada posteriormente.

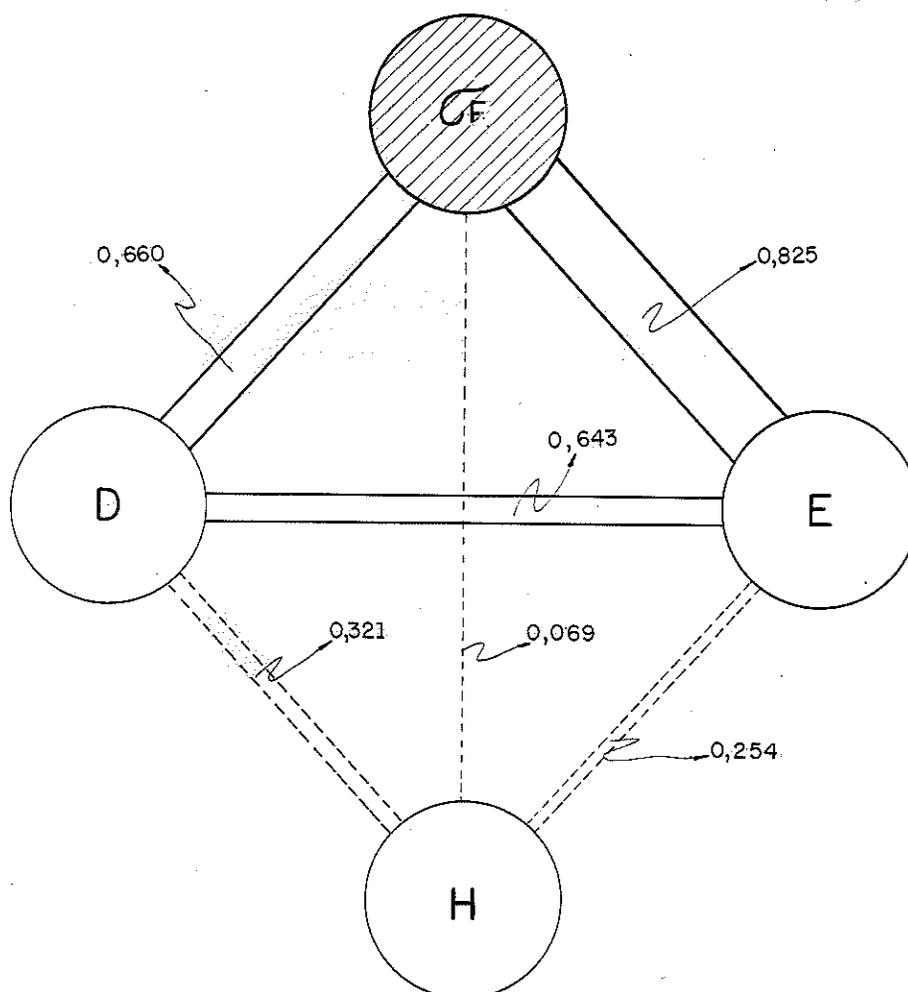


FIG.-2- CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE AS VARIÁVEIS

Evidentemente, os coeficientes de correlação simples apresentados variam segundo a espécie de madeira. Todavia, o grau de importância de cada variável, analisada estatisticamente com a tensão de ruptura na flexão, se mantém para qualquer espécie. Isto significa, por exemplo, que tanto o módulo de elasticidade como a densidade, se correlacionam sempre melhor com  $\sigma_F$  do que a umidade. Pode acontecer que o coeficiente de correlação da umidade seja mais expressivo para algumas espécies, mas nunca irá sobrepor os coeficientes de correlação das demais variáveis.

## II - DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS DA MADEIRA

As principais características físicas da madeira, densidade e umidade, motivaram inicialmente um vasto campo de pesquisas, visto serem diversos os processos empregados para o conhecimento e determinação das mesmas.

Na tese de doutoramento de J.C. Hellmeister, intitulada "SOBRE A DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA MADEIRA" - 1973, evidenciou-se a comparação dos diversos processos existentes para a determinação da densidade e verificou-se que os resultados obtidos, pela aplicação dos mesmos, diferiam ligeiramente entre si.

As características mecânicas - módulo de elasticidade e tensão de ruptura - foram determinadas a partir do ensaio de flexão estática, descrito pelo "MB-26" (MÉTODO BRASILEIRO PARA ENSAIOS DE MADEIRA), o qual adota o módulo de elasticidade à flexão para caracterizar as diversas espécies de madeira.

A idealização do "ENSAIO DE OBRA" para determinar o módulo de elasticidade (ensaio não destrutivo), realizado em condições compatíveis com as de um canteiro de obras, comparado com o ensaio destrutivo da mesma peça realizado em laboratório, permitiu encontrar a correlação estatística entre os resultados dos dois ensaios e assegurar a validade do primeiro.

É importante salientar que as características acima mencionadas foram determinadas para cada peça de madeira, e usou-se uma única espécie desta. No presente caso, escolheu-se a Peroba Rosa (ASPIDOSPERMA POLYNEURON), por ser esta espécie a mais preferida em nosso meio do ponto de vista estrutural.

### II.1 - DENSIDADE

Determina-se a densidade aparente ou simplesmente densidade da madeira, dividindo-se a massa (na unidade em que estiver o corpo de prova) pelo volume (obtido a partir de medidas com o Paquímetro ou Palmer - "DIN. 52.182" ou por des-

locamento da água - "ASTM.D-143" ou por deslocamento em mercúrio - "I.P.T.").

Os três processos, aplicados num mesmo corpo de prova, perfeitamente aparelhado, apresentam resultados ligeiramente diferentes. A imersão em água permite a absorção desta pela madeira e conseqüente penetração nos vazios superficiais. A absorção e penetração da água na madeira aliviam a balança, ocasionando alterações na leitura, o mesmo ocorrendo com a penetração de mercúrio. Um tratamento superficial com parafina, sendo a mesma hidrófuga, evita esta causa de erros mas introduz outra, qual seja a de formação de bolhas de ar muito pequenas, contudo numerosas, entre a água e o corpo de prova, alterando também a leitura da balança. Deste modo, o processo da medida do corpo de prova com o Paquímetro ou Palmer apresenta resultados menos discutíveis, além de ser mais prático.

Com o objetivo de examinar o assunto com mais precisão, o autor analisou os diversos ensaios, realizados no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM), da Escola de Engenharia de São Carlos (USP), com a finalidade de determinar a densidade pelo Método Brasileiro (imersão em mercúrio) e por medidas com o Paquímetro.

Foram ensaiados 274 corpos de prova, de dimensões de 2 x 2 x 3 cm, provenientes de três árvores da mesma espécie. Os resultados obtidos foram submetidos à análise de regressão, adotando-se o modelo linear  $Y = A + BX$ . Tomou-se o volume por medidas do Paquímetro (VM), como a variável independente, e o volume por empuxo do mercúrio (VE), como a variável dependente. O gráfico da Fig. 03 contém os pontos correspondentes aos dados "VE" e "VM", e o seguimento de reta ajustado a estes.

O teste de significância, para o coeficiente de correlação  $r = 81,35\%$  (altamente significante), indicou, ao nível de 95%, rejeição à hipótese nula, isto é, existe correlação entre os valores analisados. Optou-se, portanto, pela determinação de medidas de corpos de prova aparelhados, utilizando-se o Paquímetro.

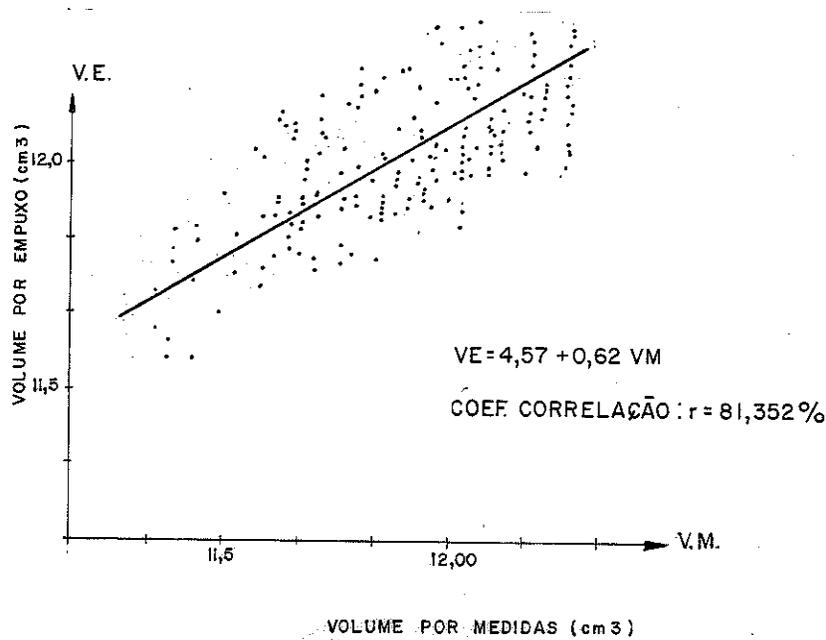


FIG.3 GRÁFICO DA EQUAÇÃO DE REGRESSÃO -  $VE = f(VM)$

## II.2 - UMIDADE

Conhecer o teor de umidade da madeira é muito importante, pois todas as propriedades mecânicas, assim como a densidade aparente, variam com o mesmo.

O teor de umidade (H) é expresso em percentagem de peso seco pela fórmula:

$$H = \frac{P_h - P_o}{P_o} \cdot 100, \text{ onde } P_o \text{ representa o peso da madeira seca em estufa, e } P_h \text{ o peso com umidade a ser determinada.}$$

Testou-se a possibilidade de utilização do "Medidor Elétrico de Umidade" (Electric Moisture Meter), todavia, dado ao pequeno tamanho do corpo de prova (2 x 2 x 3cm), tornou-se praticamente impossível a realização do teste. Decidiu-se pois

pela estufa, embora esta opção ocasione problemas de custo e de rapidez no ensaio.

### II.3 - MÓDULO DE ELASTICIDADE E TENSÃO DE RUPTURA NA FLEXÃO ESTÁTICA

O "MB-26" - método brasileiro para a realização de ensaios físicos e mecânicos de madeiras nacionais - visa a pequenos corpos de prova, isentos de defeito. Neste método, os ensaios de flexão estática são realizados em peças, apoiadas nos dois extremos, com uma carga aplicada no meio do vão livre e as flechas medidas por meio de um deflectômetro, colocado também no centro do vão e ligado a um ponto da linha neutra.

Por não haver referência, no "MB-26", a ensaios com peças grandes, procurou-se, ao estabelecerem tais ensaios, eliminar, tanto quanto possível, a influência de esforços secundários e superposições de deformações dos apoios, nas leituras das flexas. Este método, adotado pelo I.P.T., baseia-se em linhas gerais nas especificações americanas da A.S.T.M. (Standard Methods of Static Tests of Timbers in Structural Sizes - Designation: D-198-27).

Realiza-se o carregamento com duas cargas simétricas ao eixo da peça, resultando no centro uma zona de esforços cortantes nulos. (Fig. 4).

A Equação da Linha Elástica, integrada neste caso particular para o centro do vão, resulta:

$$\Delta f = \frac{P \cdot a}{24 EJ} (3l^2 - 4a^2)$$

Portanto, o módulo de elasticidade vale;

$$E = \frac{P \cdot a}{24 \cdot \Delta f \cdot J} (3l^2 - 4a^2)$$

sendo o momento fletor para o centro do vão:

$$M = P \cdot a$$

O valor na tensão máxima é expressa por:

$$\sigma = \frac{M}{J} y = 6 \frac{P \cdot a}{b \cdot h^2}$$

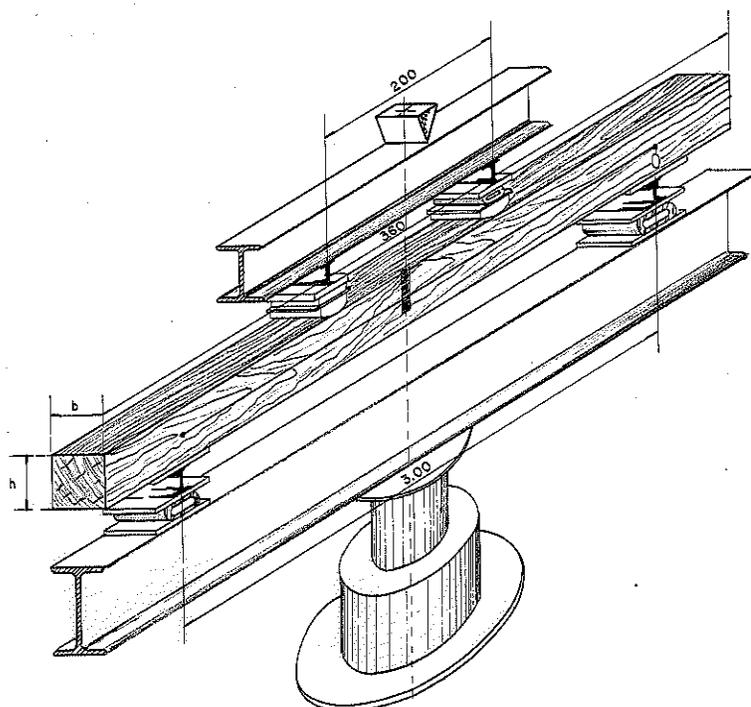
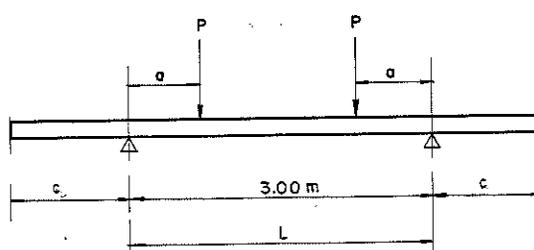


FIG. 4 DISPOSITIVO PARA ENSAIO DE FLEXÃO EM PEÇAS ESTRUTURAIS DE MADEIRA

Esquemáticamente tem-se:



A tensão de ruptura ( $\sigma_F$ ) vale portanto:

$$\sigma_F = \frac{6 PR \cdot a}{b \cdot h^2}$$
, onde PR = Carga de Ruptura, b = Lado transversal do corpo de prova, sobre o qual este se encontra apoiado, e h = Lado no plano de aplicação dos esforços.

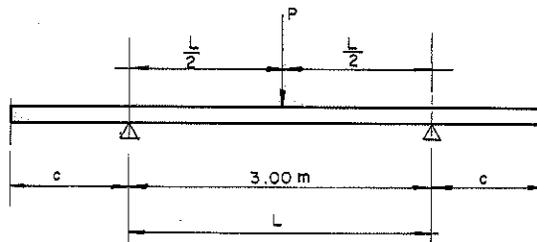
Este método de ensaio, em peças estruturais de madeira, prevê a influência dos esforços cortantes no valor da flecha. Entretanto, o "MB-26", no item 11-C, não menciona tal

influência como aspecto negativo na determinação do módulo de elasticidade em pequenos corpos de prova.

A comparação entre os dois métodos de ensaios, em peças estruturais, com a fixação do carregamento na razão de 100 Kg/cm<sup>2</sup> por minuto, apresentou valores, de módulo de elasticidade, ligeiramente diferentes (em torno de 5%), sendo que os menores valores obtidos foram devido ao ensaio, com uma única carga.

Portanto, adotou-se, neste trabalho, as mesmas recomendações especificadas pelo "MB-26", estendidas às peças com dimensões estruturais, o que além de estar a favor da segurança, reflete, com mais realidade, o comportamento estrutural do material.

Assim, a equação da Linha Elástica para o esquema adotado é:



$$\Delta f = \frac{P \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot J}$$

Resultando;

$$E = \frac{P \cdot l^3}{48 \cdot \Delta f \cdot J}$$

sendo o momento fletor para o centro do vão;

$$M = \frac{P \cdot l}{4}$$

e, a tensão de ruptura ( $\sigma_F$ ) igual a:

$$\sigma_F = \frac{3}{2} \cdot \frac{P \cdot l}{b \cdot h^2}$$

### III - IDEALIZAÇÃO DO "ENSAIO DE OBRA" PARA A DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

No item II.3, mostrou-se a maneira de realizar o ensaio de flexão estática, dentro dos padrões do "MB-26", para a determinação do módulo de elasticidade e da tensão de ruptura em peças estruturais de madeira.

Mostrar-se-á, em análises posteriores, que o módulo de elasticidade, para as diversas peças de madeira, é fator decisivo na classificação das mesmas sob o ponto de vista de suas resistências.

Sabe-se, entretanto, que no canteiro de obras dificilmente dispõe-se de um laboratório, e que, mesmo se este existisse, não se justificaria a realização do ensaio para determinar o módulo de elasticidade, pois o tempo gasto (de 10 a 15 minutos) oneraria a construção.

Com a idealização do "Ensaio de Obra", realizado em condições compatíveis com as do laboratório, reduziu-se este tempo para dois minutos apenas, permitindo-se ainda utilizar o ensaio em quaisquer condições de trabalho, com os recursos então disponíveis. Com a finalidade de observar a validade do "Ensaio de Obra", em contraposição com o "Ensaio de Laboratório", o autor realizou diversos ensaios em peças estruturais comumente encontradas no comércio. As dimensões nominais de peças de Peroba Rosa são as seguintes:

NOMENCLATURA DAS PEÇAS	DIMENSÕES	COMPRIMENTO (m)
	TRANSVERSAIS (cm)	
Ripas	1 x 5 e 1,5 x 5	4 a 6
Sarrafos	3 x 12 e 3 x 16	4 a 6
Caibros	5 x 6	4 a 6
Vigas	6 x 12 e 6 x 16	4 a 6
Postes	12 x 12	4 a 6

Não é difícil encontrar, nas boas serrarias, madeiras cortadas com outras dimensões. Os preços são relativamente elevados, mas a dispensa de mão-de-obra para serrar, emendar ou sobrepor as peças pode compensar com vantagem este aumento de custo.

### III.1 - O "ENSAIO DE OBRA"

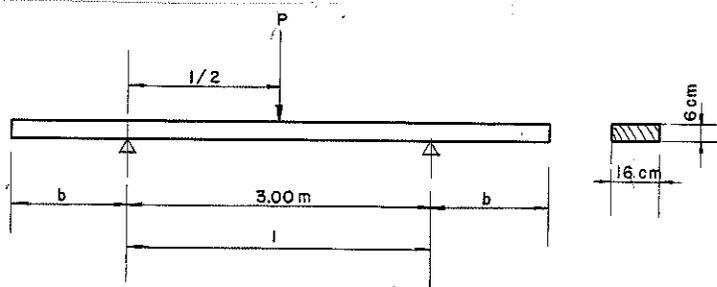
A realização de ensaio não destrutivo de flexão estática, em condições precárias de instrumentação e rigor necessários, motivou a idealização do "Ensaio de Obra".

O procedimento para a realização do "Ensaio de Obra" como será descrito a seguir, precedeu-se de exaustiva pesquisa experimental, pois, além de surgirem diversas opções de execução do mesmo, algumas delas tiveram que ser realizadas por pessoas não categorizadas, com o intuito de avaliar a eficiência do ensaio.

Deste modo, a solução a ser apresentada traz a pretensão de servir como ensaio padrão, em virtude do que acima ficou exposto.

O procedimento, para a realização do "Ensaio de Obra", é o seguinte:

- a) utilizou-se peças estruturais de madeira (Peroba Rosa), medindo até 6,00m de comprimento, com seção transversal de  $6 \times 16 \text{ cm}^2$ .
- b) cada peça, depois de colocada entre dois apoios, distanciados 3,00m um do outro, foi carregada com uma única carga no meio do vão livre;
- c) estabeleceu-se o máximo valor da carga em função da tensão admissível de flexão da espécie considerada, assim:



$$\sigma = \frac{M}{J} y; \quad \bar{\sigma}_f = 135 \text{ Kg/cm}^2$$

$$M_{\text{máx}} = \frac{P \cdot l}{4} = \frac{300 \cdot P}{4} = 75 \cdot P$$

$$J = \frac{16 \times 6^3}{12} = 288 \text{ cm}^4; y = 3 \text{ cm}$$

portanto,

$$\frac{75 \cdot P}{288} \cdot 3 < 135 \quad P < 173,00 \text{ Kg.}$$

- d) fixou-se um prego, em cada ponto de apoio da viga, para servir de suporte a um fio de nylon com pesos em suas extremidades, com a finalidade de mantê-lo esticado;
- e) no meio do vão livre da viga, fixou-se por intermédio de um parafuso regulável, um sarrafo de madeira provido de papel milimetrado. Com isso foi possível ler no papel, através do fio, a flecha inicial (devida ao peso próprio) e a flecha final com a atuação do carregamento;
- f) para uma carga conhecida (por exemplo, 20 Kg), o módulo de elasticidade pôde ser obtido pela equação da flecha:

$$E_{obra} = \frac{P \cdot l^3}{48 \cdot \Delta f \cdot J} \quad \text{ou}$$

$$E_{obra} = \frac{20 \cdot 300^3}{48 \cdot \Delta f \cdot 288} = \frac{39062,50}{\Delta f} \text{ (Kg/cm}^3\text{)}$$

O valor " $\Delta f$ " é devido ao fato do ensaio consistir de duas leituras de flecha no ponto médio do vão; a primeira com a peça sem carga, e a segunda com uma carga  $P$  igual a 20Kg. A figura 5 elucidada o que foi dito:

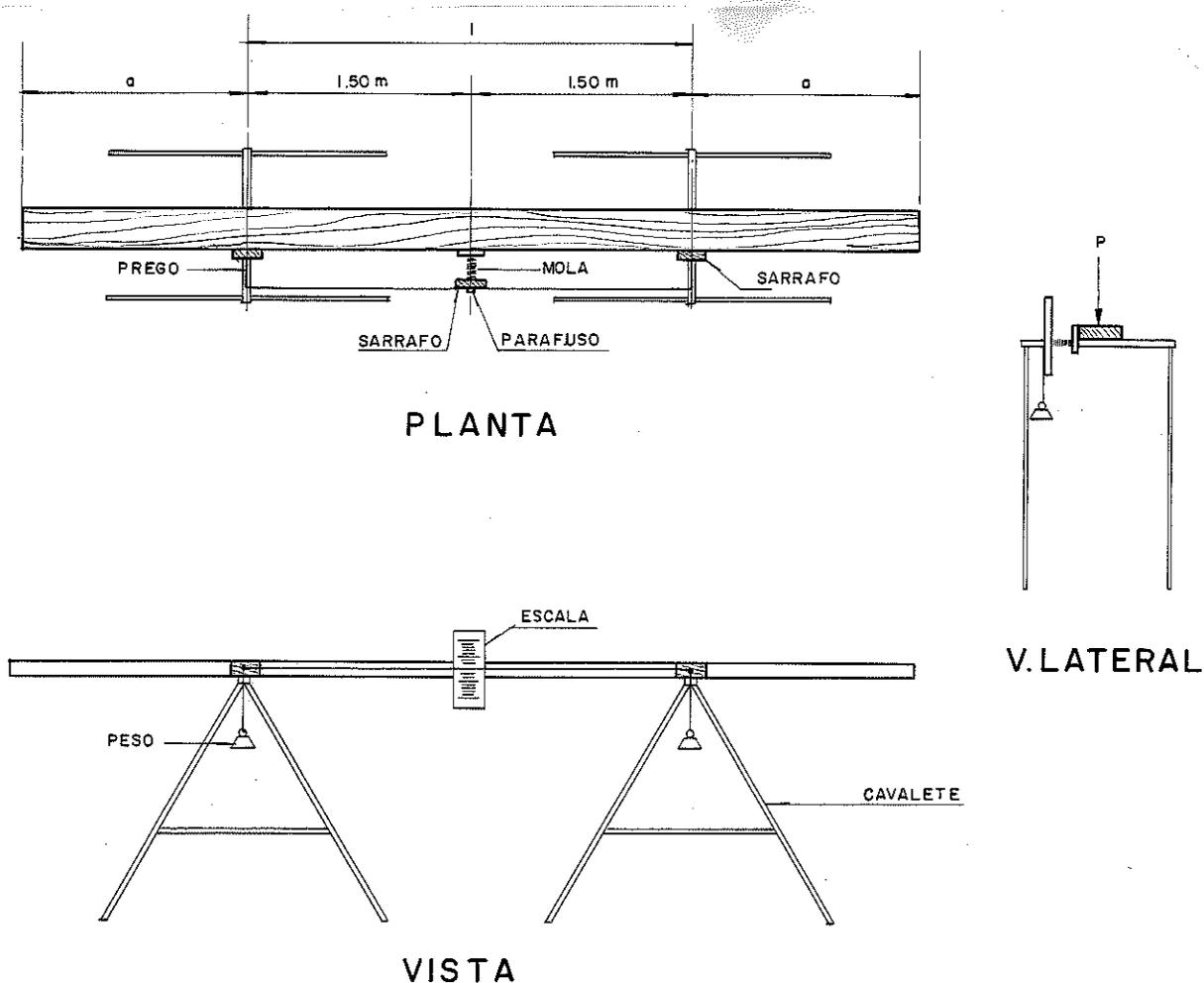


FIG.5 - DISPOSITIVO PARA ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA  
EM PEÇAS ESTRUTURAIS DE MADEIRA

Deste modo, este dispositivo de ensaio foi utilizado em todas as análises relativas a este trabalho, inclusive na elaboração de ábacos com vistas à classificação da madeira.

O carregamento foi fixado, com duas alternativas, em 50 Kg ou 20 Kg, correspondentes ao peso de um saco de cimento e um saco de cal, respectivamente, tendo em vista que estes são os pesos comumente encontrados num canteiro de obras.

Apresenta-se a seguir a comparação entre módulos de elasticidade obtidos simultaneamente, para uma mesma viga, pelo "Ensaio de Obra", utilizando-se o dispositivo apresentado e pelo "Ensaio de Laboratório", isto é, realizado em condições rigorosas de controle.

## III.2 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

O módulo de elasticidade foi determinado, respectivamente pelo "Ensaio de Obra" e pelo "Ensaio de Laboratório", numa mesma viga, na razão de 100 Kg/cm<sup>2</sup>/min., e destes ensaios resultaram os seguintes valores:

<u>Nº DA VIGA</u>	<u>EOBRA(Kg/cm<sup>2</sup>)</u>	<u>ELAB(Kg/cm<sup>2</sup>)</u>
1	129738	143070
2	119336	129610
3	132020	150819
4	109270	130281
5	143963	153559
6	157051	143358
7	153652	136387
8	118713	112601
9	157051	152498
10	142774	136092
11	130306	130090
12	89941	91643
13	66010	70728
14	133750	151916
15	157051	143989
16	164705	137470
17	90771	91157
18	136156	133472
19	102117	125120
20	166628	156885
21	136828	131953
22	80492	101300
23	117859	121851

Para cada variável, a análise estatística dos dados resultou:

<u>VARIÁVEL</u> <u>ESTATÍSTICA</u>	<u>E OBRA</u>	<u>E LAB</u>
MÉDIA	127660	129385
DESVIO PADRÃO	27733	22456
VALOR MÍNIMO	66010	70728
VALOR MÁXIMO	166628	156885
ERRO PADRÃO DA MÉDIA	5783	4682
SOMA DOS VALORES	2936182	2975849
VARIÂNCIA	769131109	504256242
COEF. VARIAÇÃO	21,74	17,36

Os gráficos de probabilidade, para cada variável (figuras 6 e 8), mostraram quão perfeita é a adaptação dos dados à Distribuição Normal. Nestes gráficos, a Distribuição Normal caracteriza-se pela maneira segundo a qual os pontos se aproximam de uma reta.

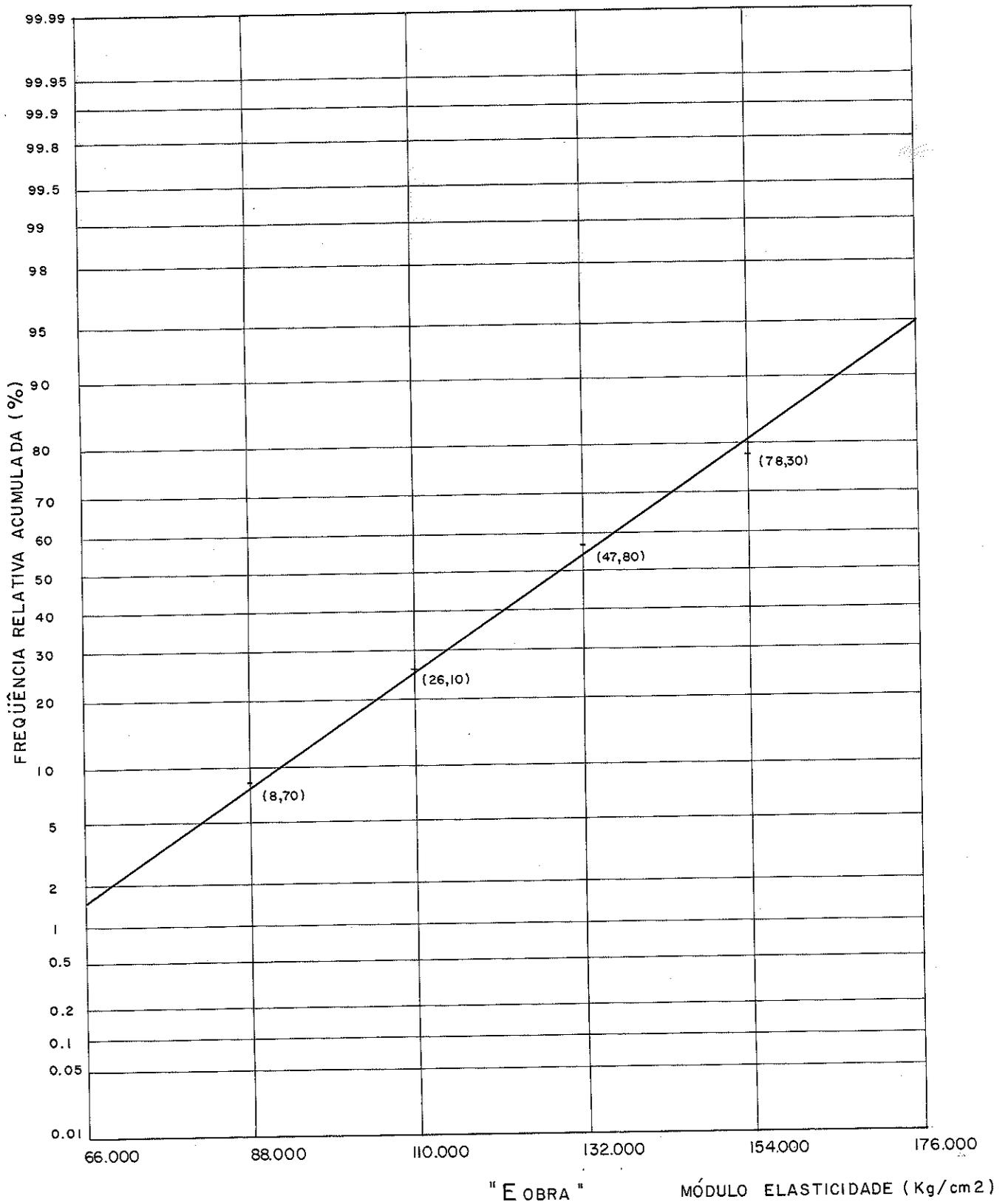


FIG. 6 GRÁFICO DE PROBABILIDADE

A prova de aderência, pelo "Teste do Qui-Quadrado", indicou, ao nível de significância de 95%, para 2 graus de liberdade, o seguinte:

$$\chi^2_{\text{calc.}} = 2,26$$

$$\chi^2_{0.95} = 5,99$$

Logo  $\chi^2_{0.95} > \chi^2_{\text{calc.}}$ , indicando ajustamento muito bom a este nível (veja página 131 da referência 06).

As distribuições de frequência, para dados agrupados, apresentaram os seguintes Histograma e Polígono de Frequência (Fig. 7).

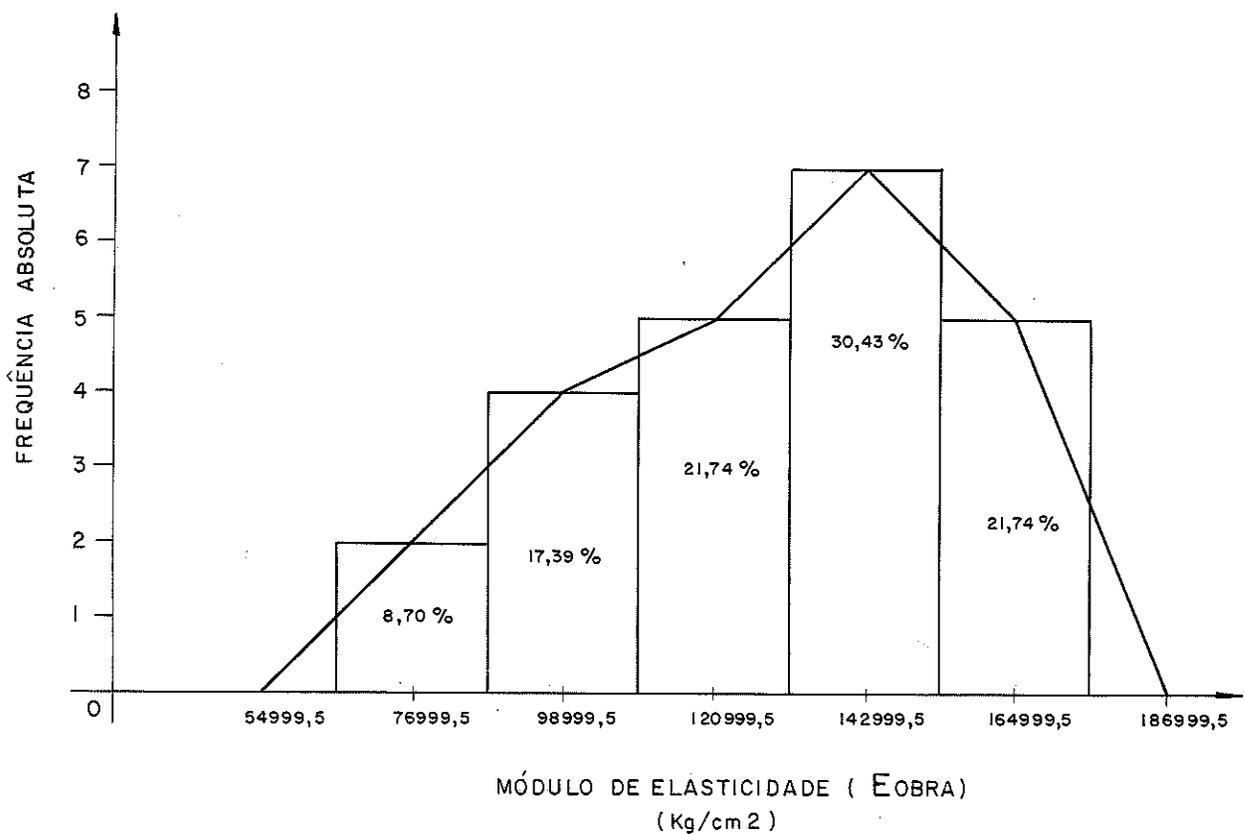


FIG. 7 HISTOGRAMA E POLÍGONO DE FREQUÊNCIA

A mesma análise, para o módulo de elasticidade obtido em laboratório, resultou no Gráfico de Probabilidade e o Histograma das figs. nºs 8 e 9.

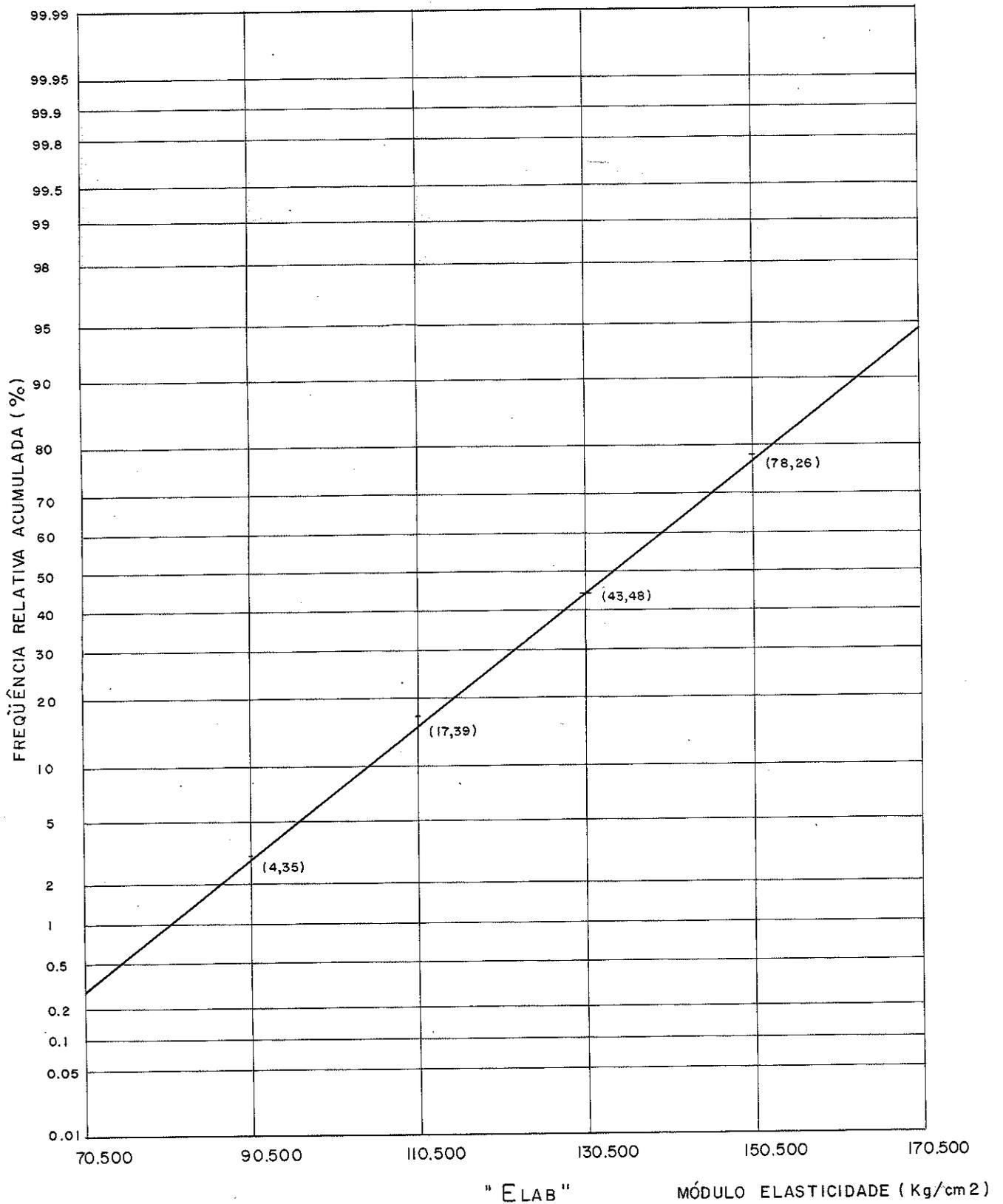


FIG. 8 "ELAB" GRÁFICO DE PROBABILIDADE

Pelo "Teste do Qui-Quadrado", a prova de aderência, ao nível de significância de 95%, para 2 graus de liberdade, resultou:

$$\chi^2_{\text{calc}} = 2,42$$

$\chi^2_{0.95} = 5.99 > \chi^2_{\text{calc.}}$ , indicando como no caso anterior, um ajustamento muito bom.

O Histograma e o Polígono de Frequência, para os dados agrupados, podem ser vistos abaixo na fig. 9.

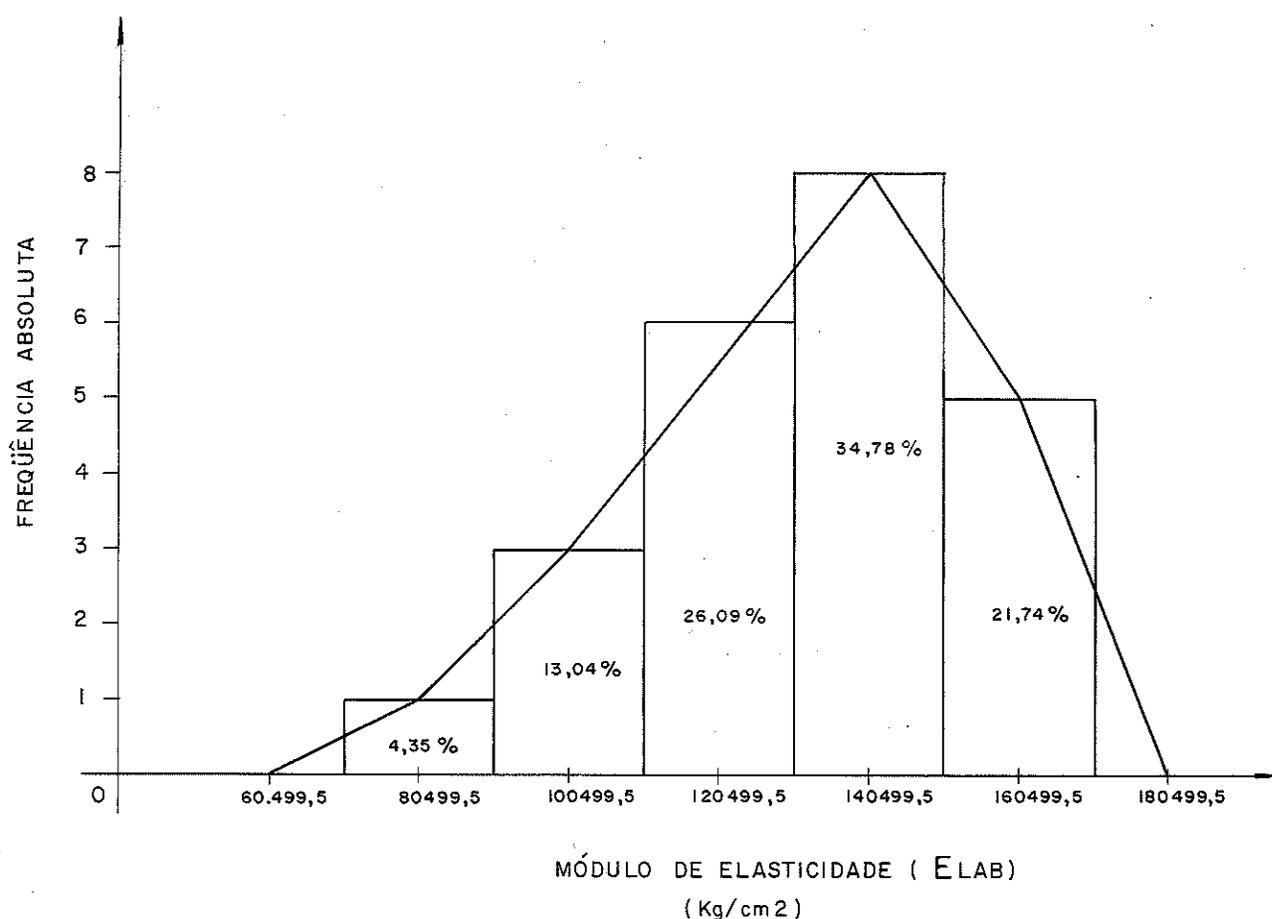


FIG. 9 HISTOGRAMA E POLÍGONO DE FREQUÊNCIA

Do exposto, conclui-se que os resultados obtidos, tanto pelo "Ensaio de Obra" como pelo "Ensaio de Laboratório", representam uma população amostral caracterizada principalmente pelo grau de adaptação destes à Distribuição Normal.

Com base em um teste bilateral da Distribuição de Student, houve a possibilidade de comprovar que não existe diferença significativa entre as médias populacionais das duas amostras.

Assim sendo, para a estatística:

$$t_{\text{calc.}} = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sigma \sqrt{1/N_1 + 1/N_2}}, \text{ em que } \sigma = \sqrt{\frac{N_1 \cdot S_1^2 + N_2 \cdot S_2^2}{N_1 + N_2 - 2}}$$

com

$$\bar{X}_1 = 127660; \quad \bar{X}_2 = 129385; \quad N_1 = N_2 = 23;$$

$$S_1^2 = 769131109 \quad \text{e} \quad S_2^2 = 504256242$$

Obtêm-se

$$\sigma = 25799,89 \quad \text{e} \quad t_{\text{calc.}} = -0,23$$

Para  $(N_1 + N_2 - 2) = (23 + 23 - 2) = 44$  graus de liberdade, obtêm-se as estatísticas correspondentes aos níveis 0,01 e 0,05 de significância, isto é:

$$t_{0,995} = -2,69 \text{ a } 2,69 \text{ e}$$

$$t_{0,975} = -2,01 \text{ a } 2,01$$

Verifica-se que  $t_{\text{calc.}} = -0,23$  situa-se dentro dos intervalos apresentados, indicando portanto que não há diferença significativa entre as médias obtidas (Veja referência 05, pág. 320).

Como era de se prever, os resultados obtidos pelo "Ensaio de Obra", apresentaram um coeficiente de variação em torno da média amostral, maior do que o de "Laboratório" - 21,72% contra 17,36%. Isto se deve ao fato de imprecisões de medidas tais como, alterações de leitura, maior interferência do elemento humano, e das variações no posicionamento do carregamento acentuadas mais neste ensaio, e até certo ponto inevitáveis.

As análises, apresentadas anteriormente, mostraram que os valores obtidos pelo "Ensaio de Obra" ou pelo "Ensaio de Laboratório", conduziram a resultados compatíveis e altamente significantes em termos estatísticos. Em consequência destas análises, houve a possibilidade de se estabelecer uma correlação linear entre as duas variáveis. Adotou-se o modelo linear  $Y = A + BX$ , estabelecendo-se "Elab" como variável dependente e "Eobra" como variável independente.

A equação da reta, ajustada aos dados obtidos (graficamente representada na fig. 10), é a seguinte:

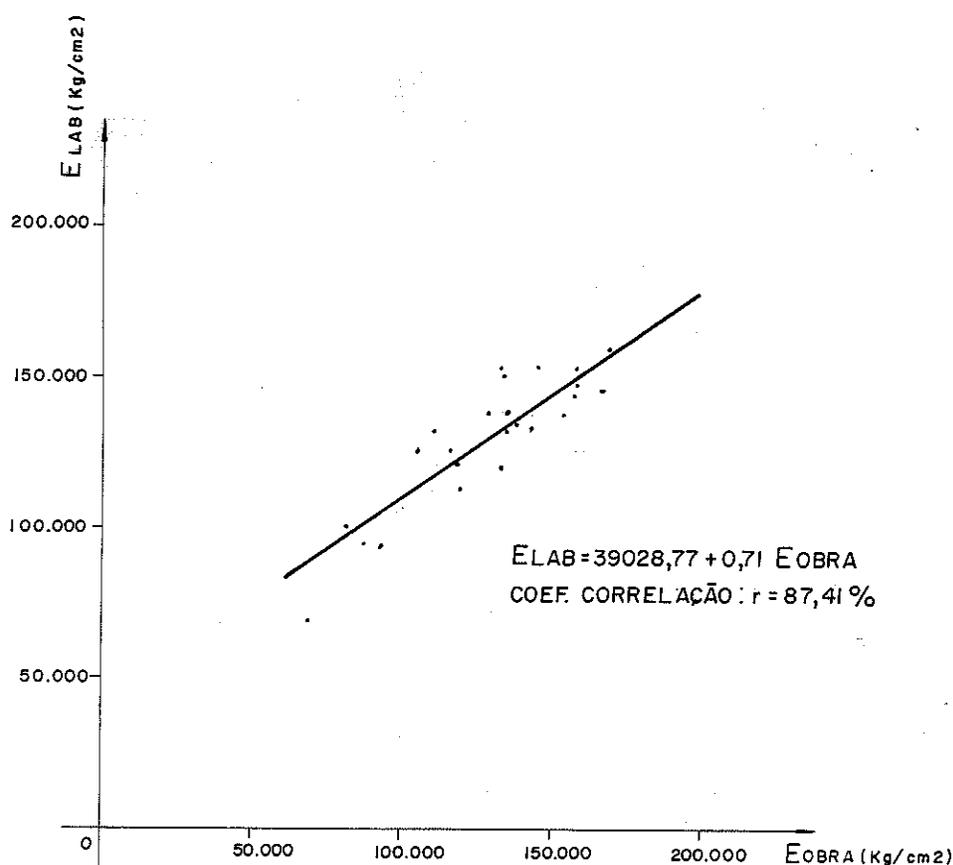


FIG. 10 GRÁFICO DA EQUAÇÃO DE REGRESSÃO- $ELAB=f(EOBRA)$

O Teste da Hipótese Nula para o coeficiente de correlação:  $r = 0,87410$ , indicou a estatística (referência 05, pág. 436):

$$t = \frac{r\sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r^2}} = \frac{0,87410\sqrt{23-2}}{\sqrt{1-0,76405}} = 8,25$$

Baseando-se no teste unilateral da Distribuição de Student, nos níveis de 0,05 a 0,01, obtêm-se para  $\nu = N - 2$  graus de liberdade:

$$t_{0.95} = 1,72 < t, e$$

$t_{0.99} = 2,52 < t$ , significando rejeição à Hipótese Nula, aos níveis apresentados, isto é, existe correlação entre os valores analisados.

Os resultados de todas as análises estatísticas desenvolvidas, tanto pela adaptação dos dados à Distribuição Normal, como pela compatibilidade das médias populacionais ou pelo grau de significância do coeficiente de correlação entre as variáveis; mostram que efetivamente o "Ensaio de Obra" conduz a valores de módulos de elasticidade altamente significantes e, portanto, refletem com segurança o comportamento elástico da madeira.

#### IV - ANÁLISE DE REGRESSÃO E CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS

Determinadas as características físicas e mecânicas da madeira (umidade, densidade e módulo de elasticidade), pelos métodos anteriores descritos, trata o presente capítulo das principais correlações destas variáveis com a tensão de ruptura na flexão.

O diagrama de correlação linear simples, apresentado no capítulo I, estabelece, estatisticamente em 82,52%, a probabilidade de estimar " $\sigma_F$ " em função somente de "E". Na realidade, as demais variáveis (H e D) estão intimamente correlacionadas com o módulo de elasticidade, e desta forma são responsáveis direta ou indiretamente pelo grau de correlação entre " $\sigma_F$ " e "E", como será mostrado nas análises de regressão e correlação entre as variáveis.

Nas análises que se seguem, para a Peroba Rosa, encontra-se primeiramente a equação de regressão múltipla da forma:

$$\sigma_F = f(E, D, H)$$

Em seguida, visando ao seu posterior uso no controle tecnológico da madeira, determina-se a equação de regressão definitiva.

##### IV.1 - ENSAIOS PRELIMINARES

Obtidas 38 vigas de madeira de seção  $6 \times 16\text{cm}^2$ , e comprimento de 1,00 m, ensaiou-se cada uma delas, inicialmente, à flexão estática (ensaio destrutivo), determinando-se a tensão de ruptura e o módulo de elasticidade.

À medida em que se ensaiava cada viga, esta era serada e aparelhada em corpos de prova de  $2 \times 2 \times 3\text{cm}$ . Pesava-se então cada amostra determinando seu volume através do paquímetro e levando-a em seguida à estufa.

Conhecia-se a densidade instantaneamente, bastando para isso, dividir o peso de cada corpo de prova pelo seu correspondente volume. A umidade foi determinada, normalmente, 12

horas após os corpos de prova permanecerem na estufa. Para cada viga obtiveram-se 30 amostras, estabelecendo-se a densidade e a umidade da referida viga pela média aritmética destas.

Os resultados dos ensaios, assim realizados são os seguintes:

Nº DA VIGA	$\sigma F$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	D (g/cm <sup>3</sup> )	H (%)	E (Kg/cm <sup>2</sup> )
1	490	0,80	17,10	63700
2	726	0,82	19,90	102282
3	717	0,83	20,20	86729
4	582	0,77	19,40	67671
5	427	0,75	20,80	62741
6	818	0,86	16,34	94728
7	814	0,84	17,30	87347
8	729	0,81	18,86	82360
9	839	0,75	17,89	103129
10	863	0,80	24,60	111951
11	771	0,82	15,90	81423
12	900	0,84	20,10	103377
13	844	0,80	22,10	109024
14	797	0,86	12,00	82540
15	765	0,73	14,00	106207
16	853	0,71	13,40	90626
17	983	0,89	10,80	114290
18	876	0,88	16,00	92642
19	820	0,81	15,00	101431
20	671	0,88	9,10	93174
21	1002	0,88	14,00	96546
22	960	0,87	8,30	86935
23	648	0,85	13,00	67691
24	641	0,85	15,70	70304
25	480	0,87	9,70	59711
26	939	0,77	14,10	93585
27	588	0,80	14,60	81712
28	860	0,74	16,70	102168
29	883	0,74	15,60	106858
30	985	0,76	11,60	123031
31	962	0,75	15,60	107509
32	756	0,71	15,50	90222
33	592	0,71	16,10	87217
34	797	0,75	19,10	94636
35	627	0,69	13,00	78343
36	1086	0,82	14,90	129305
37	989	0,82	15,80	119383
38	1054	0,80	11,90	123339

A análise estatística, calculada para cada variável, resultou:

VARIÁVEL ESTATÍSTICA	$\bar{G}$	D	H	E
MÉDIA	793.00	0.80	15.68	93575.45
DESVIO PADRÃO	163.33	0.056	3.62	17609.53
VALOR MÍNIMO	427.00	0.69	8.30	59711.00
VALOR MÁXIMO	1086.00	0.89	24.60	129305.00
ERRO PADRÃO DA MÉDIA	26.50	0.009	0.59	2856.64
SOMA DOS VALORES	30134.00	30.43	595.99	3555867.00
VARIÂNCIA	26676.11	0.003	13.07	310095426,63
COEF. VARIAÇÃO	20.60	7.02	23.05	18.82

Neste quadro, para a espécie Peroba Rosa, observa-se que os valores médios de todas as variáveis foram muito próximos aos valores médios que a NB-11 preconiza, para o cálculo de estruturas.

A condição básica para o prosseguimento da análise estatística consistiu em averiguar, inicialmente, se cada variável obtida representava uma população amostral. Isso é feito avaliando-se quão perfeita é a adaptação dos dados à Distribuição Normal.

Nas figuras 11, 12, 15 e 16, estão representados os gráficos de probabilidade e a prova de aderência para cada variável. As figuras 13, 14, 17 e 18, apresentam respectivamente os Histogramas e os Polígonos de Frequência encontrados.

A prova de aderência pelo "TESTE DO QUI-QUADRADO", ao nível de significância de 95%, indicou para a tensão de ruptura na flexão, o seguinte:

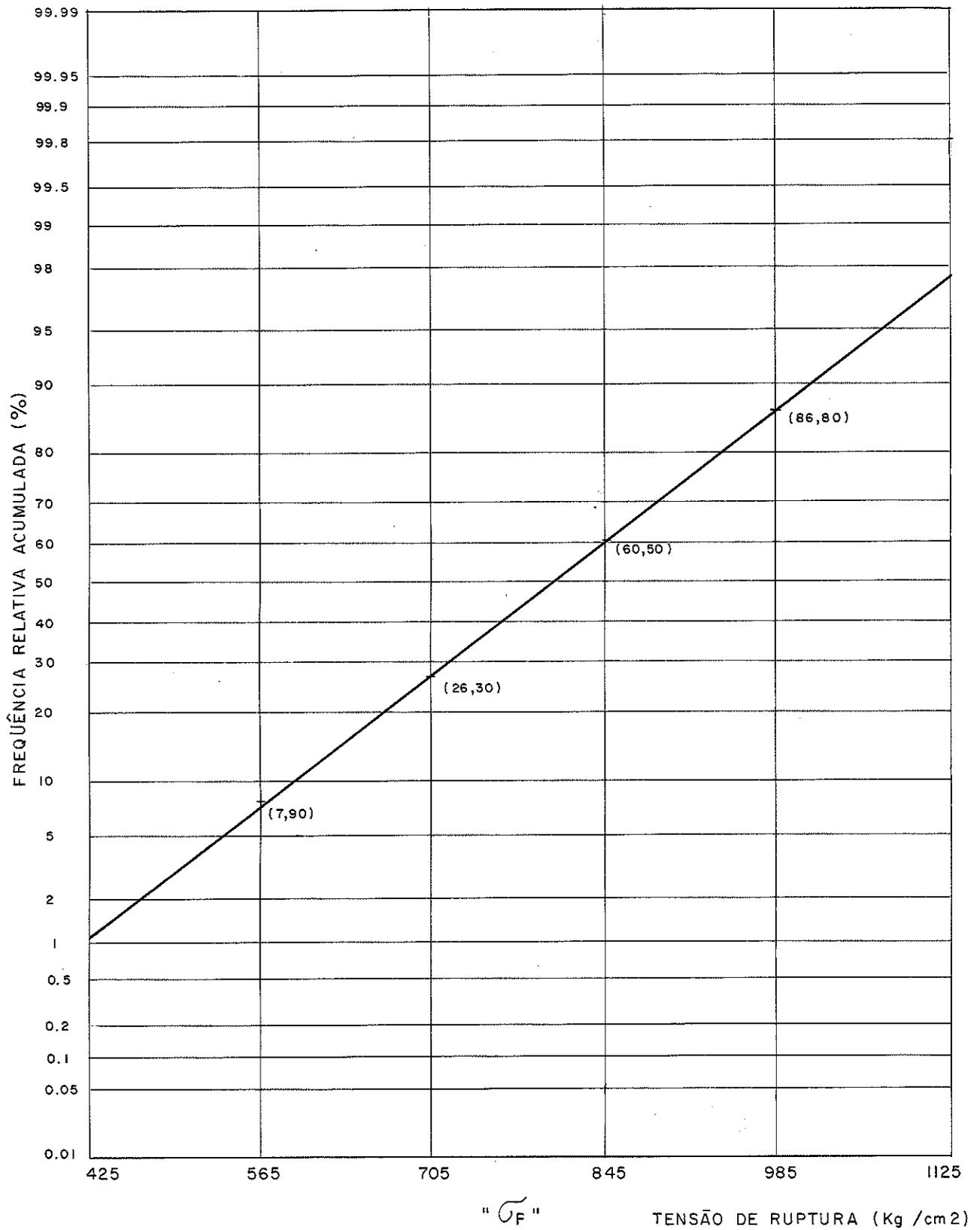


FIG. 11 GRÁFICO DE PROBABILIDADE

$$\chi^2_{\text{calc.}} = 0,586$$

$$\chi^2_{0,95} = 5,99$$

Portanto,  $\chi^2_{0,95} > \chi^2_{\text{calc.}}$ , significando ajustamento excepcionalmente bom a este nível.

O gráfico de probabilidade, para a densidade, pode ser visto abaixo (fig. 12):

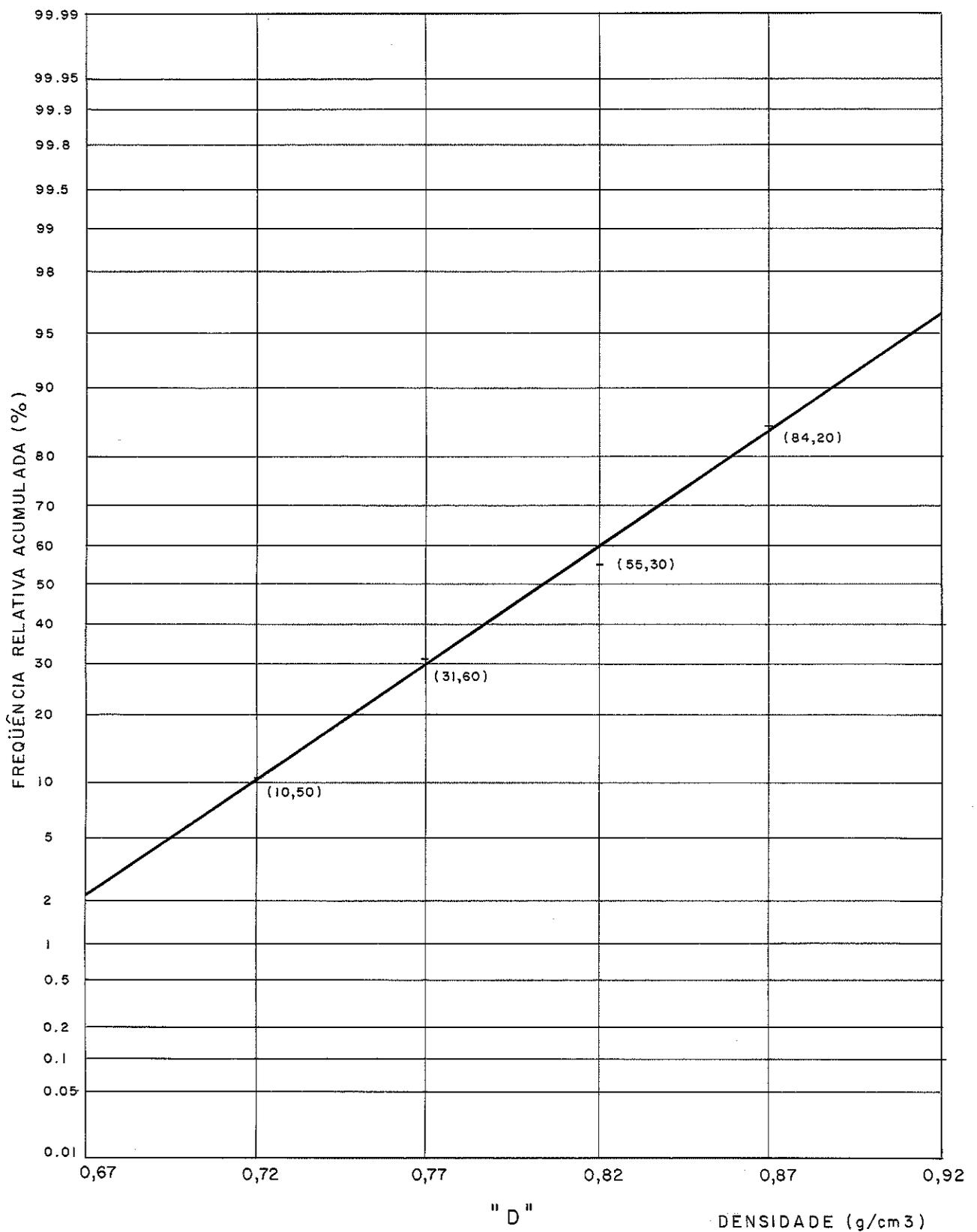


FIG.12 GRÁFICO DE PROBABILIDADE

Pelo "TESTE DO QUI-QUADRADO", ao nível de 95%, tem-se:

$$\chi^2_{\text{calc.}} = 3,92$$

Logo,  $\chi^2_{0,95} > \chi^2_{\text{calc.}}$ , indicando ajustamento bom a este nível.

Em relação às duas variáveis analisadas, as distribuições de frequência, para os dados agrupados, apresentaram os seguintes Histogramas e Polígonos de Frequência (figs. 13 e 14):

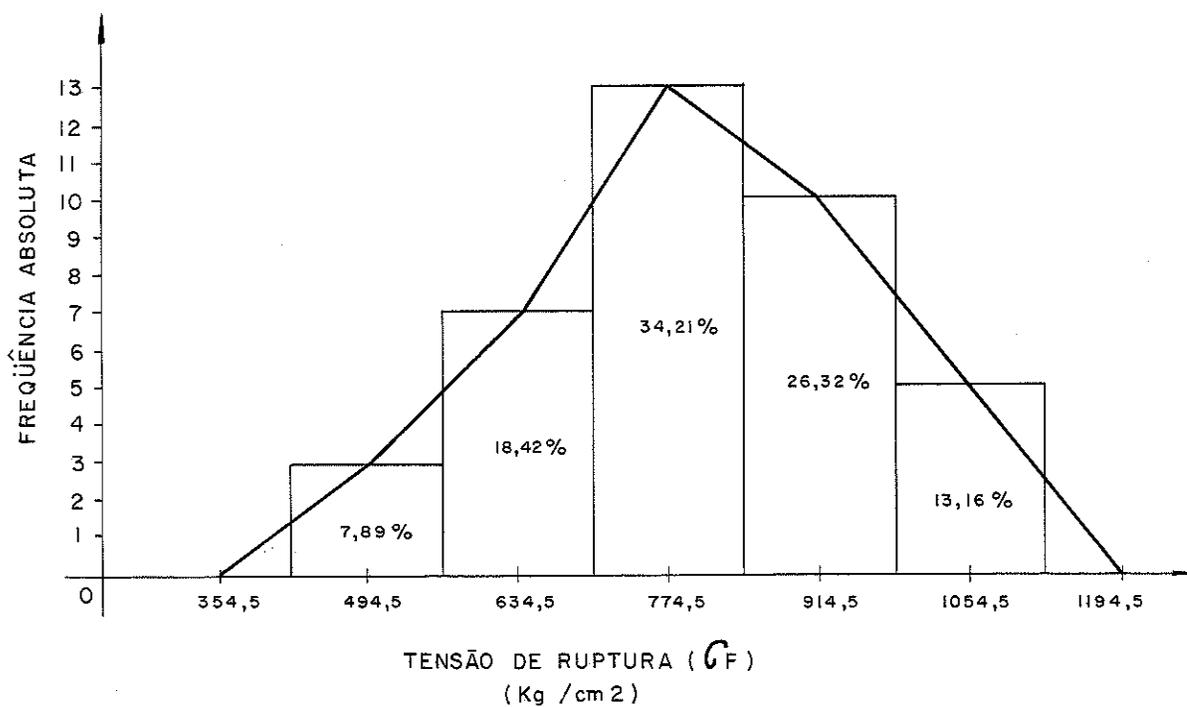


FIG. 13 HISTOGRAMA E POLÍGONO DE FREQUÊNCIA

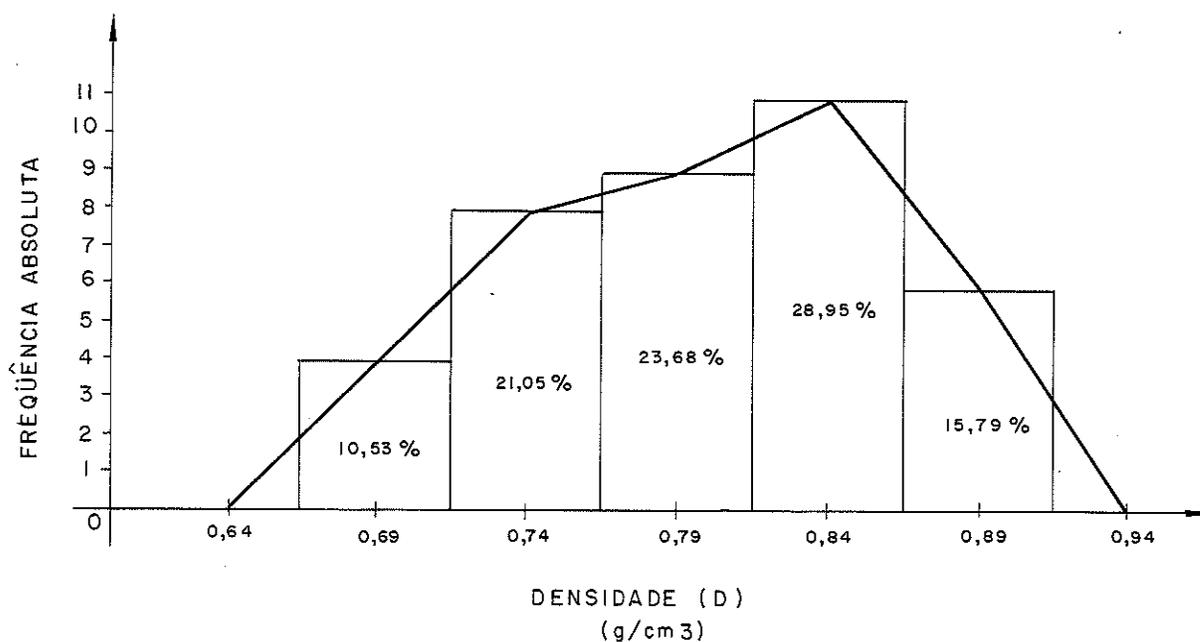


FIG. 14 HISTOGRAMA E POLÍGONO DE FREQUÊNCIA

A mesma análise, aplicada ao módulo de elasticidade e à umidade, apresentou os gráficos de probabilidade das figuras 15 e 16, respectivamente:

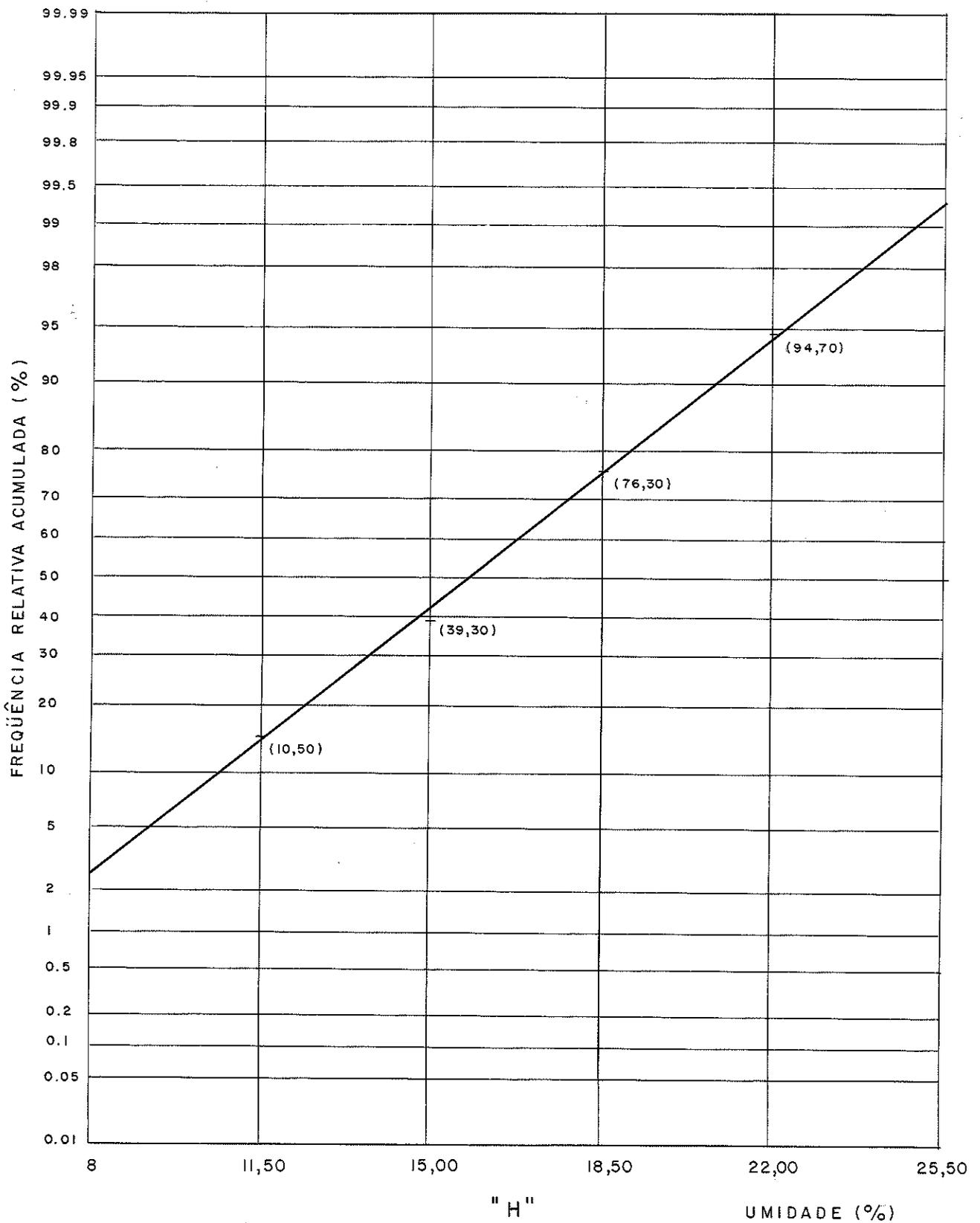


FIG. 15 GRÁFICO DE PROBABILIDADE

A prova de aderência indicou, ao nível de significância de 95%, ajustamento excepcionalmente bom a este nível, como pode ser visto abaixo:

$$\chi^2_{\text{calc.}} = 0,29$$

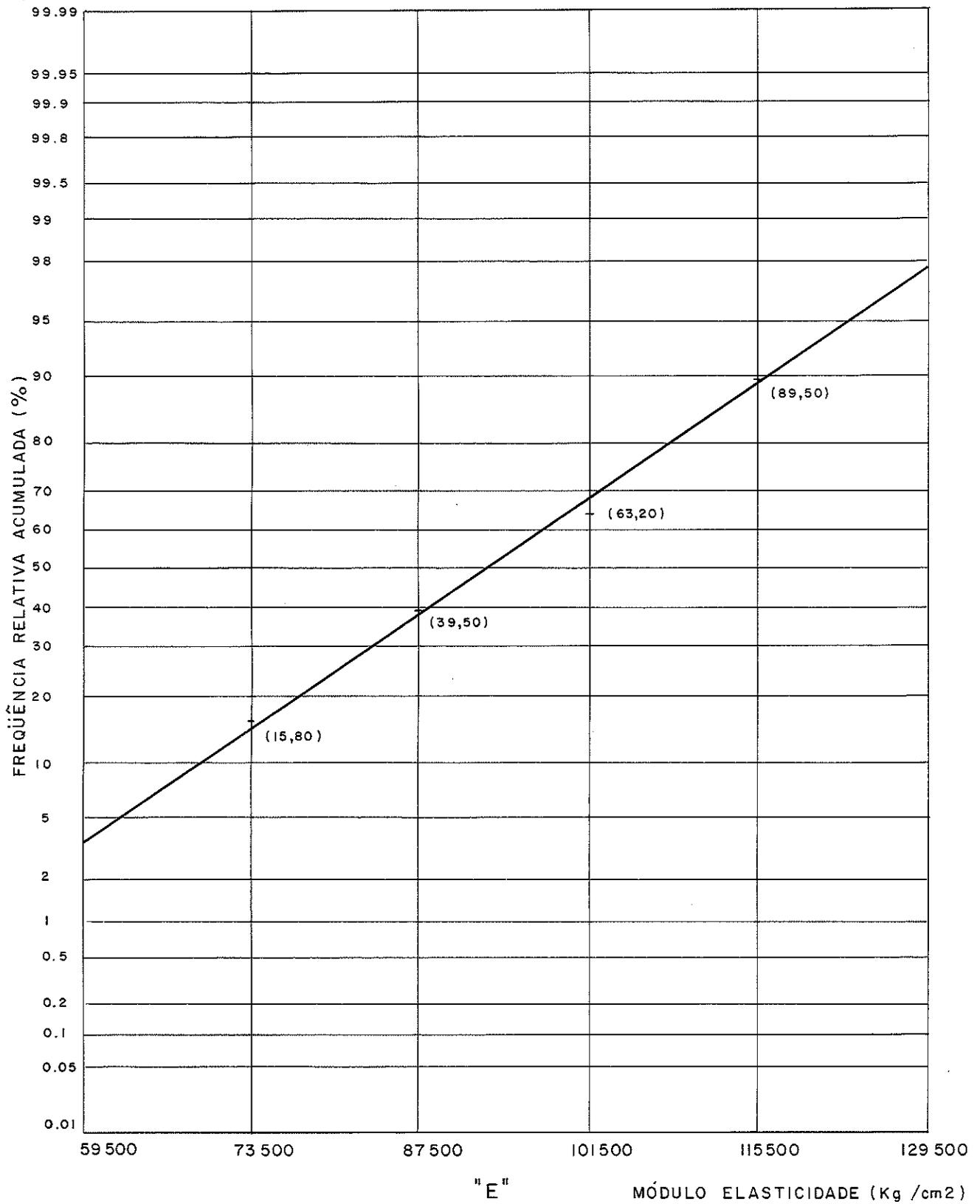


FIG. 16 GRÁFICO DE PROBABILIDADE

Para esta variável, a prova de aderência indicou:

$$\chi^2_{\text{calc.}} = 2,37$$

Logo,  $\chi^2_{0,95} > \chi^2_{\text{calc.}}$ , significando ajustamento muito bom a este nível.

As distribuições de freqüência, para os dados agrupados, apresentaram os seguintes Histogramas e Polígonos de Freqüência (figs. 17 e 18)

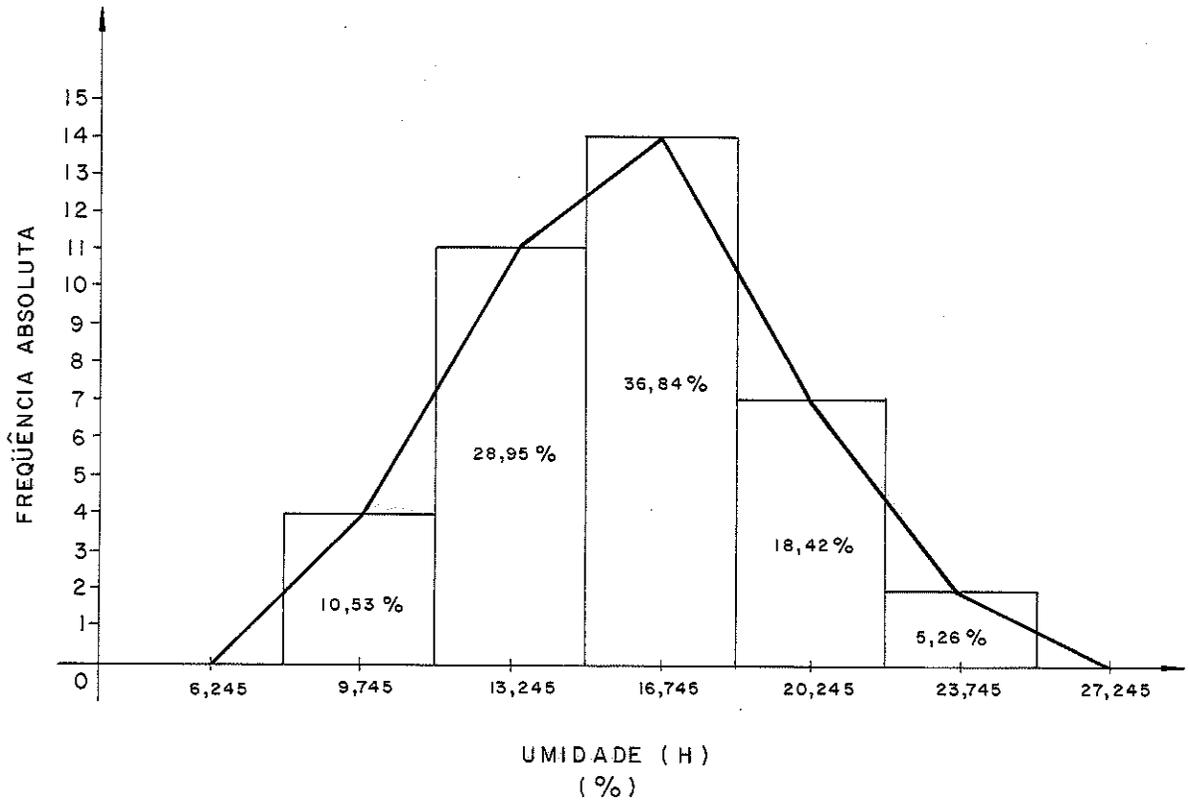


FIG. 17 HISTOGRAMA E POLÍGONO DE FREQUÊNCIA

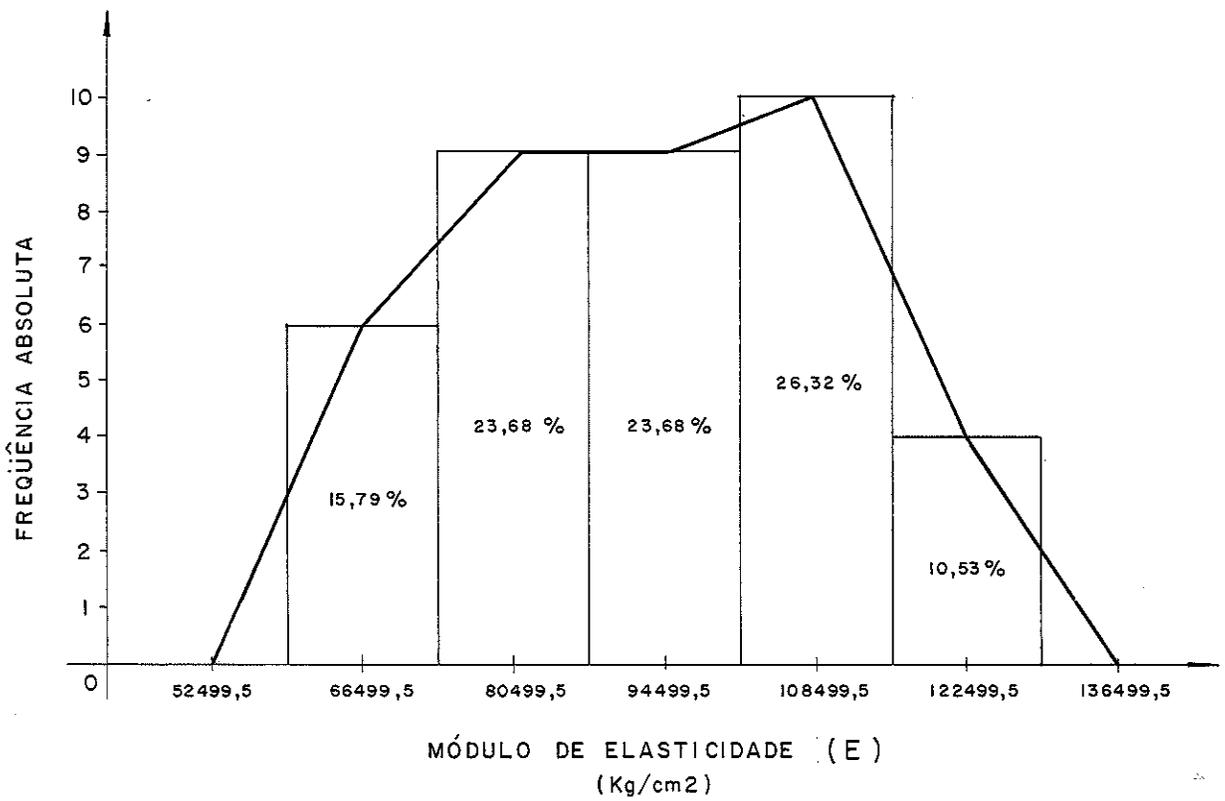


FIG. 18 HISTOGRAMA E POLÍGONO DE FREQUÊNCIA

Das análises estudadas, conclui-se que a amostra obtida é representativa da população. Isso significa que, a menos de pequenas discrepâncias inerentes à aleatoriedade sempre presente em maior ou menor grau no processo da amostragem, a amostra possui as mesmas características básicas da população, no que diz respeito às variáveis pesquisadas.

A prova de aderência, pelo "TESTE DO QUI-QUADRADO", com base no valor crítico -  $\chi^2_{0.95}$  - foi significativa em alguns casos, e altamente significativa em outros, como se observou no tocante ao " $\sigma_F$ " e "H".

Para um nível de significância de  $\chi^2_{0.05} = 0,103$ , verifica-se que em nenhum dos casos o ajustamento dos dados à Distribuição Normal é satisfatório. Entretanto, a condição de significância já foi assegurada no nível padrão estabelecido de  $\chi^2_{0.95}$  e muito mais em  $\chi^2_{0.99}$ , que são os valores críticos internacionalmente adotados.

#### IV.2 - DETERMINAÇÃO DA EQUAÇÃO DE REGRESSÃO DEFINITIVA

O principal objetivo deste capítulo é estabelecer uma equação de regressão linear (simples ou múltipla), para com " $\sigma_F$ ", de modo a atingir os seguintes requisitos:

1º) Ser esta equação estatisticamente válida e significativa, a fim de refletir com segurança a resistência da madeira.

2º) Oferecer condições práticas e eficientes para o seu posterior uso no controle tecnológico do material (classificação da madeira).

Partindo-se da equação de regressão múltipla da forma:

$$Y = A \cdot x_1 + B \cdot x_2 + C \cdot x_3 + D$$

sendo " $\sigma_F$ " a variável dependente, "D", "H", e "E", as variáveis independentes, encontrou-se a equação:

$$\sigma_F = 463,249 \cdot D - 5,975 \cdot H + 0,008 \cdot E + 233,149$$

Para esta equação obteve-se o seguinte coeficiente de correlação:

$$r = 0,88150$$

o qual equivale a uma probabilidade de estimar " $\sigma_F$ " em 88,15%.

O teste da hipótese nula, para o coeficiente de correlação, indicou a estatística:

$$t = \frac{r\sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r^2}} = \frac{0,88150 \cdot \sqrt{38-2}}{\sqrt{1-0,777044}} = 11,20$$

Baseando-se no teste unilateral da Distribuição de Student, nos níveis de 0,05 e 0,01, obtém-se para  $\nu = N - 2$  graus de liberdade:

$$t_{0,95} = 1,70 < t \quad e$$

$t_{0,99} = 2,46 < t$ , significando rejeição da hipótese nula, aos níveis apresentados, isto é, existe correlação entre os valores analisados.

Os valores de " $\sigma_F$ ", estimados em função das demais variáveis, a partir da equação de regressão, permitiu encontrar o erro padrão da estimativa, dado por:

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum(Y - Y_{est})^2}{N}}$$

ou seja:

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{220061,61}{38}} = 76,10 \text{ Kg/cm}^2$$

Logo, a equação de regressão estabelecida por representar um coeficiente de correlação de elevada porcentagem probabilística, atende com segurança o primeiro objetivo.

Todavia, ela não preenche os requisitos necessários para realizar o controle tecnológico da madeira, visto que a determinação da umidade não é tarefa prática, nem mesmo imediata, pois somente depois de transcorrer doze horas, com o corpo de prova em estufa, torna-se possível determinar esta variável.

Por outro lado, constatou-se que a influência da umidade, como variável na estimativa de " $\sigma_F$ ", é desprezível, podendo ser eliminada da regressão sem que ocorra decréscimo considerável no coeficiente de correlação.

Isso não significa que a umidade não influencia " $\sigma_F$ ", uma vez que a própria umidade está intimamente correlacionada com as demais variáveis em questão; e, além disso, toda e qualquer variação ocorrida na densidade ou no módulo de elasticidade é reflexo de alteração na umidade da madeira, e portanto em " $\sigma_F$ ".

Ocorre simplesmente que o valor efetivo da umidade, tomada como variável, não é correlacionável estatisticamente com " $\sigma_F$ ", podendo-se conseqüentemente eliminá-la da regressão.

Face ao exposto, assim a nova equação encontrada passa a ser a seguinte:

$$\sigma_F = 552,136 D + 0,008 E - 398,204$$

com um coeficiente de correlação igual a:

$$r = 0,87206$$

ou seja, 87,21% de probabilidade de estimar-se " $\sigma_F$ ".

Desse modo, observa-se que o coeficiente obtido não difere, consideravelmente, em relação ao da equação anterior, pois a diferença entre eles não ultrapassa a 1%.

O teste da hipótese nula, também neste caso, mostrou-se significativo:

$$t = \frac{0,87206 \sqrt{38 - 2}}{\sqrt{1 - 0,76049}} = 10,69$$

$$t_{0,95} = 1,70 < t$$

$$t_{0,99} = 2,46 < t$$

existindo assim correlação entre os valores analisados.

O erro padrão obtido da estimativa foi o seguinte:

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{236400,631}{38}} = 78,10 \text{ Kg/cm}^2$$

A priori, a equação encontrada preenche os requisitos necessários para realizar o controle tecnológico da madeira. Ambas as variáveis podem ser facilmente determinadas, tanto o módulo de elasticidade pelo "Ensaio de Obra", como a densidade pelo Processo do Paquímetro ou Palmer.

Entretanto, o prosseguimento da análise mostrou que a equação de correlação simples -  $\sigma F = f(E)$  - estabelece definitivamente a equação procurada, tendo em vista que:

19) - Somente a variável "E" assegura a probabilidade de 85,12% de estimar " $\sigma F$ ";

29) - O controle tecnológico da madeira reduziu-se à determinação de apenas um parâmetro - "E";

39) - No local da obra, minimizaram os problemas de tempo e custos operacionais no controle da madeira.

Realmente, a análise dos resultados com o módulo de elasticidade, tomado como única variável independente, apresentou-se plenamente satisfatória e segura estatisticamente. O coeficiente de correlação apresentado:

$$r = 0,85116$$

assegura a probabilidade de estimar a Tensão de Ruptura em 85,12%, significando que o módulo de elasticidade  $\hat{E}$ , por si só, um característico efetivo de resistência, e conseqüentemente, o próprio parâmetro que definirá a Classificação da Madeira pela Resistência.

A mesma análise feita para a densidade, veio confirmar o que foi dito, pois neste caso, o coeficiente de correlação mostrou-se insatisfatório para qualificar a madeira do ponto de vista de sua resistência, com a probabilidade de apenas 13,61%.

O quadro abaixo reúne as principais equações envolvidas nas análises deste capítulo:

EQUAÇÃO	COEFICIENTE CORRELAÇÃO	PROBABILIDADE	ERRO PADRÃO DA ESTIMATIVA
$\sigma_F = 0.008 E + 463.25 D - 5.97 H - 233.15$	0.88150	88.15 %	76.10 Kg /cm <sup>2</sup>
$\sigma_F = 0.008 E + 552.14 D - 398.20$	0.87206	87.21 %	78.87 Kg /cm <sup>2</sup>
$\sigma_F = 0.008 E + 54.27$	0.85116	85.12 %	84.60 Kg /cm <sup>2</sup>
$\sigma_F = 395.30 D + 476.45$	0.13614	13.61 %	159.66 Kg /cm <sup>2</sup>

Definido o principal parâmetro responsável pela variação da resistência da madeira, procurou-se estabelecer dentre as equações de regressão lineares ou não-lineares, a que apresentasse melhor correlação estatística com a tensão de ruptura na flexão.

Assim, as equações de regressão não-lineares estudadas, foram as seguintes:

- Curva exponencial;
- Curva logarítmica;
- Curva de Potência;
- Parábola do mínimo quadrado.

As equações encontradas, assim como os coeficientes de correlação e o erro padrão da estimativa, estão apresentadas abaixo para cada tipo de curva:

- Curva exponencial:

$$\sigma_F = a \cdot e^{b \cdot E}$$

$$a = 283,76$$

$$b = 1,074 \times 10^{-5}$$

$$r = 0,8430$$

$$S_{yx} = 89,56 \text{ kg/cm}^2$$

- Curva logarítmica:

$$\begin{aligned}\sigma_F &= a + b \cdot \ln E \\ a &= -7394,04 \\ b &= 716,38 \\ r &= 0,8592 \\ S_{yx} &= 82,47 \text{ Kg/cm}^2\end{aligned}$$

- Curva de potência

$$\begin{aligned}\sigma_F &= a \cdot E^b \\ a &= 9,723 \times 10^{-3} \\ b &= 9,875 \times 10^{-1} \\ r &= 0,8625 \\ S_{yx} &= 81,55 \text{ Kg/cm}^2\end{aligned}$$

- Parábola do mínimo quadrado

$$\begin{aligned}\sigma_F &= a_0 + a_1 \cdot E + a_2 \cdot E^2 \\ a_0 &= -330,46 \\ a_1 &= 1,645 \times 10^{-2} \\ a_2 &= -4,59 \times 10^{-8} \\ r &= 0,8574 \\ S_{yx} &= 82,95 \text{ Kg/cm}^2\end{aligned}$$

Devido aos valores muito próximos para os coeficientes de correlação, obtidos pelas 4 curvas estudadas, parece claro que qualquer curva poderia ter sido escolhida. Entretanto, por apresentar o maior coeficiente de correlação e, evidentemente, estar mais próximo do valor real da tensão de ruptura na flexão, escolheu-se a curva de potência. Com isto, o controle tecnológico da madeira fica definitivamente estabelecido, através da equação não-linear:

$$\sigma_F = 9,723 \cdot 10^{-3} \cdot E^{9,875 \cdot 10^{-1}}$$

Portanto, para se concluir o procedimento do controle tecnológico da madeira, relativo à sua classificação estrutural, resta apenas estabelecer os padrões de qualidade dos valores encontrados, ou seja, definir as categorias de classificação estrutural da madeira.

## V - CLASSIFICAÇÃO DA MADEIRA

No capítulo anterior, comprovou-se que, através do conhecimento do módulo de elasticidade, é possível classificar a madeira de acordo com sua resistência, uma vez que o valor efetivo do módulo de elasticidade define a resistência do material.

Assim, neste capítulo serão estabelecidas, a partir de valores limítrofes do módulo de elasticidade, as categorias de classificação da madeira, e conseqüentemente, será definido o controle tecnológico deste material.

Com vista a esse problema, o autor inicialmente realizou 151 ensaios de obra em peças estruturais de madeira, para a determinação dos diversos valores de módulos de elasticidade.

De posse dos valores encontrados, fêz-se a análise estatística com a finalidade de estabelecer as categorias para a classificação da madeira.

### V.1 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

O "Ensaio de Obra" foi realizado utilizando-se vigas de Peroba-Rosa, de seção transversal de  $6 \times 16 \text{ cm}^2$ , e obtiveram-se os seguintes valores de módulos de elasticidade:

Nº DA VIGA	MÓD. DE ELASTICIDADE (Kg/cm <sup>2</sup> )	Nº DA VIGA	MÓD. DE ELASTICIDADE (Kg/cm <sup>2</sup> )
1	77038	7	101123
2	95600	8	112376
3	95374	9	88038
4	112248	10	110865
5	103491	11	85689
6	94979	12	110864

Cont...

Nº DA VIGA	MÓD. DE ELASTICIDADE (Kg/cm <sup>2</sup> )	Nº DA VIGA	MÓD. DE ELASTICIDADE (Kg/cm <sup>2</sup> )
13	86039	47	89298
14	80345	48	114796
15	86084	49	117751
16	76909	50	123417
17	106687	51	90604
18	88038	52	112114
19	94399	53	113254
20	78042	54	131500
21	101360	55	116840
22	85153	56	102660
23	100018	57	111612
24	102768	58	96239
25	106068	59	98963
26	100982	60	89880
27	96043	61	117621
28	105013	62	114885
29	80527	63	120253
30	95101	64	118829
31	91617	65	106614
32	79179	66	119834
33	88522	67	118354
34	89207	68	107091
35	118918	69	107981
36	117258	70	100766
37	127341	71	104281
38	122605	72	97128
39	130545	73	107618
40	111626	74	62423
41	114628	75	100390
42	117100	76	78271
43	123020	77	87407
44	107498	78	111726
45	98691	79	78423
46	118841	80	93608

Cont...

Nº DA VIGA	MÓD. DE ELASTICIDADE (Kg/cm <sup>2</sup> )	Nº DA VIGA	MÓD. DE ELASTICIDADE (Kg/cm <sup>2</sup> )
81	74886	116	66441
82	97908	117	114411
83	104165	118	67747
84	87783	119	114412
85	77181	120	125904
86	114202	121	104840
87	105582	122	85365
88	79038	123	82802
89	79713	124	63096
90	72485	125	81336
91	76656	126	105240
92	88823	127	85533
93	80865	128	67636
94	69774	129	115345
95	85826	130	113927
96	97150	131	75744
97	88837	132	70839
98	96969	133	84421
99	83730	134	94172
100	88529	135	87919
101	63906	136	80793
102	69701	137	81714
103	81529	138	104031
104	85411	139	75210
105	75574	140	92028
106	78511	141	80979
107	63743	142	70474
108	79207	143	88950
109	70084	144	95723
110	62552	145	70056
111	71013	146	96113
112	84722	147	101070
113	87777	148	108700
114	78053	149	101109
115	58500	150	107201
		151	87792

A análise estatística dos valores encontrados resultou:

VARIÁVEL ESTATÍSTICA	E
MÉDIA	94607,59
DESVIO PADRÃO	16989,77
VALOR MÍNIMO	58500,00
VALOR MÁXIMO	131500,00
ERRO PADRÃO DA MÉDIA	1382,61
SOMA DOS VALORES	14285746,00
VARIÂNCIA	288652362,80
COEF. VARIAÇÃO	17,96%

O quadro seguinte mostra as distribuições de frequências para os dados agrupados, e o conseqüente ajustamento dos mesmos à Distribuição Normal.

INTERVALOS DE CLASSE	LIMITES REAIS	VARIÁVEL REDUZIDA	ÁREA SUSTENDIDA PELA CURVA ENTRE 0 e Z	ÁREA DE CADA CLASSE	FREQUÊNCIA ESPERADA	FREQUÊNCIA OBSERVADA
58500 - 73099	58499,5	- 2,13	0,4834	0,0854	12,90 ou 13	17
73100 - 87699	73099,5	- 1,27	0,3980	0,2389	36,07 ou 36	38
87700 - 102299	87699,5	- 0,41	0,1591	} SOMA 0,3327	50,24 ou 50	42
102300 - 116899	102299,5	0,45	0,1736			
116900 - 131499	116899,5	1,31	0,4049	0,0801	12,10 ou 12	17
	131499,5	2,17	0,4850			

A prova de aderência dos dados à Distribuição Normal, realizada pelo "Teste do Qui-Quadrado", ao nível de significância de 95%, resultou:

$$\chi^2_{\text{calc.}} = 4,82 \quad \chi^2_{0,95} = 5,99$$

o que indica ajustamento muito bom a este nível.

O ajustamento linear dos dados está representado, através do gráfico de probabilidade, na figura abaixo (Fig.19).

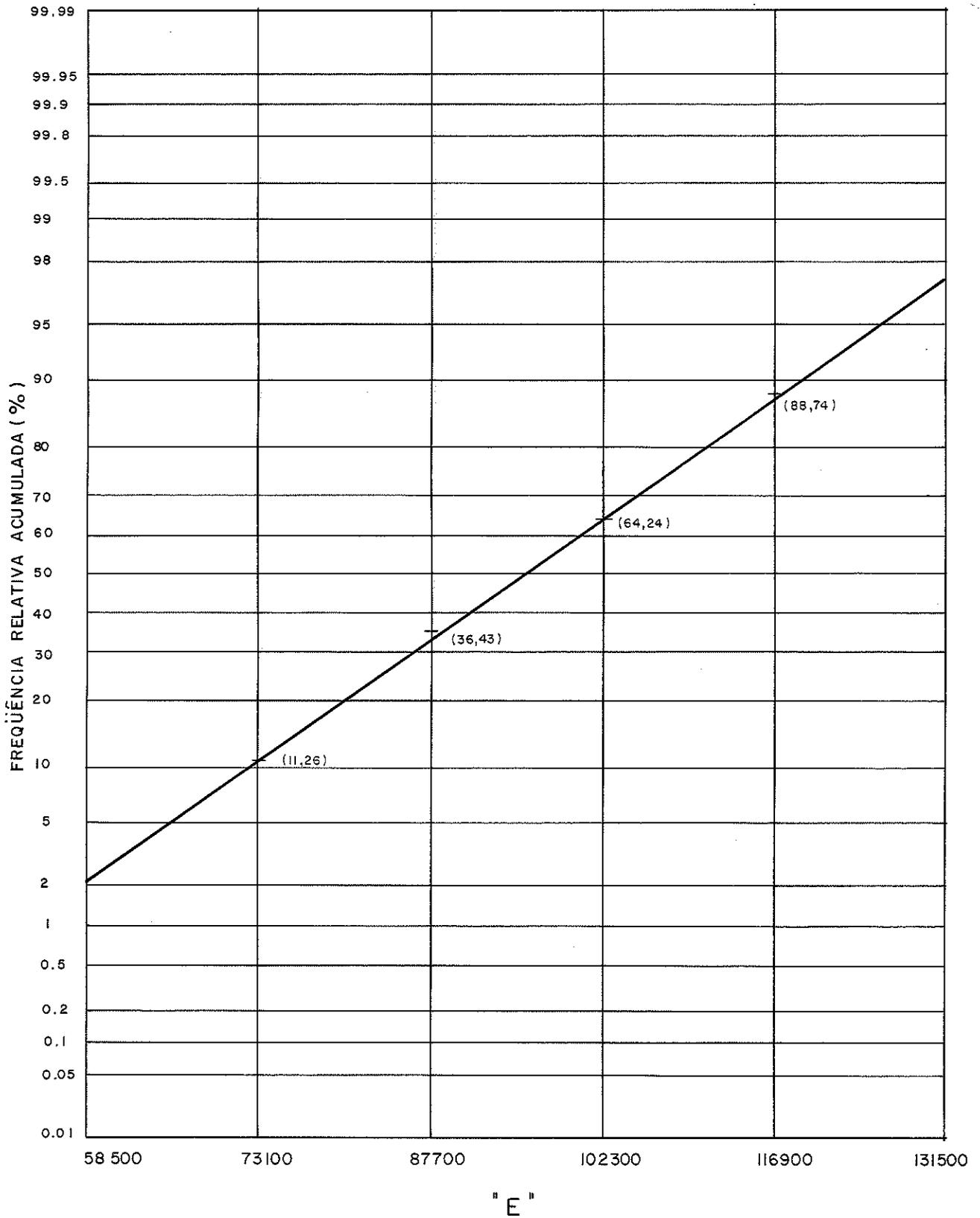


FIG. 19 GRÁFICO DE PROBABILIDADE

Nas figuras 20 e 21 são apresentados os Histogramas e os Polígonos de Frequências "observados" e "esperados" para os dois casos analisados.

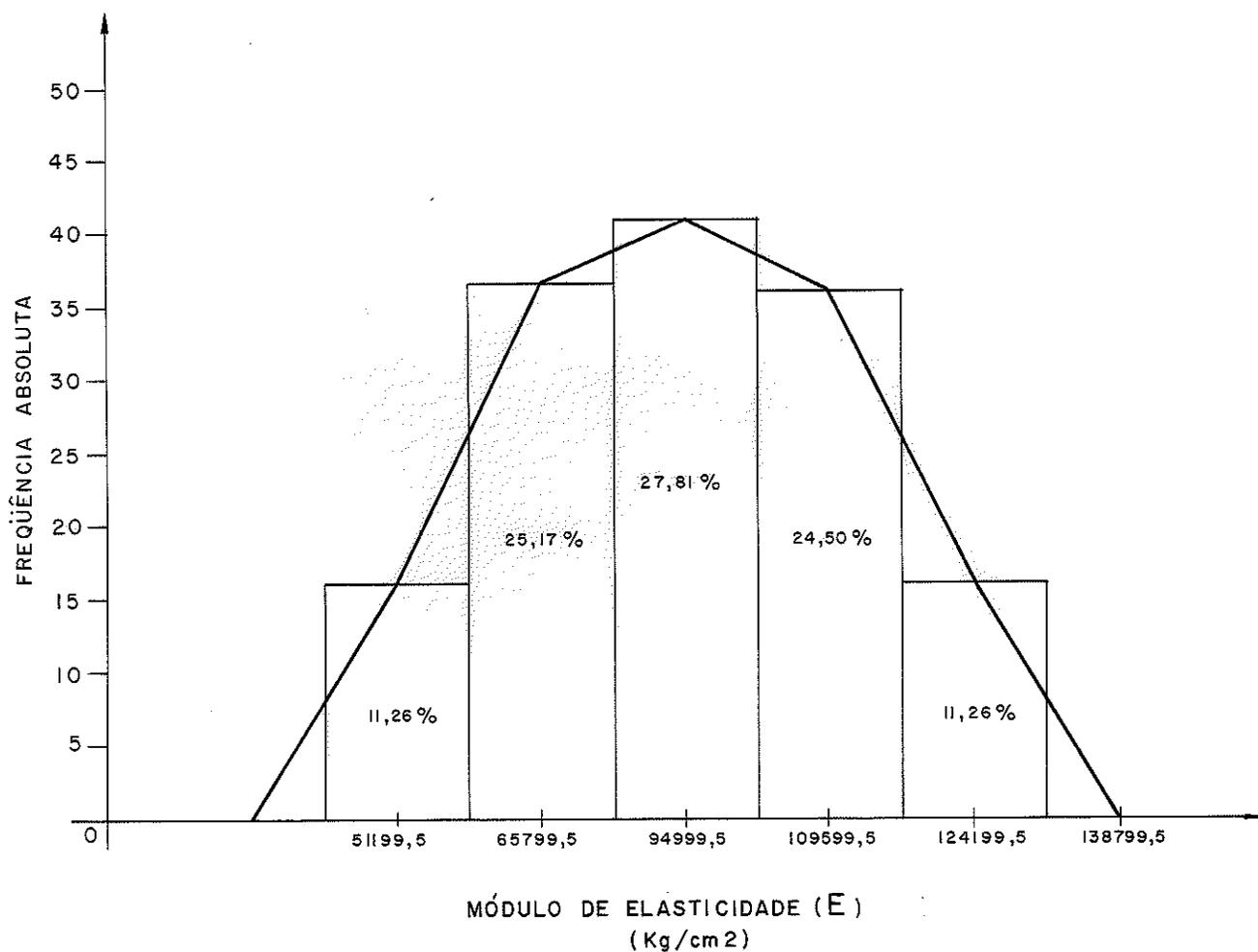


FIG. 20 HISTOGRAMA E POLÍGONO DE FREQUÊNCIAS "OBSERVADOS"

Conclui-se, desse modo, que existe uma Distribuição Normal que se adapta aos dados obtidos com bastante aproximação, isto é, a amostra obtida é representativa da população.

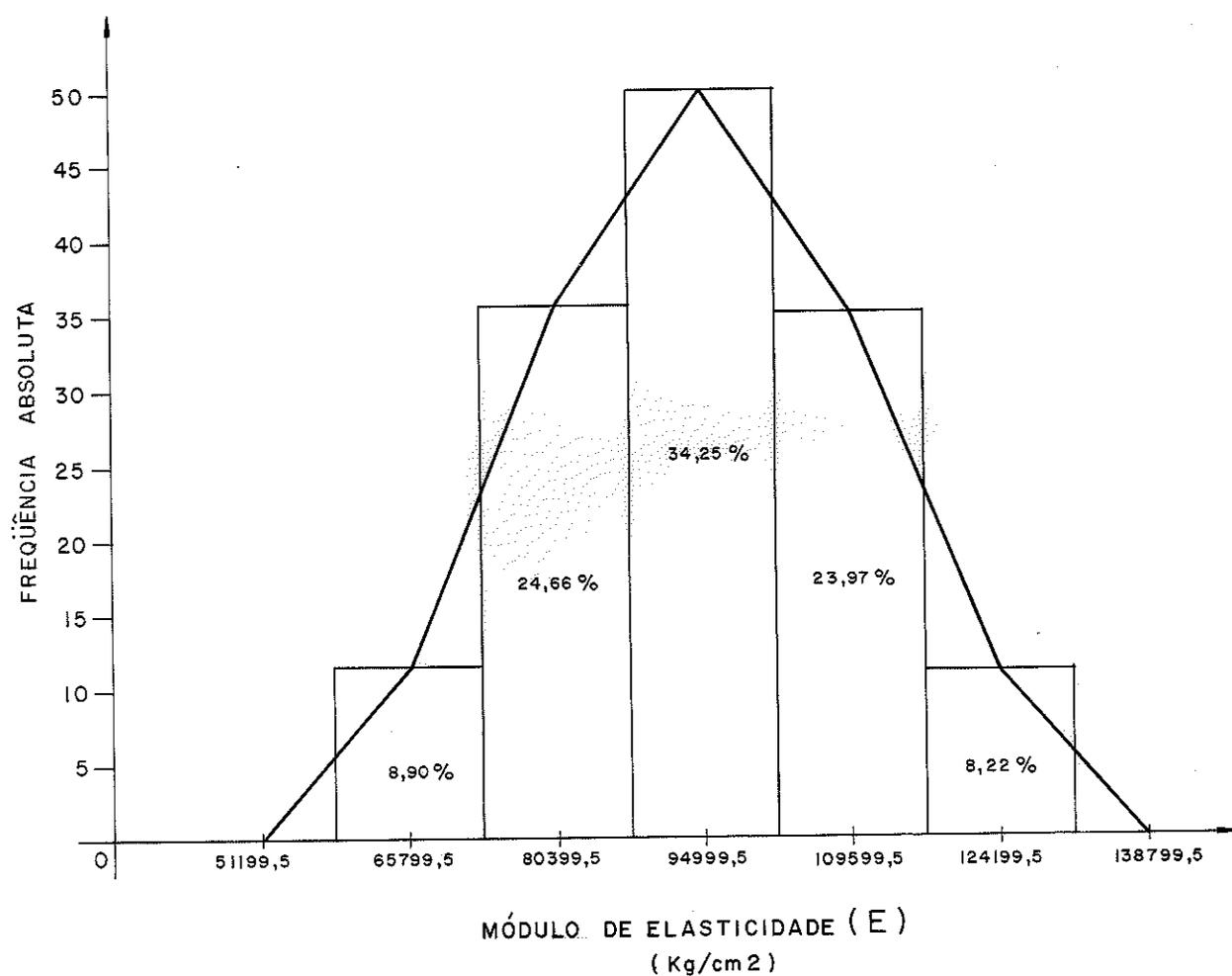


FIG.21 HISTOGRAMA E POLÍGONO DE FREQUÊNCIAS "ESPERADOS"

## V.2 - ESTABELECIMENTO DAS CATEGORIAS PARA A CLASSIFICAÇÃO DA MADEIRA

A partir da Distribuição Normal estudada (Fig.20), foram definidas as categorias para classificar a madeira. O número de categorias é estabelecido tendo em vista a obtenção de uma distribuição, na qual cada categoria abranja uma percentagem compatível e eficiente de dados amostrais para o posterior selecionamento da madeira. As percentagens dos dados amostrais encontrados obedecem o critério normal de uma distribuição de

frequência para dados agrupados. Isto equivale dizer que as percentagens em cada categoria resultaram das frequências obtidas da distribuição dos dados em intervalos de classe. Uma vez conhecidas estas percentagens, determinam-se os valores limites do módulo de elasticidade para cada categoria, através da curva normal reduzida. Dessa forma, os módulos de elasticidade definem as categorias e, conseqüentemente, estabelecem a classificação da madeira pela resistência.

As figuras nºs 22 e 23 representam as distribuições de frequência sob a curva normal reduzida para dados agrupados em três e quatro categorias. Em cada uma das distribuições, estipulou-se uma percentagem unilateral equivalente a 5%, como madeira a ser rejeitada em aplicações estruturais. Isto significa que uma peça de madeira, com um módulo de elasticidade contido naquele intervalo, deverá ser refugada do lote devido a sua pequena capacidade de carga. A figura nº 22, abaixo, mostra as distribuições de frequência em três categorias, em relação a variável reduzida ( $Z$ ) da Distribuição Normal.

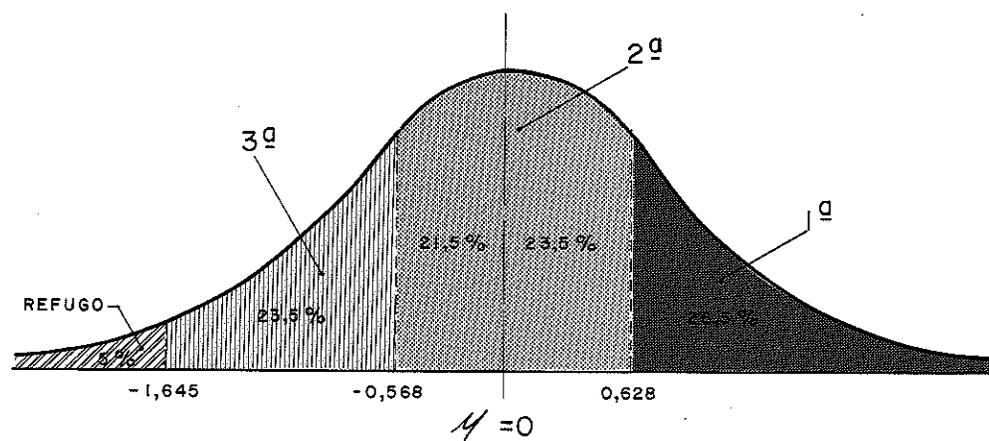


FIG. 22 - DISTRIBUIÇÕES DE FREQUÊNCIA EM TRÊS CATEGORIAS

É possível adotar outras distribuições de frequência, como por exemplo, para cinco ou seis categorias de classificação. Este procedimento, entretanto, só conduziria a uma dispersão dos resultados, dificultando sobremaneira o posterior se<sub>l</sub>ecionamento da madeira. Além do que, os intervalos de classe, destas categorias, ficariam tão próximos, que seria indiferente, por exemplo, o uso de uma peça de madeira classificada como de 5.<sup>a</sup> ou de 6.<sup>a</sup> categoria.

Como será visto adiante, é preferível a adoção de uma distribuição em número menor de categorias, por esta proporcionar maior rapidez na classificação das peças e por possibilitar, com mais racionalidade, o emprego adequado das mesmas em estruturas.

A distribuição de frequência, em quatro categorias, está representada na figura 23. Trata-se, portanto, de decidir a classificação da madeira entre três ou quatro categorias.

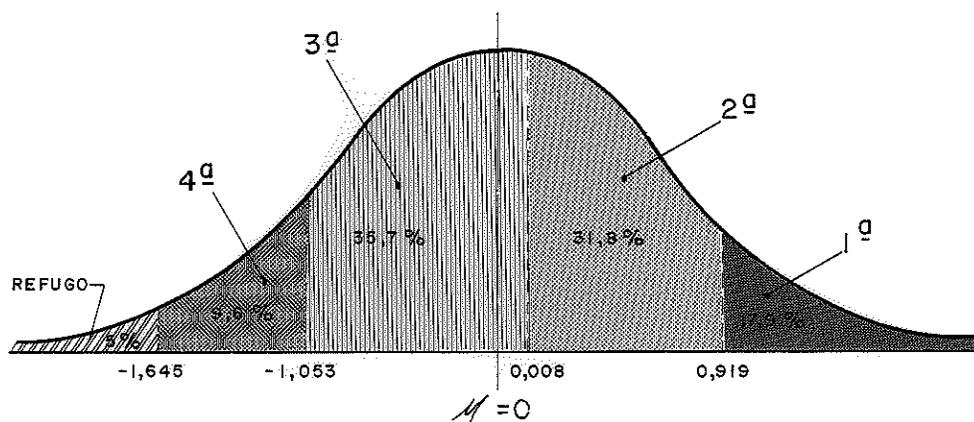


FIG. 23 - DISTRIBUIÇÕES DE FREQUÊNCIA EM QUATRO CATEGORIAS

A partir dos coeficientes da curva normal reduzida, da média amostral e do desvio padrão, determinam-se os módulos de elasticidade característicos em cada categoria, pela equação:

$$Z = \frac{X - \mu}{S}, \text{ onde}$$

$Z$  = Variável reduzida

$\mu$  = Média amostral = 94.607,59 Kg/cm<sup>2</sup>

$S$  = Desvio padrão = 16.989,77 Kg/cm<sup>2</sup>

$X$  = Variável procurada.

Assim, os módulos de elasticidade característicos, para a distribuição em três e quatro categorias, estão representados, a seguir, nas figuras 24 e 25.

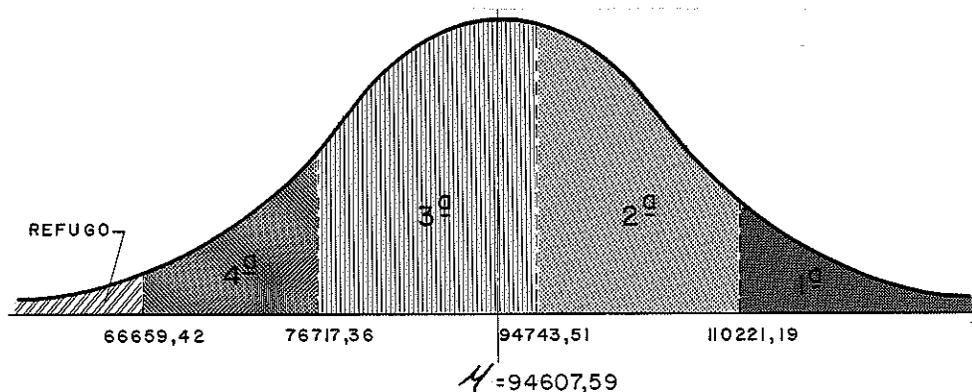


FIG.24 - MÓDULOS DE ELASTICIDADE CARACTERÍSTICOS PARA QUATRO CATEGORIAS (Kg/cm<sup>2</sup>)

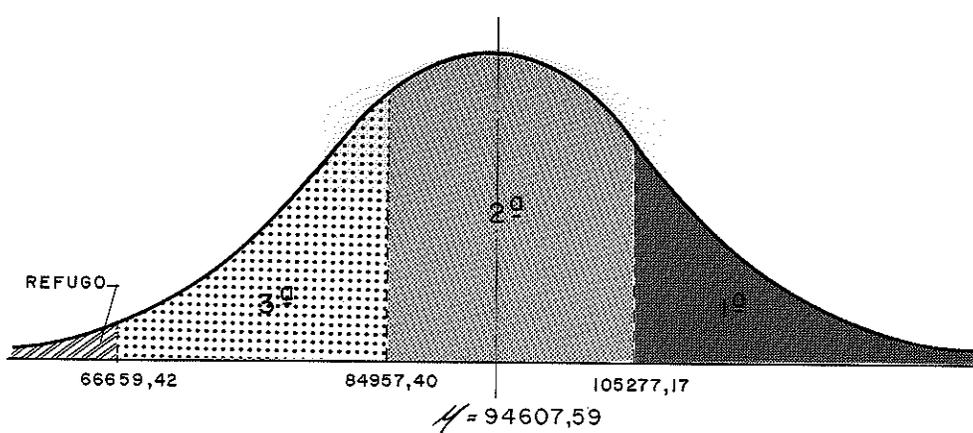


FIG.25 - MÓDULOS DE ELASTICIDADE CARACTERÍSTICOS PARA TRÊS CATEGORIAS (Kg/cm<sup>2</sup>)

Com a finalidade de orientar a decisão da classificação da madeira, entre três ou quatro categorias, segue-se o cálculo das tensões admissíveis, na compressão paralela, de uma peça de seção transversal de  $12 \times 12 \text{ cm}^2$ , de comprimento igual a 350 cm, e apoiada nas extremidades.

Sendo o momento de inércia (J) e a área da seção transversal (S) conhecidos:

$$J = 1\,728\text{cm}^4$$

$$S = 144\text{cm}^2, \text{ tem-se o raio de giração}$$

(i) que é dado por:

$$i = \sqrt{\frac{J}{S}}, \text{ e dessa maneira obtém-se o índice de esbeltez } (\lambda), \text{ dado por:}$$

índice de esbeltez ( $\lambda$ ), dado por:

$$\lambda = \frac{l}{i} = \frac{350}{3,46} = 101,04$$

O valor do índice de esbeltez encontrado ( $\lambda$ ) caracteriza esta peça como longa, isto é, o cálculo das tensões obedece a expressão de Euler (NB-11):

$$\bar{\sigma}_{fl} = \frac{\pi^2 \cdot E}{4 \lambda^2}, \quad \text{que é função do módulo de$$

elasticidade. As tensões admissíveis de flambagem são, portanto:

- 4.<sup>a</sup> Categoria - Limite Inferior

$$\bar{\sigma}_{fl} = \frac{\pi^2 \cdot 66\,659,42}{4 \cdot (101,04)^2} = 16,11 \text{ Kg/cm}^2$$

4.<sup>a</sup> Categoria/3.<sup>a</sup> Categoria

$$\bar{\sigma}_{fl} = \frac{\pi^2 \cdot 76\,717,36}{4 \cdot (101,04)^2} = 18,54 \text{ Kg/cm}^2$$

3.<sup>a</sup> Categoria/2.<sup>a</sup> Categoria

$$\bar{\sigma}_{fl} = \frac{\pi^2 \cdot 94\,743,51}{4 \cdot (101,04)^2} = 22,90 \text{ Kg/cm}^2$$

2.<sup>a</sup> Categoria/1.<sup>a</sup> Categoria

$$\bar{\sigma}_{fl} = \frac{\pi^2 \cdot 110\,221,19}{4 \cdot (101,04)^2} = 26,64 \text{ Kg/cm}^2$$

Estas tensões estão graficamente representadas abaixo (Fig. 26).

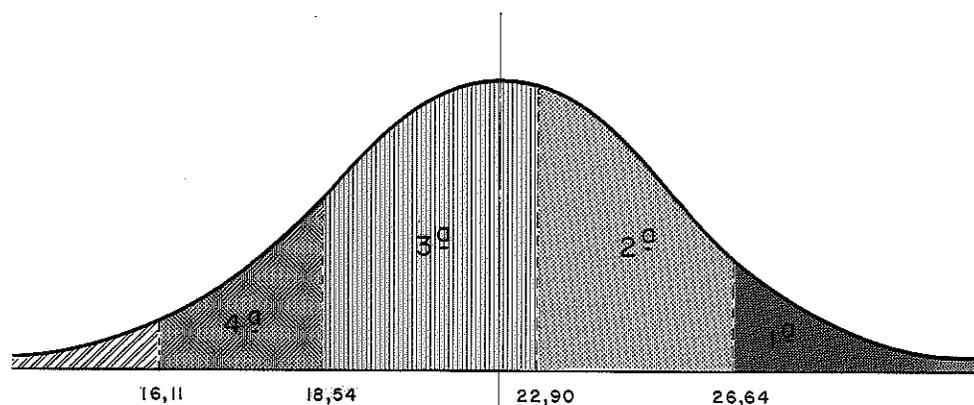


FIG. 26 - DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES EM QUATRO CATEGORIAS  
(Kg/cm<sup>2</sup>)

Neste gráfico, observa-se que o intervalo de variação das tensões, classificadas como de 4.<sup>a</sup> categoria, é de apenas 2,43 Kg/cm<sup>2</sup>. Em termos de capacidade de carga esta variação é pequena, não justificando a adoção deste intervalo de classificação. Além do mais, a heterogeneidade e anisotropia, próprias da constituição da madeira, contribuem para que os ensaios físicos e mecânicos apresentem grande dispersão de resultados e, nestas condições, os intervalos pequenos de classificação pouco representam em termos de qualificação da madeira.

A distribuição das tensões em três categorias apresenta-se mais equilibrada, pois os resultados em torno da média amostral são equitativamente distribuídos, além de permitirem uma conclusão mais rápida acerca da qualidade da madeira. Indiscutivelmente, a distribuição em apenas três categorias define e estabelece o controle tecnológico da madeira.

Para o exemplo de aplicação, veja na figura 27, a distribuição das tensões em três categorias.

Neste caso, o intervalo de variação das tensões é, da 1.<sup>a</sup> para a 2.<sup>a</sup> categoria, de 4,91 Kg/cm<sup>2</sup> e da 2.<sup>a</sup> para a 3.<sup>a</sup>, de 4,42 Kg/cm<sup>2</sup>, o que indica portanto, uma distribuição de intervalos de classificação coerente e equitativa para a finalidade proposta.

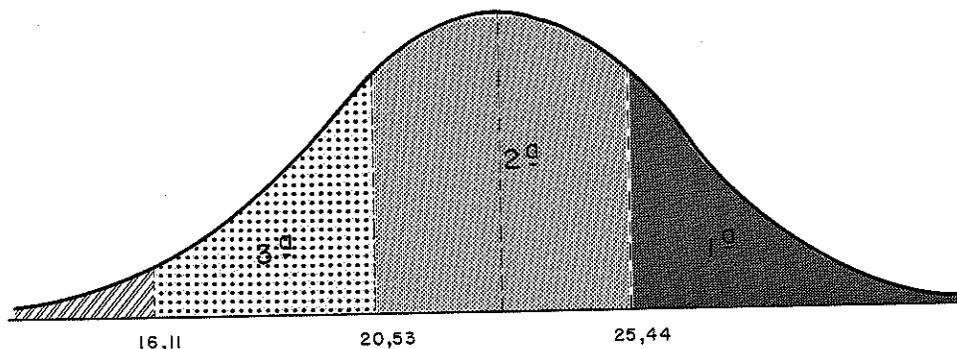


FIG.27 DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES EM TRÊS CATEGORIAS  
(Kg/cm<sup>2</sup>)

Assim, a Classificação da Madeira pela Resistência, como indica a figura 25, é definida em três categorias, a saber:

- |                             |  |
|-----------------------------|--|
| 1. <sup>a</sup> Categoria - | $E \geq 105.277 \text{ Kg/cm}^2$                         |
| 2. <sup>a</sup> Categoria - | $84957 \text{ Kg/cm}^2 \leq E < 105.277 \text{ Kg/cm}^2$ |
| 3. <sup>a</sup> Categoria - | $66659 \text{ Kg/cm}^2 \leq E < 84.957 \text{ Kg/cm}^2$  |
| -- Refugo -                 | $E < 66.659 \text{ Kg/cm}^2$                             |

### V.3 - APLICAÇÃO DOS RESULTADOS

Com o objetivo de simplificar os cálculos envolvidos na determinação das tensões admissíveis e na determinação do módulo de elasticidade, o autor elaborou três diagramas que são explicados a seguir; o primeiro diagrama foi construído com a finalidade de permitir ao mesmo tempo:

- 1º) - Determinar o módulo de elasticidade pelo "Ensaio de Obra";
- 2º) - Classificar a madeira, e
- 3º) - Obter a provável tensão de ruptura na flexão.

Para a construção deste diagrama, fixou-se o vão livre da peça a ser testada em 3,00 metros, e para o carregamento foram fixados duas alternativas: 50 Kg ou 20 Kg.

Desse modo, a equação da flecha para a determinação do módulo de elasticidade, com uma carga concentrada no meio do vão livre, é expressa por:

$$E = \frac{P.L^3}{48.\Delta f.J} \quad \text{com,}$$

$$P = 50 \text{ Kg ou } 20 \text{ Kg;}$$

$$L = 300 \text{ cm;}$$

$J = J_{\text{mín.}} = 216 \text{ cm}^4 \text{ ou } 288 \text{ cm}^4$ , correspondentes às vigas de seção transversal  $(6 \times 12)\text{cm}^2$  ou  $(6 \times 16)\text{cm}^2$ , respectivamente;

$\Delta f$  = diferença medida no ensaio, entre a flecha final e a inicial.

Conhecido o módulo de elasticidade, obtêm-se, no Diagrama 1, a classificação da madeira ensaiada com base nas categorias definidas no parágrafo anterior.

O Diagrama 1 permite ainda determinar, através da equação de correlação não-linear definida no § IV.2, a provável tensão de ruptura na flexão, ou seja:

$$\sigma_F = 9,723.10^{-3} \cdot E^{9,875.10^{-6}} \quad (\text{Kg/cm}^2)$$

Esta equação estabelece em 86,25% a probabilidade de estimar-se  $\sigma_F$ . Portanto, um valor de  $\sigma_F$  mais próximo do valor real e, conseqüentemente, bastante a favor da segurança será 86,25% do valor obtido, o qual é equivalente à seguinte equação, utilizada no Diagrama 1:

$$\sigma_F = 0,8625 (9,723.10^{-3} \cdot E^{9,875.10^{-6}})$$

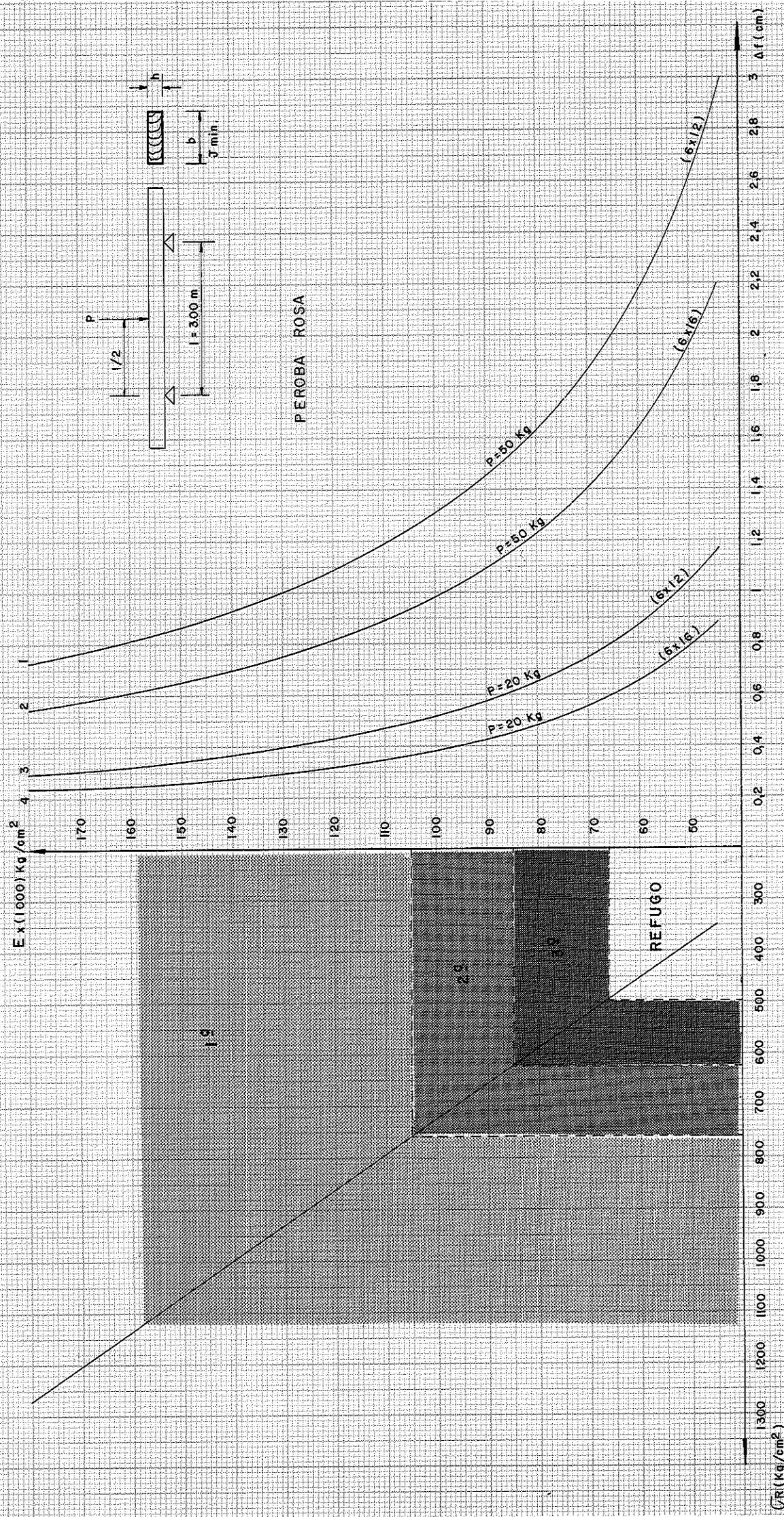


DIAGRAMA 1 - CLASSIFICAÇÃO DA MADEIRA E DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE RUPTURA NA FLEXÃO SIMPLES

Os diagramas seguintes referem-se ao cálculo das tensões admissíveis da madeira, quando submetida à compressão paralela às fibras.

Para este tipo de solicitação, a Norma Brasileira (NB-11) distingue três tipos de dimensionamento que devem ser observados:

- a) Dimensionamento de peças curtas;
- b) Dimensionamento de peças intermediárias, e
- c) Dimensionamento de peças longas.

A caracterização de cada uma destas peças é determinada em função do índice de esbeltez ( $\lambda$ ) encontrado. Conhecido este valor, o cálculo obedece ao seguinte critério:

- 1º) - Se  $\lambda \leq 40$  - peças curtas;
- 2º) - Se  $40 < \lambda \leq \lambda_0$  - peças intermediárias;
- 3º) - Se  $\lambda_0 < \lambda \leq 140$  - peças longas.

Para peças curtas, a tensão admissível na compressão paralela é definida como sendo:

$$\bar{\sigma}_c < 0,2 \sigma_c \quad (\text{NB-11, art. 51}) \text{ onde,}$$

$\sigma_c$  = tensão da ruptura média obtida nos ensaios de compressão paralela.

Para peças longas, ocorre o problema de instabilidade, fenômeno conhecido como flambagem. Euler determinou o valor crítico ( $P_{f\ell}$ ) da carga de flambagem em peças de igual seção transversal e comprimentos diferentes. Estes comprimentos são designados como comprimentos de flambagem ( $L_{f\ell}$ ):

$$P_{f\ell} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J}{L_{f\ell}^2} \quad \text{sendo,}$$

E = módulo de elasticidade médio, obtido nos ensaios de flexão estática.

Assim, o valor da tensão de flambagem, para as peças longas, é expresso por:

$$\sigma_{fl} = \frac{P_{fl}}{S} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J}{L_{fl}^2 \cdot S} \quad \text{sendo,}$$

$$i^2 = \frac{J}{S} \quad \text{e} \quad \lambda = \frac{L_{fl}}{i} \quad \text{então:}$$

$$\sigma_{fl} = \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2}$$

e o valor da tensão admissível de flambagem, preconizado pela NB-11, é o seguinte:

$$\bar{\sigma}_{fl} = \frac{\pi^2 \cdot E}{4 \cdot \lambda^2}$$

Como o estudo de Euler é baseado na elasticidade do material, o cálculo da tensão admissível de flambagem só é válido até a tensão no limite de proporcionalidade, ou seja:

$$\bar{\sigma}_{fl} = \frac{\pi^2 \cdot E}{4 \cdot \lambda^2} \leq \bar{\sigma}_p \quad \text{com,}$$

$$\bar{\sigma}_p = \frac{2}{3} \bar{\sigma}_c$$

Introduzindo-se este valor na equação de Euler, obtêm-se o valor mínimo do índice de esbeltez ( $\lambda_0$ ), para o qual pode-se utilizar esta equação:

$$\frac{\pi^2 \cdot E}{4 \cdot \lambda_0^2} = \frac{2}{3} \bar{\sigma}_c \quad \text{logo,}$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{3 \cdot \pi^2 \cdot E}{8 \cdot \bar{\sigma}_c}}$$

Portanto, o valor de  $(\lambda_0)$ , como indica a expressão acima, varia com a espécie de madeira. Para a Peroba Rosa, este valor é calculado tomando-se:

$$\bar{\sigma}_c = 85 \text{ Kg/cm}^2$$

$$E = 94.100 \text{ Kg/cm}^2$$

donde se obtém  $\lambda_0 = 64$

A representação gráfica da variação da tensão admissível de flambagem, em função do índice de esbeltez, pode ser vista na figura 28 abaixo:

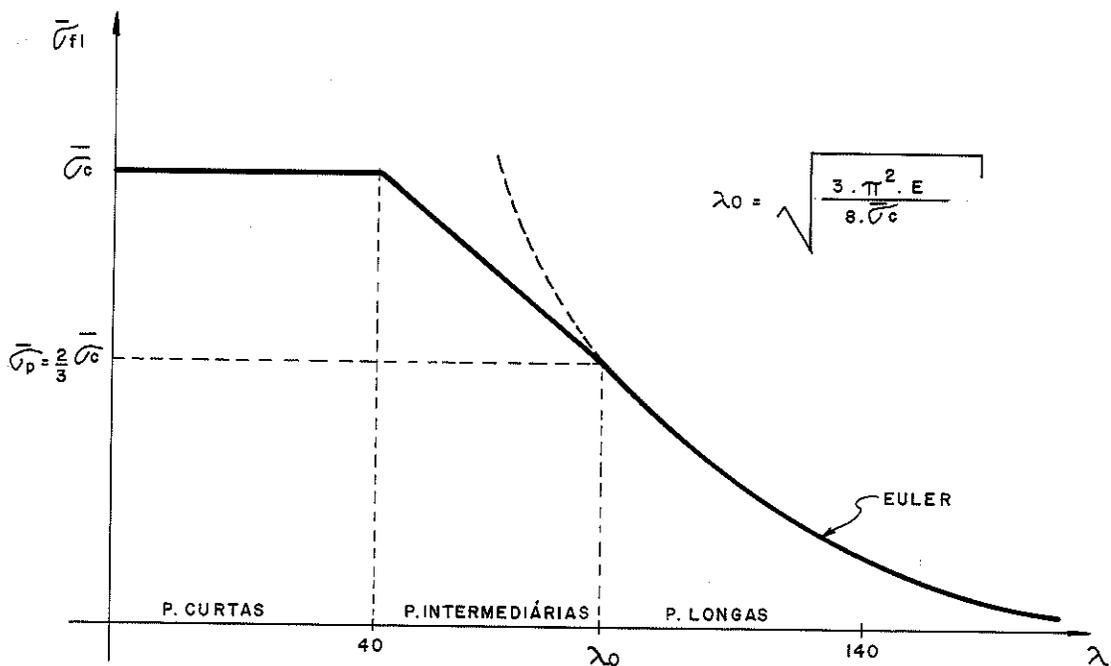
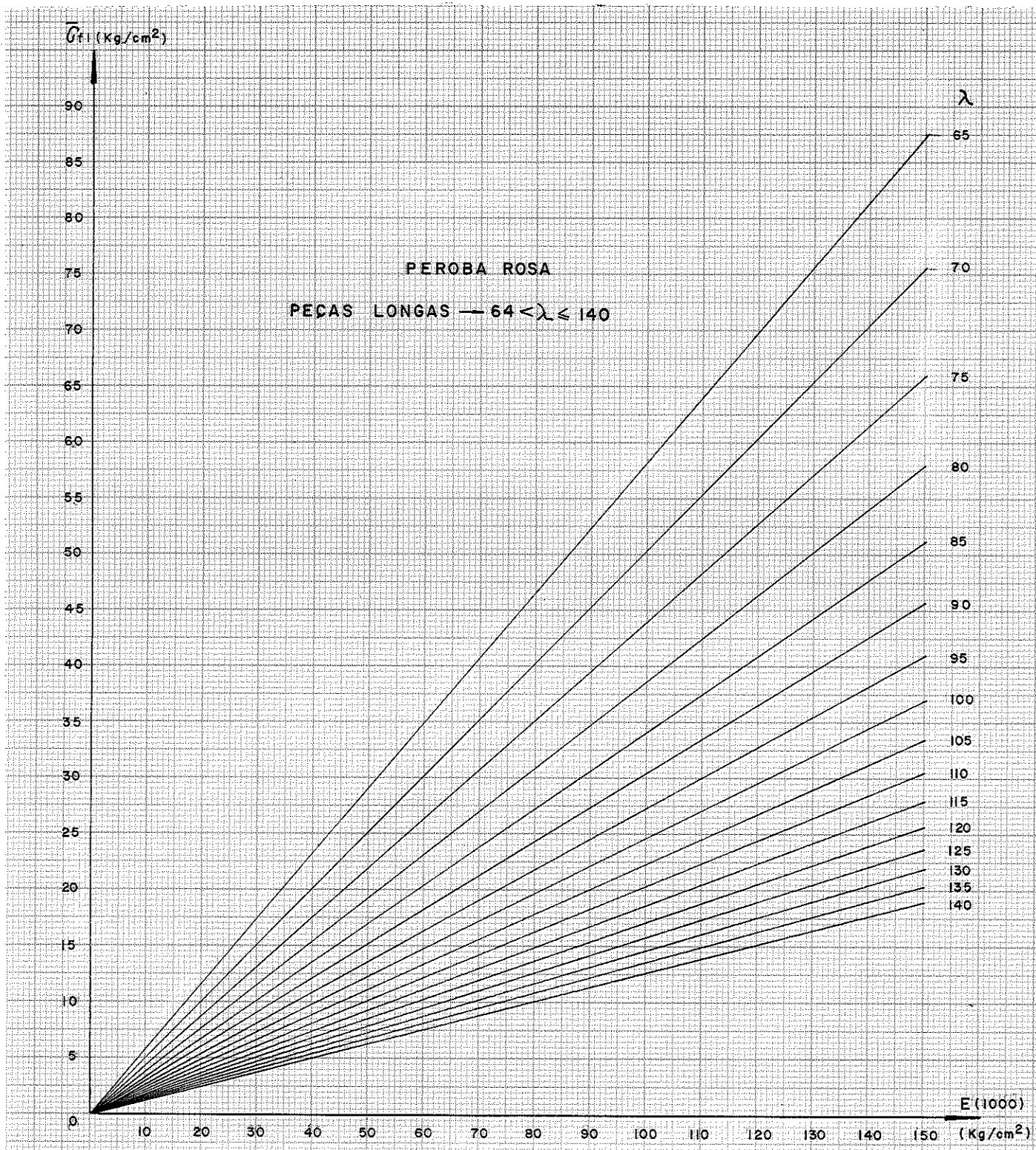


FIG.28 - VARIACÃO DA TENSÃO ADMISSÍVEL DE FLAMBAGEM EM FUNÇÃO DO ÍNDICE DE ESBELTEZ

A tensão admissível de flambagem, para as peças intermediárias, foi obtida experimentalmente e está representada na figura 28, através da equação da reta compreendida entre os limites de  $40 < \lambda < \lambda_0$ :



**DIAGRAMA 2 - DETERMINAÇÃO DA TENSÃO ADMISSÍVEL DE FLAMBAGEM**  
**- PEÇAS LONGAS -**

$$\bar{\sigma}_{fl} = \bar{\sigma}_c \left( 1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{\lambda - 40}{\lambda_0 - 40} \right)$$

Assim, as tensões admissíveis de flambagem, para os três casos estudados, resumem-se em:

1º) - Peças curtas:  $\lambda \leq 40$

$$\bar{\sigma}_{fl} = \bar{\sigma}_c = 0,2\sigma_c$$

2º) - Peças intermediárias:  $40 < \lambda \leq \lambda_0$

$$\bar{\sigma}_{fl} = \bar{\sigma}_c \left( 1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{\lambda - 40}{\lambda_0 - 40} \right)$$

3º) - Peças longas:  $\lambda_0 < \lambda \leq 140$

$$\bar{\sigma}_{fl} = \frac{\pi^2 \cdot E}{4 \cdot \lambda^2} \quad \text{sendo}$$

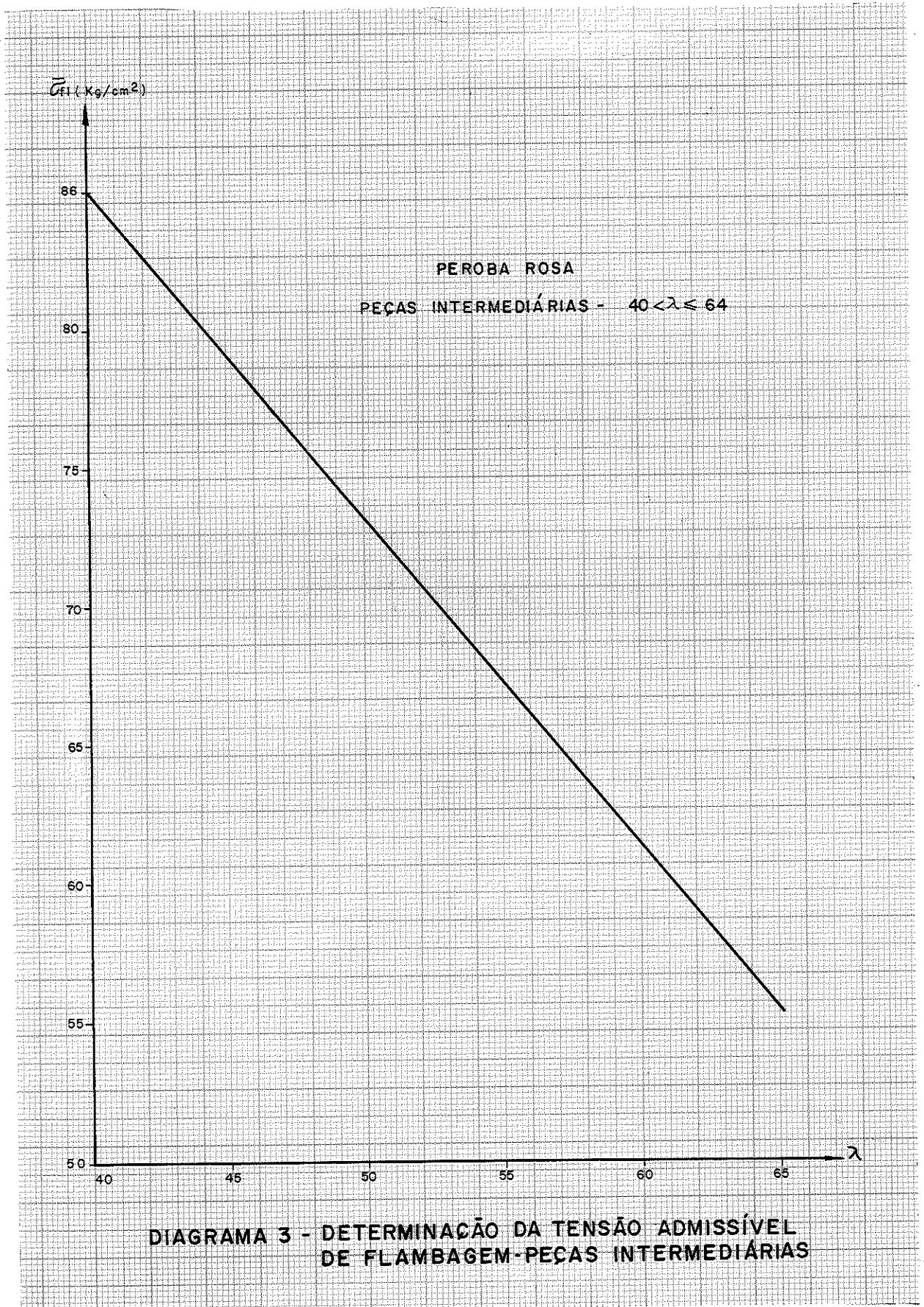
$E$  = módulo de elasticidade na flexão estática.

Portanto, conhecido o módulo de elasticidade e o índice de esbeltez, determina-se, pelo Diagrama 2, a tensão admissível de flambagem para peças longas.

Para peças intermediárias, construiu-se o Diagrama 3, que determina a tensão admissível de flambagem em função do índice de esbeltez, baseando-se na equação:

$$\bar{\sigma}_{fl} = \bar{\sigma}_c \left( 1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{\lambda - 40}{\lambda_0 - 40} \right) \quad \text{com}$$

$$\bar{\sigma}_c = 85 \text{ Kg/cm}^2 \quad \text{e} \quad \lambda_0 = 64$$



## VI - EXPERIMENTAÇÃO EM LABORATÓRIO

### VI.1 - INTRODUÇÃO

Normalmente, para o cálculo e dimensionamento das estruturas de madeira, adota-se um módulo de elasticidade médio para cada espécie, isto é, admite-se a hipótese de que a estrutura seja constituída de material homogêneo. Entretanto, devem ser analisados alguns aspectos, como por exemplo:

- Origem da madeira, ou seja a localização geográfica de onde a árvore fora cortada para a obtenção das peças. Uma vez que as condições do solo influem na resistência mecânica da madeira, bem como nas alterações do seu módulo de elasticidade relativamente aos valores adotados, além das alterações anatômicas e fisiológicas naturais, que concorrem para fixar sua heterogeneidade.

- Condições climáticas durante a formação do lenho. Climas quentes e frios, alternadamente, introduzem características diferentes de crescimento na árvore, de época para época, as quais acentuam sobremaneira sua condição de material heterogêneo.

- Posicionamento das peças serradas, oriundas das diversas partes da árvore. Esta particularidade relaciona-se com a maior ou menor presença de cerne e alburno na constituição das peças. Sabe-se que o cerne é formado nas partes mais velhas da árvore, possuindo maior acumulação de substâncias orgânicas polimerizadas, e portanto mais resistente do que o alburno, que é constituído de material mais novo, menos denso, e com módulo de elasticidade mais baixo.

Todos esses fatores contribuem para que a madeira se qualifique como um material heterogêneo. Desta sorte, pensando se em termos de resistência, no caso do material ser considerado indiscriminadamente homogêneo, corre-se o risco de que pe-

ças mais fracas sejam colocadas em posições críticas, e peças mais resistentes em pontos de menor solicitação, em detrimento das possibilidades estruturais da madeira, caracterizado pela inadequada utilização da mesma, em consequência da adoção de uma hipótese muito simplificada.

Uma das finalidades do coeficiente de segurança é suprir esta deficiência, conquanto ele não seja responsável pela errônea utilização das condições intrínsecas da madeira.

A experimentação descrita a seguir, feita em laboratório, confirmou a segurança obtida de uma estrutura construída com peças classificadas e dispostas segundo o grau de solicitação exigida, comparada com idêntica estrutura onde, porém, as peças são dispostas aleatoriamente, sem o devido controle tecnológico, como se verifica num canteiro de obras.

## VI.2 - DEFINIÇÃO DOS MODELOS ESTRUTURAIS

O programa de ensaios, a ser delineado, consistiu basicamente na construção e realização de ensaios de dois modelos estruturais, em laboratório.

O primeiro modelo constituiu-se de cinco estruturas em forma de tesouras simples, nas quais as peças de madeira foram dispostas segundo a classificação das peças obtida pelo "Ensaio de Obra", isto é, a primeira tesoura foi construída com as peças que apresentaram os maiores módulos de elasticidade, a segunda, com as peças que apresentaram módulos de elasticidade inferiores aos da 1ª., e assim sucessivamente até a última. A finalidade da construção dessas tesouras foi a de comprovar a variação da capacidade de carga de cada estrutura, em função apenas da variação da qualidade de suas peças.

O segundo modelo consistiu na construção de dois arcos treliçados, em escala reduzida, destinados à cobertura de grandes vãos (a partir de 25 metros).

No arco número 1, as peças classificadas foram dispostas de acordo com as solicitações nas barras, ou seja, nos pontos críticos foram utilizadas as peças de maior módulo de elasticidade, e nos pontos menos solicitados empregaram-se peças de menores módulos de elasticidade. No arco número 2, as peças foram dispostas, aleatoriamente, ao longo da estrutura, tal qual se verifica num canteiro de obras. Isto significa que, em posições de maior solicitação, poderiam ser empregadas pe-

ças com módulo de elasticidade alto e vice-versa.

Estes ensaios serviram para determinar o coeficiente de segurança global da estrutura, construída com peças de resistências conhecidas e em posições pré-determinadas.

Definidos os modelos estruturais, passa-se a seguir a analisar, em particular, os principais aspectos referentes à concepção, montagem e realização de ensaios de cada modelo.

### VI.3 - MODELO ESTRUTURAL Nº 1

#### VI.3.1 - ENSAIOS PRELIMINARES

Para a construção das tesouras, utilizaram-se vigas de Peroba Rosa de seção transversal de  $(6 \times 12 \text{ cm}^2)$ , que foram desdobradas em diversas peças de dimensões para uso nos modelos.

O esquema estrutural dos modelos, como pode ser visto na Fig. 29, foi construído na escala 1:2,5 da estrutura real e, portanto, suas peças tiveram as seguintes dimensões:

- banzo superior: 1 peça de  $(2,4 \times 4,8 \text{ cm}^2)$
- banzo inferior: 2 peças de  $(1,2 \times 4,8 \text{ cm}^2)$

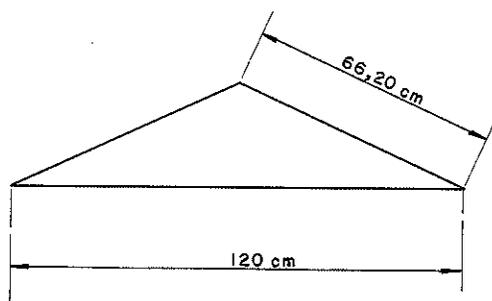


FIG.29- ESQUEMA GERAL DOS  
MODELOS EM TESOURAS

As peças foram retiradas de 5 vigas e ensaiadas à flexão (Ensaio de Obra) para o conhecimento do módulo de elasticidade. Os resultados obtidos desses ensaios são os seguintes:

- a) - Desdobradas em peças para uso no banzo superior:

Viga 1

Peça (Nº)	E (Kg/cm <sup>2</sup> )	Classificação (categoria)
1	76329	3. <sup>a</sup>
2	87354	2. <sup>a</sup>
3	114176	1. <sup>a</sup>
4	99742	2. <sup>a</sup>

Viga 2

Peça (Nº)	E (Kg/cm <sup>2</sup> )	Classificação (categoria)
1	67345	3. <sup>a</sup>
2	81306	3. <sup>a</sup>
3	86728	3. <sup>a</sup>

Viga 3

Peça (Nº)	E (Kg/cm <sup>2</sup> )	Classificação (categoria)
1	80793	3. <sup>a</sup>
2	73485	3. <sup>a</sup>
3	72947	3. <sup>a</sup>
4	115393	1. <sup>a</sup>

Viga 4

Peça (Nº)	E (Kg/cm <sup>2</sup> )	Classificação (categoria)
1	118211	1. <sup>a</sup>
2	117755	1. <sup>a</sup>
3	120332	1. <sup>a</sup>
4	123656	1. <sup>a</sup>

b) - Desdobradas em peças para uso no banzo inferior.

Viga 5

Peça (Nº)	E (Kg/cm <sup>2</sup> )	Classificação (categoria)
1	92486	2. <sup>a</sup>
2	110706	1. <sup>a</sup>
3	85706	2. <sup>a</sup>
4	78155	3. <sup>a</sup>
5	104856	2. <sup>a</sup>
6	74510	3. <sup>a</sup>
7	97250	2. <sup>a</sup>
8	94150	2. <sup>a</sup>
9	89946	2. <sup>a</sup>
10	106273	1. <sup>a</sup>
11	69886	3. <sup>a</sup>
12	78440	3. <sup>a</sup>
13	76936	3. <sup>a</sup>
14	81414	3. <sup>a</sup>

## VI.3.2 - CONSTRUÇÃO DOS MODELOS

Como já foi dito, os modelos foram construídos obedecendo às resistências das peças, determinadas através do "Ensaio de Obra".

De acordo com os resultados obtidos em VI.3.1, os modelos foram montados conforme se mostra na Fig. 30.

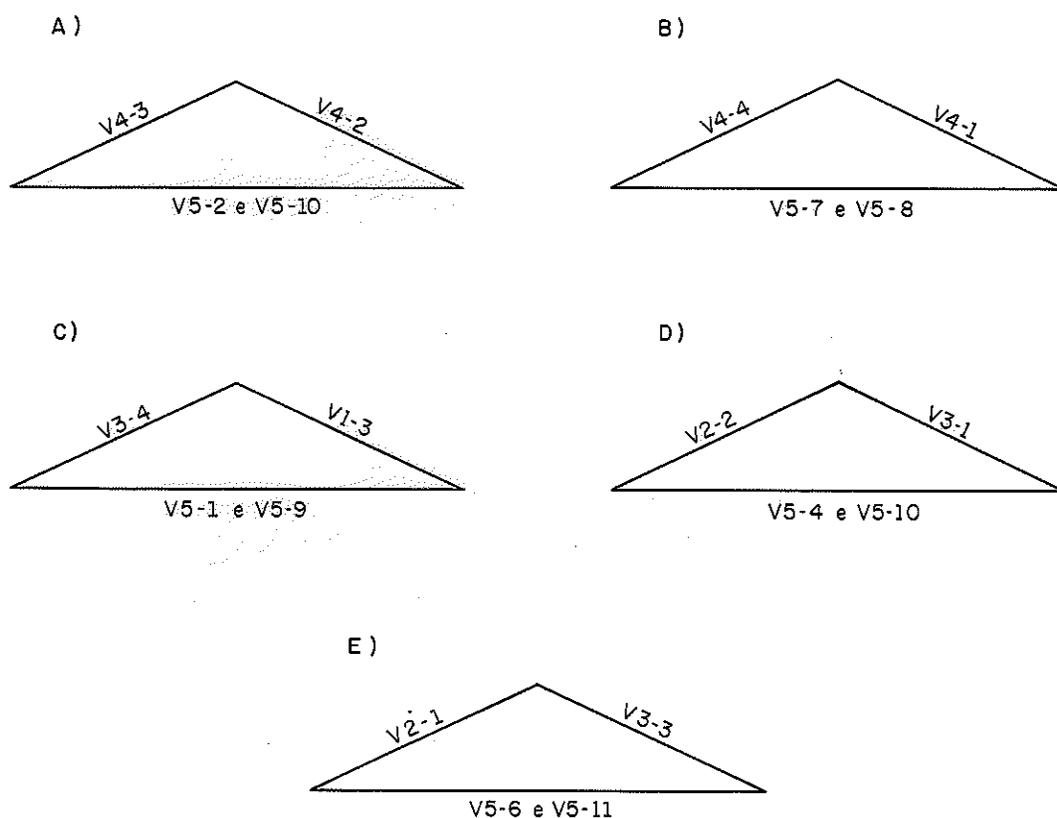


FIG.30 - ESQUEMA DE MONTAGEM DOS MODELOS ESTRUTURAIS N° 1

Nestes modelos, as designações das peças referem-se à viga da qual foi obtida seguida do número da peça desdobrada, por exemplo a peça V3.4 refere-se a viga 3 com a peça 4.

Como se pode observar na listagem das peças desdobradas, a construção dos modelos estruturais, apresentados na figura 30, obedecem a uma ordem decrescente de módulos de elasticidade nas estruturas de "A" a "E".

Uma sexta estrutura foi construída com as peças V1-2, V1-4, V5-3 e V5-14. Entretanto, devido as imperfeições na montagem das ligações desta estrutura e visto que estas poderiam interferir nos resultados dos ensaios, decidiu-se eliminá-la do conjunto.

## VI.3.3 - ENSAIOS PRINCIPAIS

Como se mostra na Fig. 31, o ensaio das tesouras consistiu na aplicação de uma carga  $P$  na estrutura até que se verificasse a ruptura total ou parcial de suas peças.

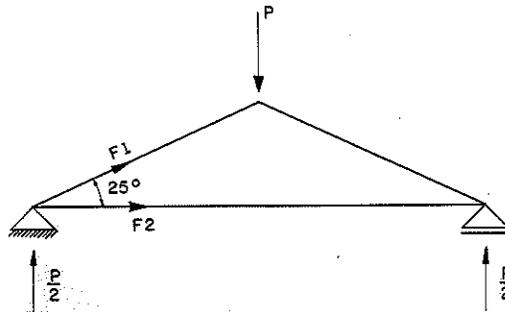


FIG.31- ESQUEMA DE CARREGAMENTO NOS MODELOS

Nesta estrutura, os dimensionamentos das peças e das ligações bem como, o cálculo de carga  $P$  admissível e o cálculo da carga de ruptura do modelo foram feitos partindo-se das tensões admissíveis, adotadas para o cálculo de estruturas de madeira da espécie considerada. Neste caso, como se trata de Peroba Rosa, os valores de cálculo, preconizados pela NB-11, são os seguintes:

$$\bar{\sigma}_c = 0,2\sigma_C = 85 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\bar{\sigma}_t = 0,15\sigma_F = 135 \text{ Kg/cm}^2$$

$$E_{\text{médio}} = 94100 \text{ Kg/cm}^2$$

Desta forma, pode-se então determinar os esforços admissíveis " $\bar{F}_1$ " e " $\bar{F}_2$ " da estrutura, e conseqüentemente a carga " $P$ " admissível e de ruptura.

A tensão admissível para o banzo superior, por tratar-se de peça comprimida, é calculada determinando-se inicialmente o índice de esbeltez da peça em questão, que possui as seguintes características geométricas:

$$l = 66,20 \text{ cm}$$

$$S = 2,40 \times 4,80 = 11,52 \text{ cm}^2$$

$$J_{\text{mín}} = 5,53 \text{ cm}^4$$

$$i_{\text{mín}} = 0,69 \text{ cm}$$

portanto:

$$\lambda = \frac{l}{i_{\text{mín.}}} = 96, \quad \text{conseqüentemente trata-se de}$$

peça longa, e neste caso a tensão admissível de flambagem obedece a expressão de Euler:

$$\bar{\sigma}_{fl} = \frac{\pi^2 \cdot E}{4 \cdot \lambda^2} = 25,43 \text{ Kg/cm}^2, \text{ valor este que possibilita a determinação da carga admissível } \bar{F}_1 \text{ no banzo superior:}$$

lita a determinação da carga admissível " $\bar{F}_1$ " no banzo superior:

$$\bar{F}_1 = S \cdot \bar{\sigma}_{fl} = 293 \text{ Kg}$$

No banzo inferior, a peça é tracionada, sendo portanto necessário calcular a área útil que irá resistir ao esforço admissível " $\bar{F}_2$ ", isto é:

$$\bar{F}_2 = S_u \cdot \bar{\sigma}_t = (11,52 - 3,05) \cdot 135 = 1143 \text{ Kg.}$$

Conhecidos " $\bar{F}_1$ " e " $\bar{F}_2$ ", pode-se determinar o valor admissível da carga de ensaio "P" necessário ao banzo superior e inferior.

$$\bar{P}_1 = \bar{F}_1 \cdot 2 \text{ sen } \alpha = 248 \text{ Kg}$$

$\bar{P}_2 = \bar{F}_2 \cdot 2 \text{ tg } \alpha = 1066 \text{ Kg}$ , e com estes valores determinam-se, finalmente, as cargas de ensaio necessárias para romper os banzos:

$$P_{1 \text{ rup.}} = 4 \cdot \bar{P}_1 = 991 \text{ Kg}$$

$$P_{2 \text{ rup.}} = \frac{1}{0,15} \cdot \bar{P}_2 = 7106 \text{ Kg.}$$

Conclui-se deste modo, que ocorrerá flambagem no banzo superior, tendo em vista que a carga "P" necessária para romper o banzo inferior é maior que esta. Assim, teoricamente, os valores críticos para a carga de ensaio "P", valem:

$$\bar{P}_{fl} = 248 \text{ Kg}$$

$$P_{rup.} = 991 \text{ Kg.}$$

Conhecidos esses valores, passou-se à etapa de montagem dos aparelhos de ensaio. De acordo com o esquema de carregamento, apresentado na figura 31, a montagem consistiu na instalação de um macaco hidráulico (com capacidade nominal de 5 toneladas) na viga de reação existente no Laboratório de Madei

ras-LaMEM. Este macaco é provido de célula de carga, calibrada de modo a ser possível determinar o carregamento aplicado em função da deformação sofrida por esta célula.

Como não se desejava medir o esforço atuante nas barras da estrutura, e sim a carga "P" de ruptura do modelo, o esquema de carregamento tornou-se bastante simples, necessitando de apenas posicionar a estrutura e submetê-la ao carregamento que iria ser transmitido diretamente pelo macaco hidráulico.

Em todas as estruturas ensaiadas, não se verificou ruptura total ou parcial das peças dos modelos, na real acepção da palavra. Pelo o que se constatou nos ensaios, o termo adequado seria estado de "ruína" da estrutura, visto que as mesmas se deformaram a ponto de não permitirem incrementos de carga através do macaco. Em virtude de não ser possível prosseguir com o carregamento, admitiu-se esta carga como a máxima capaz de ser suportada pela estrutura.

É interessante ressaltar que este aspecto de comportamento dos modelos, evidenciado nos ensaios, é uma característica própria da madeira. Em virtude de seu baixo módulo de elasticidade, a madeira permite grandes deformações, sem que ocorra rupturas visíveis das peças de uma estrutura.

Os resultados obtidos nos ensaios das estruturas em apreço, bem como as análises e as conclusões obtidas, são apresentados a seguir. Juntamente com estes ensaios, estão apresentados os valores médios dos módulos de elasticidade do banzo superior de cada estrutura, visto que as deformações verificadas no ensaio foram causadas pela perda de estabilidade desses banzos.

ESTRUTURA (MODELO)	BANZO SUPERIOR E MÉDIO (Kg/cm <sup>2</sup> )	CLASSIFICAÇÃO DA PEÇA	CARGA DE RUÍNA (Kg)
A	121994	1ª	2091
B	117483	1ª	1873
C	114785	1ª	1851
D	81140	3ª	1525
E	70146	3ª	1361

No quadro da folha anterior, observa-se que, a priori, os valores da carga de ruína variam segundo a "qualidade" dos banzos, o que em primeira análise corresponde à expectativa de comportamento dos modelos. Estes resultados, porém, podem ser melhor analisados se comparados com a carga de ruptura teórica, obtida a partir do módulo de elasticidade do banzo superior, isto é:

$$P_{rup} = F_{1rup} \cdot 2 \operatorname{sen} \alpha \quad \text{com,}$$

$$F_{1rup} = S \sigma_{fl}.$$

A tensão de flambagem ( $\sigma_{fl}$ ) é calculada através da expressão de Euler, em virtude do banzo superior tratar-se de peça longa:

$$\sigma_{fl} = \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2}$$

e deste modo, calcula-se a carga de ruptura teórica, pela expressão deduzida:

$$P_{rup} = S \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2} \cdot 2 \operatorname{sen} \alpha$$

onde:

$$S = 11,52 \text{ cm}^2; \quad \lambda = 95,54 \text{ e } \operatorname{sen} \alpha = 0,42$$

Logo: 
$$P_{rup} = \frac{E}{94,98}$$

Para cada estrutura, os valores da carga de ruptura teórica, juntamente com o resultado experimental, estão apresentados no quadro a seguir.

ESTRUTURA (MODELO)	BANZO SUPERIOR E MÉDIO (Kg/cm <sup>2</sup> )	CARGA DE RUPTURA TEÓRICA (Kg)	CARGA DE RUÍNA EXPERIMENTAL (Kg)
A	121994	1284	2091
B	117483	1237	1873
C	114785	1208	1851
D	81140	854	1525
E	70146	738	1361

A análise de regressão linear, feita para esses dois resultados, tendo como variável dependente a carga de ruptura teórica e como variável independente a carga de ruína experimental, resultou a seguinte equação:

$$P_{\text{exp}} = 1,142 \cdot P_{\text{teor}} + 524,67$$

com um coeficiente de correlação linear igual a:

$$r = 0,974$$

evidenciando, deste modo, uma excelente correlação entre os resultados obtidos.

O teste da Hipótese Nula, para o coeficiente de correlação apresentado, indicou o seguinte coeficiente estatístico:

$$t = \frac{r\sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r^2}} = 7,45$$

Baseando-se no teste unilateral da Distribuição de Student, nos níveis de 0,05 e 0,01, para  $v = (N - 2)$  graus de liberdade, obtêm-se:

$$t_{0,95} = 1,70 < t \quad e$$

$t_{0,99} = 2,46 < t$ , o que significa rejeição à Hipótese Nula aos níveis apresentados, isto é, existe correlação entre os valores analisados.

Com base nos resultados das análises apresentadas, as conclusões dos ensaios realizados podem ser resumidas da seguinte forma:

- 1.<sup>a</sup>) Tendo em vista a compatibilidade dos resultados teórico e experimental, evidenciados nos ensaios, conclui-se que o módulo de elasticidade é o parâmetro preponderante que influi decisivamente na resistência da madeira.
- 2.<sup>a</sup>) Como demonstramos ensaios, a classificação da madeira, pelo "Ensaio de Obra", foi altamente eficiente, na avaliação da resistência da madeira,

sendo estabelecido, desta forma o controle tecnológico da madeira através deste ensaio.

No parágrafo seguinte, estuda-se o comportamento de uma estrutura de grande porte, composta de peças que foram submetidas ao controle tecnológico, determinado pelo "Ensaio de Obra". Neste estudo, apresenta-se ainda, o coeficiente de segurança global da estrutura classificada, em comparação com uma idêntica estrutura cujas peças foram dispostas ao acaso, como é feito normalmente num canteiro de obras.

#### VI.4 - MODELO ESTRUTURAL Nº 2

O estudo dos modelos estruturais, em arco treliçado a ser desenvolvido, baseia-se na Dissertação de Mestrado do Engº Francico Antônio Rocco Lahr, intitulada "ARCO TRELIÇADO DE MADEIRA - 1978". Com a permissão e a colaboração do Engº Rocco Lahr, foi possível estender o estudo da Classificação da Madeira a estruturas de grande porte, como é o caso do Arco Treliçado.

Assim, neste trabalho serão apresentados apenas os estudos relativos ao comportamento do arco, quando as peças que o constituem forem submetidas a um controle tecnológico, isto é, classificadas. As informações específicas acerca do cálculo da estrutura, detalhamento das ligações etc, por fazerem parte do trabalho do Engº Rocco Lahr, prescindem de menção neste trabalho.

##### VI.4.1 - ESTUDO DOS MODELOS REDUZIDOS

Para a construção dos modelos estruturais, as dimensões dos arcos foram reduzidas para a escala 1:3, em virtude do espaço físico disponível no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira - EESC - USP. Esta particularidade, entretanto, não levou a qualquer distorção dos resultados como ficou constatado na realização dos ensaios.

Algumas características dos modelos reduzidos, e uma vista geral da estrutura na Fig. 32, são apresentados a seguir:

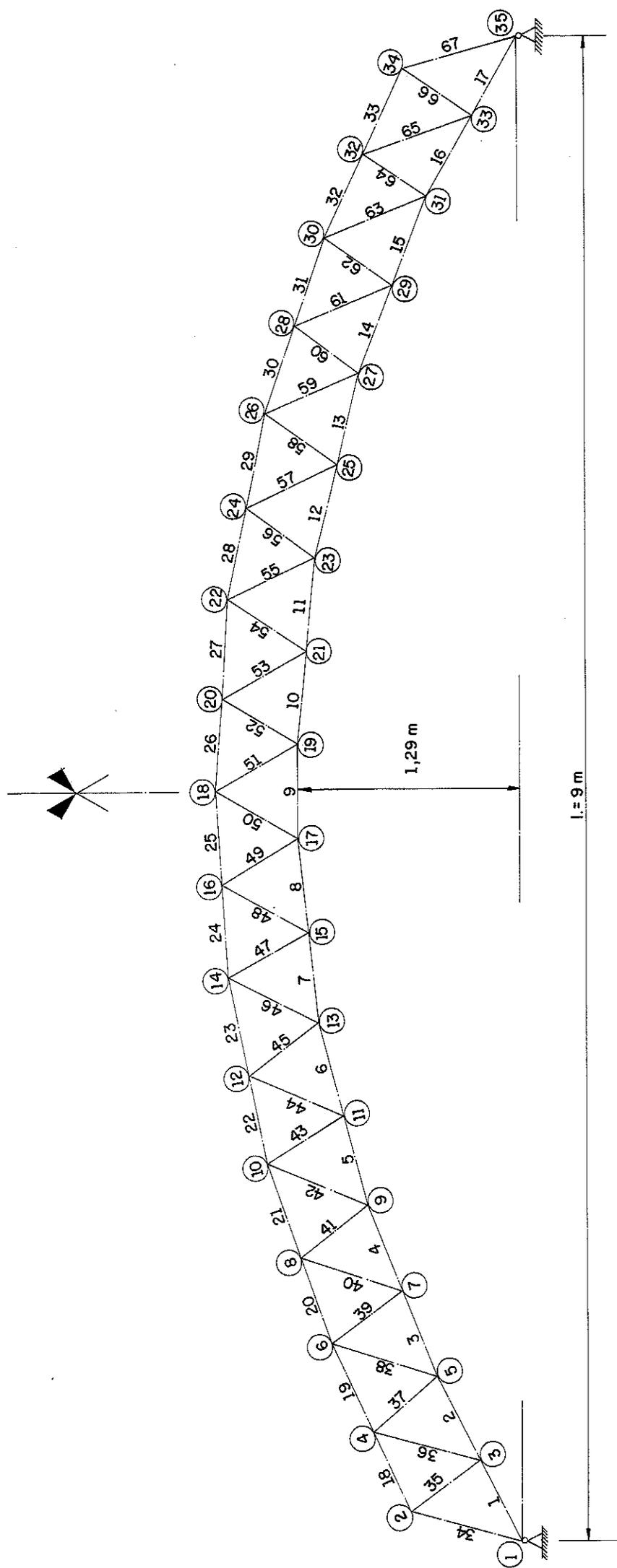


FIG.32 - ESQUEMA GERAL DOS MODELOS REDUZIDOS DO ARCO TRELICADO BIARTICULADO

- vão livre = 9,00 m
- espaçamento entre terças = 0,57 m
- espécie de madeira: Peroba Rosa = 900 Kg/m<sup>3</sup>
- equação do arco parabólico:

$$y = \frac{4.f}{l} x \left(1 - \frac{x}{l}\right)$$

- flecha central =  $\frac{l}{7} = 1,29$  m
- espaçamento entre banzos = 0,50 m
- seção transversal dos banzos = 2 peças de (2 x 4) cm<sup>2</sup>
- seção transversal das diagonais = 1 peça de (2x4) cm<sup>2</sup>
- coordenadas dos nós dos modelos reduzidos:

Nó	X	Y
1	0,00	0,00
2	0,15	0,67
3	0,49	0,25
4	0,70	0,91
5	0,98	0,50
6	1,20	1,48
7	1,48	0,70
8	1,73	1,33
9	2,02	0,92
10	2,27	1,52
11	2,55	1,05
12	2,83	1,65
13	3,10	1,20
14	3,38	1,75
15	3,65	1,27
16	3,93	1,80
17	4,22	1,32
18	4,50	1,83
19	4,78	1,32
20	5,07	1,80
21	5,35	1,27
22	5,62	1,75
23	5,90	1,20
24	6,17	1,65
25	6,45	1,05
26	6,73	1,52
27	6,98	0,92

continua

continuação...

28	7,27	1,33
29	7,52	0,70
30	7,80	1,48
31	8,02	0,50
32	8,30	0,91
33	8,51	0,25
34	8,85	0,67
35	9,00	0,00

Para os carregamentos usuais em estruturas, como o Arco Treliçado Biarticulado, verificam-se que os máximos esforços em barras do banzo superior ocorrem nas proximidades do centro do vão. Nas diagonais e no banzo inferior, os máximos esforços ocorrem nas vizinhanças dos apoios.

Admitindo-se, por exemplo, um carregamento sobre o arco estimado em:

- carga permanente = 41 Kg/m<sup>2</sup> de área coberta
- carga acidental = 30 Kg/m<sup>2</sup> de área coberta
- total = 71 Kg/m<sup>2</sup> de área coberta

e com espaçamento de 6,00 metros entre estruturas, tem-se os esforços solicitantes, nas barras do arco, calculados para meia estrutura:

Barra (Nº)	Esforço (Kg)	Barra (Nº)	Esforço (Kg)
1	-5260	34	-1940
2	-4020	35	+1230
3	-3410	36	-1590
4	-2310	37	+ 460
5	-1940	38	- 980
6	-2130	39	+1010
7	-1750	40	-1300
8	-1610	41	+ 570
9	-1350	42	- 330
18	-1420	43	- 100
19	-2200	44	+ 360
20	-2910	45	- 870
21	-3720	46	- 590
22	-3830	47	+ 460
23	-3330	48	- 490
24	-3850	49	- 140
25	-4060	50	- 680

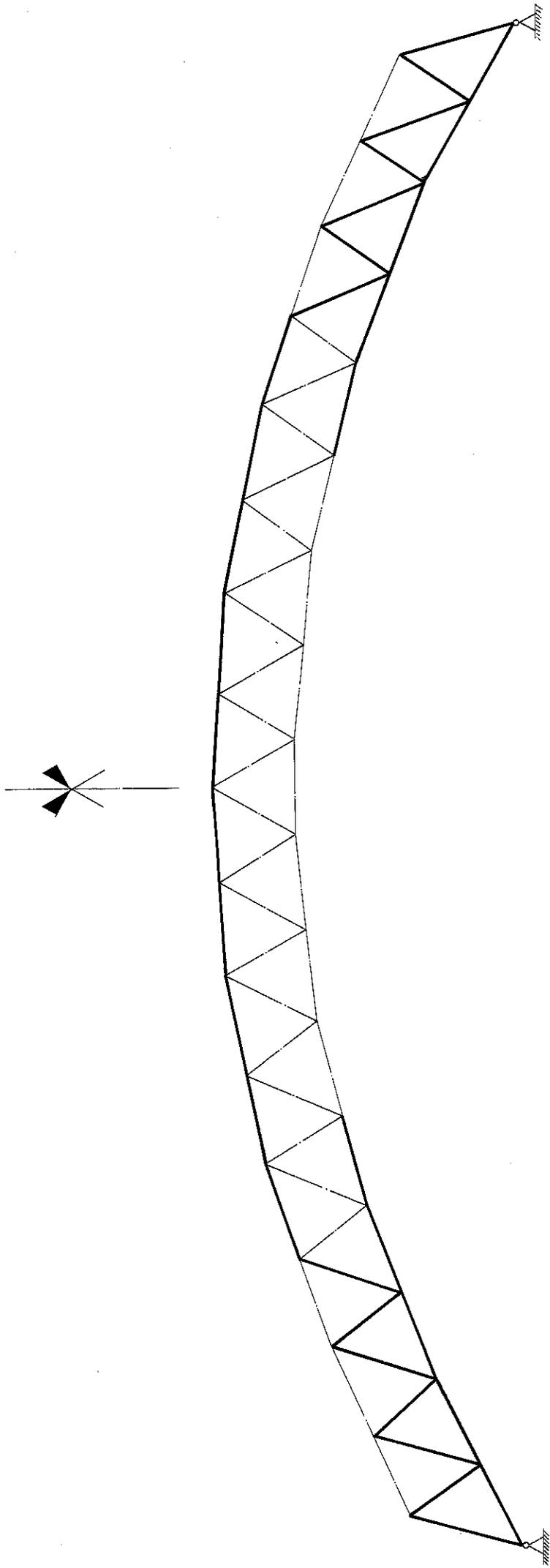


FIG.33 - POSIÇÃO DAS BARRAS DE MAIOR SOLICITAÇÃO DO ARCO

Estes resultados mostram, portanto, que os máximos esforços no banzo superior ocorrem nas barras: 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29 e 30, isto é, próximas ao centro do vão. No banzo inferior, nas barras: 1, 2, 3, 4, 5, 13, 14, 15, 16 e 17, nas diagonais: 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 61, 62, 63, 64, 65, 66 e 67, todas próximas aos apoios. Mostra-se na Fig. 33, em negrito, a disposição de tais barras na estrutura.

Com base nestes resultados, construiu-se os modelos reduzidos, em escala 1:3, obedecendo-se a seguinte sequência de montagem:

1º) Construção do arco nº 1. Neste arco, as peças foram dispostas de acordo com as solicitações nas barras e desta forma, nos pontos críticos utilizaram-se peças de maiores módulo de elasticidade, assim sucessivamente. Esta disposição das peças serviu para verificar o real coeficiente de segurança da estrutura, construída com peças de resistências conhecidas.

2º) Construção do arco nº 2. Neste arco, as peças foram dispostas aleatoriamente ao longo da estrutura. Isto significa que, em posições de maior solicitação, podiam ser empregadas peças com módulo de elasticidade alto e vice-versa.

3º) Montagem dos ensaios. Para que fosse possível um contraventamento mútuo entre os dois arcos, estes foram colocados a 1,20 metros de distância um do outro. O contraventamento foi simulado através de terças e de peças de madeira travando o banzo inferior.

4º) Realização dos ensaios nos modelos. O ensaio consistiu na aplicação de cargas representando o peso próprio acrescido do vento de pressão, em cada uma das estruturas em modelo reduzido. Para isto, foram colocados 16 pontos de carga aplicados pela distribuição de 4 macacos hidráulicos.

5º) Substituição dos apoios fixos por tirantes de aço. Utilizaram-se tirantes de aço de 3/4" em lugar da construção de pilares. Estudos anteriores, realizados no LaMEM, com provaram que a adoção desta alternativa como efeito nas barras de uma estrutura é desprezível, sendo que a estrutura atirantada teve esforços ligeiramente maiores. No presente trabalho, tal solução mostrou-se igualmente prática e satisfatória.

6º) Análise dos resultados obtidos. Os resultados obtidos experimentalmente, para os esforços nas barras da estrutura, foram comparados com os cálculos obtidos pelo computador - programa STRESS. Esta comparação foi realizada para os dois modelos.

79) Conclusões finais. Neste ítem, são considerados: comprovação dos esforços nas barras, face aos resultados obtidos experimentalmente; verificação do coeficiente de segurança global da estrutura construída com peças classificadas e dispostas segundo as solicitações exigidas.

#### VI.4.2 - CONSTRUÇÃO DOS MODELOS REDUZIDOS EM ESCALA 1:3

##### VI.4.2.1 - ENSAIOS PRELIMINARES

Para a construção dos modelos, as peças foram retiradas de 7 vigas de Peroba Rosa de seção transversal média de  $(6 \times 16 \text{ cm}^2)$ .

Da mesma forma que no modelo das tesouras, estas vigas foram desdobradas em diversas peças para uso nos modelos em arco. Uma vez prontas, as peças foram ensaiadas à flexão (Ensaio de Obra) e classificadas.

Para a construção do arco nº 1, as peças classificadas tiveram os seguintes resultados:

#### VIGA I

PEÇA (Nº)	E (Kg/cm <sup>2</sup> )	CLASSIFICAÇÃO (CATEGORIA)
1	142275	1. <sup>a</sup>
2	153010	1. <sup>a</sup>
3	160980	1. <sup>a</sup>
4	160980	1. <sup>a</sup>
5	124960	1. <sup>a</sup>
6	155940	1. <sup>a</sup>
7	158370	1. <sup>a</sup>
8	96730	2. <sup>a</sup>
9	133880	1. <sup>a</sup>
10	167510	1. <sup>a</sup>
11	116260	1. <sup>a</sup>
12	118080	1. <sup>a</sup>
13	155940	1. <sup>a</sup>
14	149760	1. <sup>a</sup>
15	167510	1. <sup>a</sup>
16	145730	1. <sup>a</sup>
17	149960	1. <sup>a</sup>
18	158370	1. <sup>a</sup>
19	123090	1. <sup>a</sup>

VIGA II

PEÇA (Nº)	E (Kg/cm <sup>2</sup> )	CLASSIFICAÇÃO (CATEGORIA)
1	89590	2. <sup>a</sup>
2	125435	1. <sup>a</sup>
3	123090	1. <sup>a</sup>
4	128325	1. <sup>a</sup>
5	122500	1. <sup>a</sup>
6	120370	1. <sup>a</sup>
7	75280	3. <sup>a</sup>
8	118070	1. <sup>a</sup>
9	129470	1. <sup>a</sup>
10	75550	3. <sup>a</sup>
11	111120	1. <sup>a</sup>
12	133880	1. <sup>a</sup>
13	115130	1. <sup>a</sup>
14	86050	2. <sup>a</sup>
15	148990	1. <sup>a</sup>
16	139950	1. <sup>a</sup>
17	125700	1. <sup>a</sup>
18	113820	1. <sup>a</sup>
19	119770	1. <sup>a</sup>
20	97790	1. <sup>a</sup>
21	153010	1. <sup>a</sup>
22	126790	1. <sup>a</sup>
23	148800	1. <sup>a</sup>
24	101320	2. <sup>a</sup>
25	126950	1. <sup>a</sup>
26	122500	1. <sup>a</sup>
27	108550	1. <sup>a</sup>
28	119580	1. <sup>a</sup>
29	82130	3. <sup>a</sup>
30	103830	2. <sup>a</sup>
31	104700	2. <sup>a</sup>
32	85980	2. <sup>a</sup>
33	91050	2. <sup>a</sup>

VIGA III

PEÇA (Nº)	E (Kg/cm <sup>2</sup> )	CLASSIFICAÇÃO (CATEGORIA)
1	76770	3. <sup>a</sup>
2	93230	2. <sup>a</sup>
3	98240	2. <sup>a</sup>
4	70820	3. <sup>a</sup>
5	65730	Refugo
6	92280	2. <sup>a</sup>
7	56750	Refugo
8	56250	Refugo
9	88700	2. <sup>a</sup>
10	114200	1. <sup>a</sup>
11	57460	Refugo
12	107480	1. <sup>a</sup>
13	66200	Refugo
14	82310	3. <sup>a</sup>
15	108760	1. <sup>a</sup>
16	80140	3. <sup>a</sup>
17	80850	3. <sup>a</sup>
18	62580	Refugo
19	95170	2. <sup>a</sup>
20	52810	Refugo
21	56750	Refugo

VIGA IV

PEÇA (Nº)	E (Kg/cm <sup>2</sup> )	CLASSIFICAÇÃO (CATEGORIA)
1	94150	2. <sup>a</sup>
2	92160	2. <sup>a</sup>
3	83840	3. <sup>a</sup>
4	91060	2. <sup>a</sup>
5	113890	1. <sup>a</sup>
6	100480	2. <sup>a</sup>
7	128320	1. <sup>a</sup>
8	151420	1. <sup>a</sup>
9	105130	2. <sup>a</sup>
10	128190	1. <sup>a</sup>
11	105460	1. <sup>a</sup>

Continua

Cont...

VIGA IV

PEÇA (Nº)	E (Kg/cm <sup>2</sup> )	CLASSIFICAÇÃO (CATEGORIA)
12	97040	2. <sup>a</sup>
13	125610	1. <sup>a</sup>
14	106840	1. <sup>a</sup>
15	109680	1. <sup>a</sup>
16	116620	1. <sup>a</sup>
17	105180	2. <sup>a</sup>
18	115700	1. <sup>a</sup>
19	110060	1. <sup>a</sup>
20	68300	3. <sup>a</sup>
21	81980	3. <sup>a</sup>
22	86380	2. <sup>a</sup>
23	114770	1. <sup>a</sup>
24	120720	1. <sup>a</sup>
25	96710	2. <sup>a</sup>
26	71240	3. <sup>a</sup>
27	92110	2. <sup>a</sup>
28	110060	1. <sup>a</sup>

VIGA V

PEÇA (Nº)	E (Kg/cm <sup>2</sup> )	CLASSIFICAÇÃO (CATEGORIA)
1	108330	1. <sup>a</sup>
2	123740	1. <sup>a</sup>
3	115640	1. <sup>a</sup>
4	109840	1. <sup>a</sup>
5	119030	1. <sup>a</sup>
6	120450	1. <sup>a</sup>
7	120670	1. <sup>a</sup>
8	123710	1. <sup>a</sup>
9	114680	1. <sup>a</sup>
10	122480	1. <sup>a</sup>

VIGA VI

PEÇA (Nº)	E (Kg/cm <sup>2</sup> )	CLASSIFICAÇÃO (CATEGORIA)
1	101350	2. <sup>a</sup>
2	118280	1. <sup>a</sup>
3	117530	1. <sup>a</sup>
4	106750	1. <sup>a</sup>
5	130280	1. <sup>a</sup>
6	126380	1. <sup>a</sup>
7	103010	2. <sup>a</sup>
8	107280	1. <sup>a</sup>
9	59820	Refugo
10	68220	3. <sup>a</sup>
11	109030	1. <sup>a</sup>
12	102070	2. <sup>a</sup>
13	72270	3. <sup>a</sup>
14	109050	1. <sup>a</sup>
15	102410	2. <sup>a</sup>

VIGA VII

PEÇA (Nº)	E (Kg/cm <sup>2</sup> )	CLASSIFICAÇÃO (CATEGORIA)
1	71520	3. <sup>a</sup>
2	70540	3. <sup>a</sup>
3	68000	3. <sup>a</sup>
4	98200	2. <sup>a</sup>
5	102200	2. <sup>a</sup>
6	120910	1. <sup>a</sup>
7	82220	3. <sup>a</sup>
8	129840	1. <sup>a</sup>
9	100670	2. <sup>a</sup>
10	110670	1. <sup>a</sup>
11	97830	2. <sup>a</sup>
12	110330	1. <sup>a</sup>
13	89290	2. <sup>a</sup>
14	98060	2. <sup>a</sup>
15	113370	1. <sup>a</sup>

O arco número 1 foi construído com as peças das sete vigas descritas. Propositalmente, as peças classificadas como 1.<sup>a</sup> categoria, foram colocadas nas posições de maior sollicitação do arco e assim sucessivamente até completar a estrutura.

Para a construção do arco número 2, ensaiou-se uma nova série de peças, que foram obtidas de outras vigas de seção transversal ( $6 \times 16 \text{ cm}^2$ ). O objetivo da classificação destas peças foi de possibilitar a determinação dos esforços reais, atuantes nas barras do arco, por ocasião do ensaio do modelo, para o posterior confronto com o cálculo teórico destes esforços. Para a construção deste arco, as barras classificadas apresentaram os seguintes resultados:

PEÇA (Nº)	E (Kg/cm <sup>2</sup> )	CLASSIFICAÇÃO (Categoria)
1	89210	2. <sup>a</sup>
2	118920	1. <sup>a</sup>
3	117260	1. <sup>a</sup>
4	88520	2. <sup>a</sup>
5	102030	2. <sup>a</sup>
6	124760	1. <sup>a</sup>
7	130550	1. <sup>a</sup>
8	101360	2. <sup>a</sup>
9	114630	1. <sup>a</sup>
10	117100	1. <sup>a</sup>
11	123020	1. <sup>a</sup>
12	107500	1. <sup>a</sup>
13	85590	2. <sup>a</sup>
14	118840	1. <sup>a</sup>
15	82370	3. <sup>a</sup>
16	114800	1. <sup>a</sup>
17	117750	1. <sup>a</sup>
18	71700	3. <sup>a</sup>
19	123420	1. <sup>a</sup>
20	119100	1. <sup>a</sup>
21	101220	2. <sup>a</sup>
22	112380	1. <sup>a</sup>
23	88040	2. <sup>a</sup>
24	110870	1. <sup>a</sup>
25	85690	2. <sup>a</sup>

Cont...

PEÇA (Nº)	E (Kg/cm <sup>2</sup> )	CLASSIFICAÇÃO (Categoria)
26	110860	1. <sup>a</sup>
27	77040	3. <sup>a</sup>
28	95600	2. <sup>a</sup>
29	95370	2. <sup>a</sup>
30	112250	1. <sup>a</sup>
31	103490	2. <sup>a</sup>
32	94980	2. <sup>a</sup>
33	86040	2. <sup>a</sup>
34	80350	3. <sup>a</sup>
35	86080	2. <sup>a</sup>
36	76910	3. <sup>a</sup>
37	106690	1. <sup>a</sup>
38	64970	Refugo
39	74800	3. <sup>a</sup>
40	94110	2. <sup>a</sup>
41	112110	1. <sup>a</sup>
42	113250	1. <sup>a</sup>
43	108300	1. <sup>a</sup>
44	131510	1. <sup>a</sup>
45	77330	3. <sup>a</sup>
46	116840	1. <sup>a</sup>
47	102360	2. <sup>a</sup>
48	111610	1. <sup>a</sup>
49	78850	2. <sup>a</sup>
50	95290	2. <sup>a</sup>
51	98960	2. <sup>a</sup>
52	82470	3. <sup>a</sup>
53	88040	2. <sup>a</sup>
54	94400	2. <sup>a</sup>
55	78040	3. <sup>a</sup>
56	120190	1. <sup>a</sup>
57	101360	2. <sup>a</sup>
58	85150	2. <sup>a</sup>
59	100020	2. <sup>a</sup>
60	102770	2. <sup>a</sup>
61	108220	1. <sup>a</sup>
62	100980	2. <sup>a</sup>
63	118440	1. <sup>a</sup>

Cont...

PEÇA (Nº)	E (Kg/cm <sup>2</sup> )	CLASSIFICAÇÃO (Categoria)
64	96040	2. <sup>a</sup>
65	105010	2. <sup>a</sup>
66	80530	3. <sup>a</sup>
67	95100	2. <sup>a</sup>
68	91620	2. <sup>a</sup>
69	79880	3. <sup>a</sup>
70	88520	2. <sup>a</sup>

A disposição das peças no arco número 2, como já se disse, foi aleatória, e desta forma, podem ter sido empregadas peças de módulos de elasticidade elevados, em posições de maior solicitação ou vice-versa.

#### VI.4.2.2 - CONSTRUÇÃO DOS MODELOS E MONTAGEM DOS APARELHOS DE ENSAIO

As coordenadas de todos os nós da estrutura foram estabelecidas através de um gabarito marcado no chão, que fornecia tais coordenadas, facilitando, desse modo, a montagem das peças da estrutura.

Por facilidade de construção, as emendas entre as barras foram feitas sobre os nós, através de pequenos chanfros executados nas barras dos banzos, com a finalidade de permitir que as barras adjacentes ficassem perfeitamente faceadas e, com isto, garantir o perfeito funcionamento das ligações. O mesmo ocorreu com as barras diagonais, que, devido a presença das terças apoiadas diretamente sobre os nós, necessitaram ser cortadas de forma a não ocorrer saliências em relação aos banzos.

Os parafusos, necessários às diversas ligações, foram fabricados na oficina do LaMEM e na oficina mecânica da EESC. Para a confecção dos parafusos, utilizou-se aço de construção do tipo CA-50A liso. As barras de aço, após terem sido cortadas nas dimensões necessárias, receberam roscas nas duas extremidades, e tornaram-se, desta forma, parafusos passantes, com porca e arruela em cada extremidade.

Construídos os dois modelos, os mesmos foram instalados em suas posições de ensaio e contraventados mutuamente a través de barras transversais, representadas pelas terças e por outras barras que travaram o banzo inferior.

O espaçamento, entre estruturas, correspondente à escala 1:3, seria de 2,00 metros. Todavia tal dimensão não foi possível de ser obtida, em virtude da largura da viga de reação existente no LaMEM. Conseguiu-se um espaçamento de 1,20 metros, que não levou a qualquer distorção, uma vez que o carregamento seria aplicado diretamente na estrutura, e não através das terças como na realidade.

Neste ponto, os modelos já se encontravam posicionados e prontos para receberem o carregamento, cuja aplicação consistiu na instalação de quatro macacos hidráulicos (de capacidade nominal de 5 toneladas cada um) na viga de reação existente. Fixados os macacos, passou-se à montagem do sistema de distribuição. Cada macaco foi responsável pelo carregamento de quatro nós adjacentes, perfazendo um total de 16 nós carregados. O nó da cumeeira não foi carregado, em virtude da simetria da estrutura levar a um número ímpar de nós (17), que não poderiam ser carregados simultaneamente, com o sistema de distribuição adotado.

Para que cada macaco carregasse igualmente quatro nós, utilizaram-se vigas de aço, com perfil I de 4", de diversos comprimentos, (um para cada grupo de distribuição).

Na simulação dos apoios fixos, utilizaram-se dois tirantes de aço de 3/4", que foram dotados de um anel dinamométrico com capacidade de 5 toneladas, para medir o esforço horizontal atuante.

Desta forma, completou-se a montagem dos aparelhos de ensaio, como é mostrado na figura 34. Restavam a instalação dos aparelhos medidores de deformação das barras e a realização do ensaio.

#### VI.4.3 - ENSAIO DO ARCO NÚMERO 1

##### VI.4.3.1. - INSTALAÇÃO DOS APARELHOS MEDIDORES DE DEFORMAÇÃO

Posicionado o arco número 1, passou-se à instalação dos aparelhos medidores de deformações em diversas barras da estrutura. Com a utilização de 20 relógios mecânicos, (sendo 13 com precisão de centésimo de milímetro e 7 com precisão de milésimo de milímetro), e de 10 transdutores indutivos, foram instalados 30 pontos de leituras, sendo que três deles foram destinados às me-

ANEL DINAMOMÉTRICO

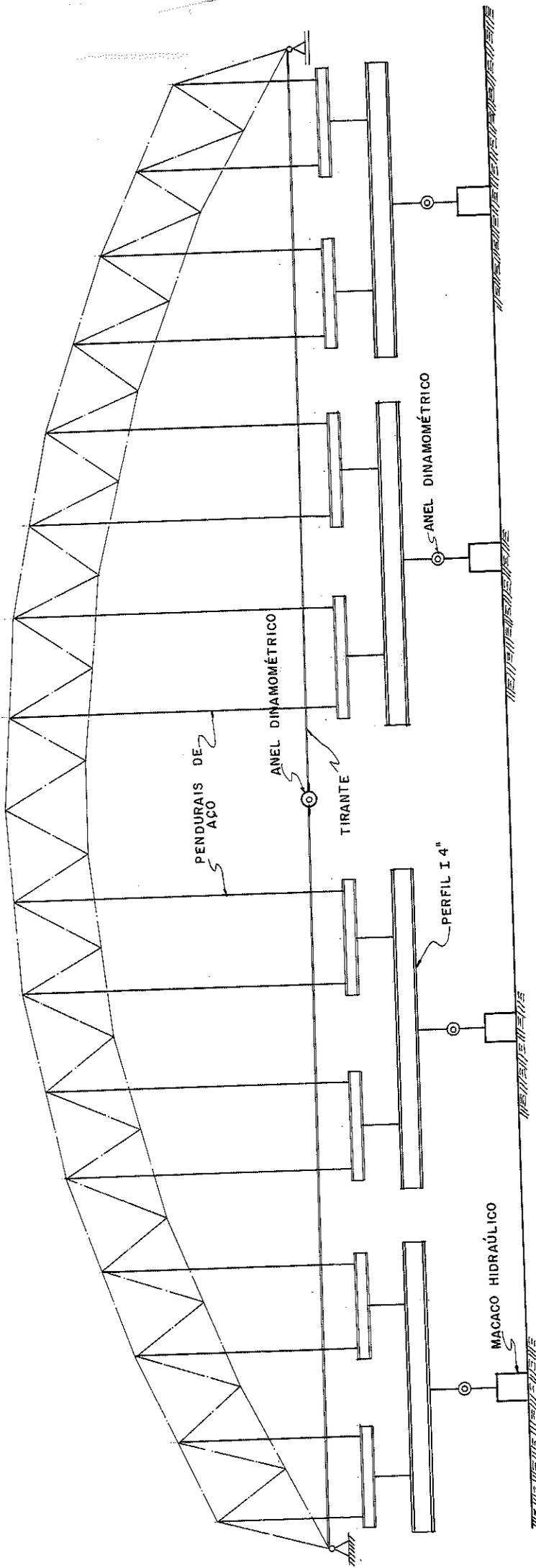
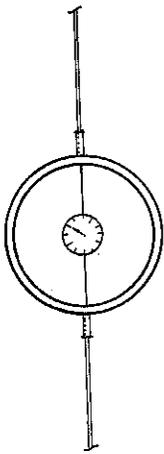


FIG.34 - ESQUEMA DE CARREGAMENTO UTILIZADO NOS ENSAIOS DO ARCO TRELIGADO

dições das flechas da estrutura.

As leituras dos relógios mecânicos foram feitas diretamente, enquanto que a dos transdutores indutivos foram efetuadas com o auxílio de um voltímetro digital. Nestes, o processo consistiu em transformar a leitura em volts, dada pelo voltímetro, para valores lineares correspondentes ao deslocamento da haste do transdutor em relação ao seu corpo. A constante de transformação foi de 1 volt por milímetro ou 1 milivolt para cada milésimo de milímetro.

Os relógios mecânicos de centésimo de milímetro, foram instalados nas barras: 3,11,15,20,23,32,33,43 e 49; os de milésimo de milímetro nas barras: 19,39,53,54,55,67 e nos tirantes para a determinação dos esforços horizontais. Os transdutores indutivos foram instalados nas barras: 1,8,9,16,17,18, 25,34,36 e 50.

Em cada ensaio, as deformações obtidas ( $\Delta l$ ) eram transformadas em deformações específicas ( $\epsilon$ ), bastando para isso dividir a deformação lida ( $\Delta l$ ) pelo respectivo comprimento de cada aparelho de medida ( $l$ ). Assim:  $\epsilon = \Delta l / l$ .

A tensão atuante ( $\sigma$ ), em uma determinada barra, sob um determinado carregamento, é igual ao produto do módulo de elasticidade pela deformação específica ( $\epsilon$ ). Como todas as peças componentes dos modelos foram preliminarmente ensaiadas, e portanto, determinados os módulos de elasticidade, foi possível determinar a tensão atuante em cada barra e compará-la com o resultado obtido no cálculo teórico, visando, com isso, comprovar a validade do ensaio.

#### VI.4.3.2 - DISTRIBUIÇÃO DAS PEÇAS PARA O ARCO Nº 1

A seguir, apresenta-se a distribuição das peças nas barras do arco nº 1, com os valores correspondentes dos módulos de elasticidade encontrados para cada peça:

BARRAS DOS BANZOS	E (Kg/cm <sup>2</sup> )	BARRAS DIAGONAIS	E (Kg/cm <sup>2</sup> )
1	167510	34	142275
2	167510	35	88925
3	155940	36	83895
4	155940	37	128325
5	123090	38	114880
6	123090	39	125435

Cont...

BARRAS DOS BANZOS	E (Kg/cm <sup>2</sup> )	BARRAS DIAGONAIS	E (Kg/cm <sup>2</sup> )
7	107400	40	104825
8	107400	41	108055
9	145730	42	113905
10	113050	43	107650
11	113050	44	91855
12	124960	45	89945
13	124960	46	80820
14	149760	47	95695
15	149760	48	91315
16	160980	49	81095
17	106980	50	88640
18	115520	51	68255
19	115520	52	90025
20	153010	53	127410
21	153010	54	104035
22	99810	55	109715
23	99810	56	107035
24	122500	57	99285
25	122500	58	94040
26	133880	59	132720
27	133880	60	113240
28	98545	61	103470
29	98545	62	118630
30	158370	63	103865
31	158370	64	130280
32	111980	65	130900
33	111980	66	123960
		67	132425

A estrutura, assim composta, foi ensaiada quatro vezes com um carregamento equivalente ao peso próprio acrescido da carga acidental - "vento que carrega".

Um quinto carregamento foi aplicado em toda a estrutura até que se verificasse a ruptura total desta. Como no caso das tesouras, não houve "ruptura" no arco, na real acepção da palavra. Com a aplicação de uma carga correspondente a 8,1 vezes a carga de serviço, os banzos flambaram e não permitiram

incrementos de carga através dos macacos. Neste ponto, constatou-se que não havia nenhuma barra ou ligação com sinais visíveis de ruptura, pois todas as ligações e emendas ainda se comportavam satisfatoriamente.

Em virtude de não ser possível prosseguir com o carregamento, admitiu-se como a carga máxima capaz de ser suportada pela estrutura àquela correspondente a 8,1 vezes a carga de serviço (equivalente a um coeficiente de segurança global de 6,9).

A seguir são mostradas tabelas que apresentam os resultados experimentais, cujas colunas são as seguintes:

- 1.<sup>a</sup> coluna - numeração das barras;
- 2.<sup>a</sup> coluna - tipo de medida de deformação empregado:
  - mil = relógio de milésimo de milímetro.
  - cent = relógio de centésimo de milímetro.
  - indut. = transdutor indutivo.
- 3.<sup>a</sup> coluna - variação das leituras das deformações;
- 4.<sup>a</sup> coluna - dimensão sobre a qual ocorreu tal variação;
- 5.<sup>a</sup> coluna - deformação específica;
- 6.<sup>a</sup> coluna - módulo de elasticidade da barra;
- 7.<sup>a</sup> coluna - tensão atuante;
- 8.<sup>a</sup> coluna - área da seção transversal;
- 9.<sup>a</sup> coluna - esforço atuante.

Para os quatros ensaios, o valor médio da flecha central obtido foi de 0,57cm, enquanto que a flecha admissível para o caso é 2,57cm.

## RESULTADOS DO 1º ENSAIO - ARCO Nº 1

## CARGAS EM TODOS OS NÓS DO MODELO

BARRA	RELÓGIO OU INDUTIVO	$\Delta l$ MÉDIO	$l$ (cm)	$\epsilon$	E (Kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	S (cm <sup>2</sup> )	P (Kg)
19	mil. 13	11,0	10,0	0,00011	115520	12,71	16	-203
20	cent. 16	1,0	10,0	0,0001	153010	15,30	16	-245
3	cent. 15	1,5	10,0	0,00015	155940	23,39	16	-375
23	cent. 11	1,5	10,0	0,00015	99810	14,97	16	-239
39	mil. 14	6,0	10,0	0,00006	125435	7,53	12	+ 90
43	cent. 12	0,0	10,0	0	107650	0	12	0
49	cent. 10	0,0	10,0	0	81095	0	12	0
53	mil. 8	5,0	10,0	0,00005	127410	6,40	12	-76
54	mil. 7	7,0	10,0	0,00007	104035	7,28	12	+87
11	cent. 9	1,5	10,0	0,00015	113050	16,96	16	-271
55	mil. 6	8,0	10,0	0,00008	109715	8,76	12	-105
59	cent. 5	0,0	10,0	0	132720	0	12	0
15	cent. 4	1,5	10,0	0,00015	149760	22,46	16	-359
32	cent. 3	1,0	10,0	0,0001	111980	11,20	16	-180
33	cent. 2	1,0	10,0	0,0001	111980	11,20	16	-180
67	mil. 1	11,0	10,0	0,00011	132425	14,57	12	-175
tirante	mil. 17	251	10,0	-	-	-	-	+785
17	indut. 1	193,40	10,0	0,000193	160980	31,13	16	-498
16	indut. 6	197,23	10,0	0,000197	160980	31,75	16	-508
25	indut. 2	179,25	10,0	0,000179	122500	21,96	16	-351
9	indut. 3	110,73	10,0	0,000111	145730	16,14	16	-258
50	indut. 5	13,68	10,0	0,000014	88640	1,21	12	-15
8	indut. 4	115,38	10,0	0,000115	107400	12,39	16	-198
36	indut. 7	104,63	10,0	0,000105	83895	8,78	12	-105
18	indut. 8	93,10	10,0	0,000093	115520	10,75	16	-172
1	indut. 10	208,82	10,0	0,000209	167510	34,98	16	-560
34	indtu. 9	143,46	10,0	0,000144	142275	20,41	12	-245

## RESULTADOS DO 2º ENSAIO - ARCO Nº 1

## CARGAS EM TODOS OS NÓS DO MODELO

BARRA	RELÓGIO OU INDUTIVO	$\Delta l$ MÉDIO	$l$ (cm)	$\epsilon$	E (Kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	S (cm <sup>2</sup> )	P (Kg)
19	mil. 13	10,0	10,0	0,0001	115520	11,55	16	-185
20	cent. 16	1,0	10,0	0,0001	153010	15,30	16	-245
3	cent. 15	2,0	10,0	0,0002	155940	31,19	16	-499
23	cent. 11	2,0	10,0	0,0002	99810	19,96	16	-319
39	mil. 14	7,0	10,0	0,00007	125435	8,78	12	+105
43	cent. 12	0,0	10,0	0	107650	0	12	0
49	cent. 10	0,0	10,0	0	81095	0	12	0
53	mil. 8	4,0	10,0	0,00004	127410	5,10	12	-61
54	mil. 7	5,0	10,0	0,00005	104035	5,20	12	+63
11	cent. 9	1,0	10,0	0,00001	113050	11,30	16	-180
55	mil. 6	7,0	10,0	0,00007	109715	7,68	12	-92
59	cent. 5	0,0	10,0	0	132720	0	12	0
15	cent. 4	2,0	10,0	0,0002	149760	30,00	16	-480
32	cent. 3	1,0	10,0	0,0001	111980	11,20	16	-179
33	cent. 2	0,5	10,0	0,00005	111980	5,60	16	-90
67	mil. 1	12,0	10,0	0,00012	132425	15,89	12	-191
tirante	mil. 17	-	-	-	-	-	-	+804
17	indut. 1	203,10	10,0	0,000203	160980	32,67	16	-523
16	indut. 6	195,77	10,0	0,000196	160980	31,51	16	-504
25	indut. 2	194,36	10,0	0,000194	122500	23,81	16	-381
9	indut. 3	98,61	10,0	0,000099	145730	14,37	16	-230
50	indut. 5	12,25	10,0	0,000012	88640	1,09	12	-13
8	indut. 4	113,48	10,0	0,000114	107400	12,19	16	-195
36	indut. 7	138,71	10,0	0,000139	83895	11,64	12	-140
18	indut. 8	60,58	10,0	0,000061	115520	7,00	16	-112
1	indut. 10	218,9	10,0	0,000219	167510	36,67	16	-587
34	indut. 9	115,91	10,0	0,000116	142275	16,49	12	-198

RESULTADOS DO 3º ENSAIO - ARCO Nº 1

CARGAS EM TODOS OS NÓS DO MODELO

BARRA	RELÓGIO OU INDUTIVO	$\Delta l$ MÉDIO	$l$ (cm)	$\epsilon$	E (Kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	S (cm <sup>2</sup> )	P (Kg)
19	mil. 13	11,0	10,0	0,00011	115520	12,71	16	-203
20	cent. 16	1,0	10,0	0,0001	153010	15,30	16	-245
3	cent. 15	2,0	10,0	0,0002	155940	31,19	16	-499
23	cent. 11	1,5	10,0	0,00015	99810	14,97	16	-239
39	mil. 14	7,0	10,0	0,00007	125435	8,78	12	+105
43	cent. 12	0,0	10,0	0	107650	0	12	0
49	cent. 10	0,0	10,0	0	81095	0	12	0
53	mil. 8	6,0	10,0	0,00006	127410	7,65	12	-92
54	mil. 7	6,0	11,0	0,0006	104035	6,24	12	+751
11	cent. 9	1,5	10,0	0,00015	113050	16,96	16	-271
55	mil. 6	6,0	10,0	0,00006	109715	6,58	12	-79
59	cent. 5	0,0	10,0	0	132720	0	12	0
15	cent. 4	2,0	10,0	0,0002	149760	30,00	16	-480
32	cent. 3	1,5	10,0	0,00015	111980	16,80	16	-269
33	cent. 2	1,0	10,0	0,0001	111980	11,20	16	-180
57	mil. 1	10,0	10,0	0,0001	132425	13,24	12	-159
tirante	mil. 17	-	10,0	-	-	-	-	+814
17	indut. 1	240,41	10,0	0,000240	160980	38,70	16	-619
16	indut. 6	196,33	10,0	0,000196	160980	31,41	16	-502
25	indut. 2	216,88	10,0	0,000217	122500	26,57	16	-425
9	indut. 3	99,33	10,0	0,000099	145730	14,48	16	-232
50	indut. 5	14,39	10,0	0,000014	88640	1,28	12	-15
8	indut. 4	117,41	10,0	0,000117	107400	12,61	16	-202
36	indut. 7	138,23	10,0	0,000138	83895	11,60	12	-139
18	indut. 8	73,99	10,0	0,000074	115520	8,55	16	-137
1	indut. 10	230,34	10,0	0,000230	167510	38,58	16	-617
34	indut. 9	118,47	10,0	0,000119	142275	16,86	12	-202

RESULTADOS DO 4º ENSAIO - ARCO Nº 1

CARGAS EM TODOS OS NÓS DO MODELO

BARRA	RELÓGIO OU INDUTIVO	$\Delta l$ MÉDIO	$l$ (cm)	$\epsilon$	E (Kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	S (cm <sup>2</sup> )	P (Kg)
19	mil. 13	12,0	10,0	0,00012	115520	13,86	16	-222
20	cent. 16	1,5	10,0	0,00015	153010	22,95	16	-367
3	cent. 15	1,5	10,0	0,00015	155940	23,39	16	-374
23	cent. 11	2,5	10,0	0,00025	99810	24,95	16	-399
39	mil. 14	7,0	10,0	0,00007	125435	8,78	12	+105
43	cent. 12	0,0	10,0	0	107650	0	12	0
49	cent. 10	0,0	10,0	0	81095	0	12	0
33	mil. 8	5,0	10,0	0,00005	127410	6,40	12	-76
54	mil. 7	7,0	10,0	0,00007	104035	7,28	12	+87
14	cent. 9	1,5	10,0	0,00015	113050	16,96	16	-271
55	mil. 6	7,0	10,0	0,00007	109715	7,68	12	-92
59	cent. 5	0,0	10,0	0	132720	0	12	0
15	cent. 4	2,0	10,0	0,0002	149760	30,00	16	-480
32	cent. 3	1,0	10,0	0,0001	111980	11,20	16	-179
33	cent. 2	1,0	10,0	0,0001	111980	11,20	16	-179
67	mil. 1	13,0	10,0	0,00013	132425	17,21	12	-207
tirante	mil. 17	-	10,0	-	-	-	-	+786
17	indut. 1	230,31	10,0	0,000230	160980	37,03	16	-592
18	indut. 6	198,04	10,0	0,000198	160980	31,88	16	-510
25	indut. 2	196,33	10,0	0,000196	122500	24,05	16	-385
9	indut. 3	96,59	10,0	0,000097	145730	14,08	16	-225
50	indut. 5	13,41	10,0	0,000013	88640	1,19	12	-14
8	indut. 4	116,97	10,0	0,000117	107400	12,56	16	-201
36	indut. 7	140,74	10,0	0,000141	83895	11,81	12	-142
18	indut. 8	79,50	10,0	0,000080	115520	9,18	16	-147
1	indut. 10	232,95	10,0	0,000233	167510	39,02	16	-624
34	indut. 9	117,09	10,0	0,000117	142275	16,66	12	-200

A tabela abaixo compara os esforços teóricos (atuantes na barra do arco nº 1) com os resultados experimentais. O cálculo teórico foi feito através do computador, pelo programa STRESS, usando-se um módulo de elasticidade constante de  $94.100 \text{ kg/cm}^2$  para todas as barras da estrutura.

COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

1 - STRESS (um módulo de elasticidade para cada barra)

2 - Experimental (média de 4 ensaios)

BARRAS DOS BANZOS	1 (Kg)	2 (Kg)	BARRAS DIAGONAIS	1 (Kg)	2 (Kg)
01	-606	-597	34	-201	-211
02	-474	-	35	+112	-
03	-470	-437	36	-155	-132
04	-297	-	37	+32	-
05	-246	-	38	+15	-
06	-209	-	39	+191	+101
07	-194	-	40	-261	-
08	-190	-199	41	+41	-
09	-222	-237	42	-71	-
10	-190	-	43	+39	0
11	-194	-248	44	+41	-
12	-209	-	45	-6	-
13	-246	-	46	-27	-
14	-297	-	47	-1	-
15	-470	-450	48	-7	-
16	-474	-506	49	-42	0
17	-606	-558	50	-22	-14
18	-125	-142	51	+22	-
19	-218	-203	52	-42	-
20	-220	-276	53	-7	-76
21	-336	-	54	+1	+78
22	-374	-	55	-27	-92
23	-384	-299	56	-6	-
24	-392	-	57	+41	-
25	-372	-386	58	+39	-

Cont...

BARRAS DOS BANZOS	1 (Kg)	2 (Kg)	BARRAS DIAGONAIS	1 (Kg)	2 (Kg)
26	-372	-	59	-71	0
27	-392	-	60	+14	-
28	-384	-	61	-261	-
29	-374	-	62	+191	-
30	-336	-	63	+15	-
31	-220	-	64	+32	-
32	-218	-202	65	-155	-
33	-125	-158	66	+112	-
			67	-201	-183

Na comparação dos esforços, obtidos pelo computador e experimentalmente, observa-se que há semelhança visível entre eles. Evidentemente, os fatores como: imprecisão inicial dos equipamentos de leitura, acomodação da estrutura, variação do módulo de elasticidade, precisão pequena dos relógios de centésimo de milímetro em comparação com os relógios de milésimo de milímetro e, principalmente, em comparação com os transdutores indutivos, levaram a algumas diferenças. Entretanto, verifica-se que nas barras diagonais, responsáveis pelos menores esforços, a diferença aumenta, enquanto que nos banzos, peças principais, e, por isso com esforços elevados, a diferença é mínima.

Realizando-se a análise de regressão linear, para esses esforços, encontraram-se as seguintes equações:

— para os banzos:

$$E_{\text{exp}} = 0,75 E_{\text{teor}} + 60,24$$

com um coeficiente de correlação (r), igual a:

$$r = 0,976$$

— para as diagonais:

$$E_{\text{exp}} = 0,77 E_{\text{teor}} - 13,61$$

sendo, neste caso, o coeficiente de correlação igual a:

$$r = 0,886$$

O teste da Hipótese Nula, para os dois coeficientes encontrados, indicou rejeição a essa hipótese, ou seja, confirmou a correlação linear entre os esforços experimentais com os teóricos, como se mostra abaixo:

$$t_{\text{banzo}} = 16,16 > t_{0,99} = 2,65$$

$$t_{\text{diag.}} = 5,73 > t_{0,99} = 2,82$$

#### VI.4.4. - ENSAIO DO ARCO NÚMERO 2

##### VI.4.4.1 - INSTALAÇÃO DE APARELHOS MEDIDORES DE DEFORMAÇÃO

Da mesma forma que no arco nº 1, foram instaladas aparelhos medidores de deformações em diversas barras do arco nº 2. Neste caso, foram instalados 13 relógios mecânicos com precisão de centésimo de milímetro, 7 relógios com precisão de milésimo de milímetro e 8 transdutores indutivos, perfazendo 28 pontos de leitura, sendo 3 deles destinados às medições das flechas da estrutura.

As leituras dos relógios mecânicos e dos transdutores indutivos foram feitas da mesma maneira como relatado em VI-4.3.1.

Os relógios de centésimo foram instalados nas barras: 3, 11, 15, 19, 23, 32 e três para a leitura das flechas; os relógios de milésimo nas barras: 39, 53, 54, 55, 67 e nos tirantes. Os transdutores indutivos foram instalados nas barras: 1, 17, 25 e 26.

O cálculo dos esforços foi feito de modo análogo ao descrito para o arco número 1.

##### VI.4.4.2 - DISTRIBUIÇÃO DAS PEÇAS PARA O ARCO Nº 2

Apresenta-se, a seguir, a distribuição das peças no arco nº 2, com os correspondentes valores dos módulos de elasticidade encontrados para cada peça:

BARRAS DOS BANZOS	E médio (Kg/cm <sup>2</sup> )	BARRAS DIAGONAIS	E médio (Kg/cm <sup>2</sup> )
01	89590	34	100980
02	89590	35	86040
03	102360	36	64970
04	102360	32	95600
05	107010	38	106690
06	107010	39	100020
07	85330	40	88040
08	85330	41	85150
09	91550	42	103490
10	79880	43	102770
11	79880	44	79180
12	90760	45	88040
13	90760	46	94980
14	94110	47	78040
15	94110	48	101230
16	102030	49	112380
17	102030	50	101220
18	108220	51	110870
19	108220	52	94400
20	114280	53	112250
21	114280	54	95370
22	95290	55	101360
23	95290	56	86080
24	108300	57	85690
25	108300	58	120190
26	82470	59	80530
27	82470	60	95100
28	94180	61	76910
29	94180	62	110360
30	102950	63	91620
31	102950	64	96040
32	82370	65	118840
33	82370	66	107920
		67	105010

A estrutura assim composta foi ensaiada quatro vezes com um carregamento equivalente ao peso próprio acrescido da carga acidental - "vento que carrega".

Um quinto carregamento foi aplicado, em toda estrutura, até que se verificasse a ocorrência de ruptura total ou parcial do arco. Esta aconteceu na cobrejunta da ligação do nó 5, com uma carga correspondente a 4,2 vezes a carga de serviço.

Substituída a cobrejunta rompida, novamente a estrutura foi ensaiada com o carregamento total, e novamente a ruptura ocorreu em outra cobrejunta, na emenda do nó 31, simétrico ao nó 5.

Realmente esta ligação era a mais solicitada, e a ruptura apenas confirmou tal fato, com uma carga correspondente a 4,3 vezes a carga máxima de serviço.

Portanto, a ruptura da emenda foi a consequência mais natural e, graças a esta ocorrência, conclusões puderam ser obtidas, conforme será mostrado adiante.

O cálculo teórico dos esforços que atuaram nas barras do arco número 2 foi feito da mesma forma que no arco número 1, para que houvesse possibilidade de comparação com os resultados experimentais obtidos.

Nas tabelas apresentadas a seguir, encontram-se dados já mencionados. Nestas tabelas, algumas barras tiveram dois relógios comparadores situados em faces simétricas da respectiva barra. Portanto, os resultados apresentados equivalem à média aritmética dos valores lidos em cada relógio.

RESULTADOS DO 1º ENSAIO - ARCO Nº 2  
CARGAS EM TODOS OS NÓS DO MODELO

BARRA	RELÓGIO OU INDUTIVO	$\Delta l$ MÉDIO	$l$ (cm)	$\epsilon$	$E$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	$S_2$ (cm <sup>2</sup> )	P (Kg)
19	cent. 13	1,25	10,0	0,000125	108220	13,53	16	-216
3	cent. 16	2,75	10,0	0,000275	102350	28,15	16	-451
39	mil. 14	20,00	10,0	0,00020	100020	20,00	12	240
23	cent. 11	2,0	10,0	0,00020	95290	19,06	16	-305
11	cent. 10	1,75	10,0	0,000175	79880	13,93	16	-222
53	mil. 8	8,0	10,0	0,00008	95370	7,63	12	-91
54	mil. 7	9,0	10,0	0,00009	112250	10,10	12	-121
55	mil. 6	11,5	10,0	0,000115	101360	11,65	12	-142
15	cent. 5	3,0	10,0	0,0003	94110	28,23	16	-452
32	cent. 3	1,5	10,0	0,00015	82370	12,36	16	-198
67	mil. 1	11,0	10,0	0,00011	105010	11,55	12	-129
tirante	mil. 17	-	-	0,00007	2100.000	145,1	3,96	-
17	indut. 2	37,26	10,0	0,0003726	102030	38,02	16	-608
26	indut. 4	32,22	10,00	0,0003222	82470	26,57	16	-425
25	indut. 6	24,765	10,00	0,00024765	108300	26,82	16	-430
1	indut. 8	42,65	10,00	0,0004265	82590	38,22	16	-611

RESULTADOS DO 2º ENSAIO - ARCO Nº 2  
CARGAS EM TODOS OS NÓS DO MODELO

BARRA	RELÓGIO OU INDUTIVO	$\Delta l$ MÉDIO	$l$ (cm)	$\epsilon$	$E$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	$S_2$ (cm <sup>2</sup> )	P (Kg)
19	cent. 13	1,25	10,0	0,000125	108220	13,53	16	-216
3	cent. 16	3,0	10,0	0,0003	102360	30,71	16	-491
39	mil. 14	24,0	10,0	0,00024	100020	24,00	12	288
23	cent. 11	21,0	10,0	0,00021	95290	20,01	16	-320
11	cent. 10	1,5	10,0	0,00015	79880	11,98	16	-192
53	mil. 8	9,0	10,0	0,00009	95370	8,58	12	-103
54	mil. 7	8,0	10,0	0,00008	112250	8,98	12	-108
55	mil. 6	11,0	10,0	0,00011	101360	11,15	12	-133
15	cent. 5	3,5	10,0	0,00035	94110	32,94	16	-527
32	cent. 3	1,25	10,0	0,000125	82370	9,27	16	-148
67	cent. 1	13,0	10,0	0,00013	105010	13,65	12	-163
17	indut. 2	34,05	10,0	0,0003405	102030	34,74	16	-556
26	indut. 4	29,33	10,0	0,0002933	82470	24,19	16	-387
25	indut. 6	24,085	10,0	0,00024085	108300	26,08	16	-417
1	indut. 8	43,93	10,0	0,0004393	85590	37,60	16	-602

RESULTADOS DO 3º ENSAIO - ARCO Nº 2  
CARGAS EM TODOS OS NÓS DO MODELO

BARRA	RELÓGIO OU INDUTIVO	$\Delta l$ MÉDIO	$l$ (cm)	$\epsilon$	$E$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	$S$ (cm <sup>2</sup> )	P (Kg)
19	cent. 13	1,25	10,0	0,000125	108220	13,53	16	-216
3	cent. 16	3,0	10,0	0,00003	102360	30,71	16	-491
39	mil. 14	22,0	10,0	0,00022	100020	22,00	12	264
23	cent. 11	23,0	10,0	0,00023	95290	21,91	16	-350
11	cent. 10	2,0	10,0	0,0002	79880	15,97	16	-255
53	mil. 8	10,0	10,0	0,0001	95370	9,54	12	-114
54	mil. 7	8,0	10,0	0,00008	112250	8,98	12	-108
55	mil. 6	12,5	10,0	0,000125	101360	12,67	12	-151
15	cent. 5	3,25	10,0	0,000325	94110	30,54	16	-489
32	cent. 3	1,5	10,0	0,00015	82370	12,36	16	-198
67	mil. 1	12,0	10,0	0,00012	105010	12,60	12	-150
17	indut. 2	37,18	10,0	0,0003718	102030	37,95	16	-607
26	indut. 4	39,915	10,0	0,00039915	82470	27,15	16	-434
25	indut. 6	24,9	10,0	0,000249	108300	26,97	16	-432
1	indut. 8	45,335	10,0	0,00045335	85590	38,80	16	-621

RESULTADOS DO 4º ENSAIO - ARCO Nº 2  
CARGAS EM TODOS OS NÓS DO MODELO

BARRA	RELÓGIO OU INDUTIVO	$\Delta l$ MÉDIO	$l$ (cm)	$\epsilon$	$E$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	$S$ (cm <sup>2</sup> )	P (Kg)
19	cent. 12	1,0	10,0	0,0001	108220	10,82	16	-173
3	cent. 16	3,25	10,0	0,000325	102360	33,27	16	-532
39	mil. 14	25,0	10,0	0,00025	100020	25,00	12	300
23	cent. 11	22,0	10,0	0,00022	95290	20,96	16	-335
11	cent. 10	1,75	10,0	0,000175	79880	13,98	16	-224
53	mil. 8	12,0	10,0	0,00012	95370	11,44	12	-138
54	mil. 7	10,0	10,0	0,0001	112250	11,23	12	-135
55	mil. 6	12,0	10,0	0,00012	101360	12,16	12	-145
15	cent. 5	3,75	10,0	0,000375	94110	35,29	16	-565
32	cent. 3	1,5	10,0	0,00015	82370	12,36	16	-198
67	mil. 1	14,0	10,0	0,00014	105010	10,30	12	-124
tirante	mil. 17	-	-	-	-	-	-	-
17	indut. 2	35,76	10,0	0,0003576	102030	36,49	16	-584
26	indut. 4	31,235	10,0	0,00031235	82470	25,76	16	-412
25	indut. 6	26,795	10,0	0,00026795	108300	29,02	16	-464
1	indut. 8	45,495	10,0	0,00045495	85590	38,94	16	-623

COMPARAÇÃO DE RESULTADOS - CARGAS EM TODOS OS NÓS DO MODELO

1 - STRESS (um módulo de elasticidade para cada barra)

2 - Experimental (média de 4 ensaios)

BARRAS DOS BANZOS	1 (Kg)	2 (Kg)	BARRAS DIAGONAIS	1 (Kg)	2 (Kg)
01	-615	-614	34	-197	-
02	-487	-	35	+109	-
03	-482	-491	36	-151	-
04	-316	-	37	+31	-
05	-266	-	38	-16	-
06	-232	-	39	+185	+273
07	-217	-	40	-252	-
08	-215	-	41	+11	-
09	-246	-	42	-71	-
10	-215	-	43	-37	-
11	-217	-223	44	+38	-
12	-232	-	45	-10	-
13	-266	-	46	-27	-
14	-316	-	47	-2	-
15	-482	-508	48	-7	-
16	-487	-	49	-43	-
17	-615	-589	50	+21	-
18	-122	-	51	+21	-
19	-212	-205	52	-43	-
20	-214	-	53	-7	-111
21	-324	-	54	-2	-118
22	-361	-	55	-27	-143
23	-368	-328	56	-10	-
24	-375	-	57	+38	-
25	-355	-436	58	-37	-
26	-355	-415	59	-71	-
27	-375	-	60	+11	-
28	-368	-	61	-252	-
29	-361	-	62	+185	-
30	-324	-	63	-16	-
31	-214	-	64	+31	-
32	-212	-186	65	-151	-
33	-122	-	66	+109	-
			67	-197	-144

Na comparação dos esforços, obtidos pelo computador e experimentalmente, encontraram-se as seguintes equações de regressão linear:

— para os banzos:

$$E_{\text{exp}} = 0,99 \cdot E_{\text{teor}} + 12,18$$

com um coeficiente de correlação (r), igual a:

$$r = 0,970$$

— para as diagonais:

$$E_{\text{exp}} = 0,458 E_{\text{teor}} + 119,55$$

sendo, neste caso, o coeficiente de correlação igual a:

$$r = 0,683$$

O teste da Hipótese Nula, para os dois coeficientes encontrados, indicou rejeição a essa hipótese no tocante aos resultados obtidos para os banzos, e aceitação da hipótese para os resultados obtidos para as diagonais, como pode ser visto abaixo:

$$t_{\text{banzo}} = 12,62 > t_{0,99} = 2,76$$

$$t_{\text{diag.}} = 1,68 < t_{0,99} = 3,36$$

Para os banzos, este resultado confirmou a correlação linear entre os esforços experimentais e os teóricos.

Para as diagonais, verifica-se que o número de amostras obtidas é insuficiente para que se possa concluir que o coeficiente de correlação não difere significativamente de zero, sendo que o tamanho mínimo da amostra necessária, é 13 como é mostrados abaixo:

$$\frac{r\sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r^2}} = t_{0,95} \quad \text{para } N-2 \text{ graus de liberdade}$$

Para  $N = 13$ , então  $\nu = 11$ , logo:

$$t_{0,95} = 3,11 \approx t = 3,10$$

Com isto, o tamanho mínimo da amostra é  $N = 13$ .

As mesmas observações feitas para o arco nº 1 são válidas para o nº 2, o que permite que se conclua pela validade das hipóteses adotadas para o cálculo e para a construção dos modelos reduzidos.

## VII - COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÕES

Como ficou patente, no decurso dos ensaios experimentais, não há dúvidas a respeito da fidelidade do "Ensaio de Obra" na avaliação da resistência da madeira. Além do mais, por ser este ensaio de fácil realização, possuir baixo custo e, portanto, ser adequado às condições brasileiras, substituí, as onerosas máquinas de classificação pela tensão (Stress Grading Machine).

Quanto aos ensaios dos arcos treliçados, especificamente do arco nº 2, ressalta-se que, em virtude da distribuição de suas peças ter sido aleatória, isto não implica ser esta uma distribuição crítica, ou seja, as piores peças estarem nos lugares mais solicitados. Esta situação, embora seja possível de ocorrer, pois também é aleatória, não foi questionada. O que se procurou mostrar nestes ensaios, é que, realmente, as peças de madeira, quando corretamente posicionadas na estrutura, levam a um acréscimo extra na segurança global do conjunto, independentemente do coeficiente de segurança adotado. Baseando-se, neste aspecto, é que se fundamentou todo o estudo desenvolvido neste trabalho, com a finalidade de possibilitar aos engenheiros e projetistas, incrementarem a segurança nas estruturas de madeira, através da classificação estrutural.

Como prosseguimento deste trabalho o autor sugere o estudo da classificação estrutural na determinação das tensões admissíveis a serem adotadas para o cálculo e dimensionamento das estruturas de madeira, com o objetivo de propor uma reformulação dos coeficientes de segurança, adequando-os às categorias de classificação estabelecidas.

## VIII - BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- 01 ASTM - ESTABLISHING STRUCTURAL GRADES AND RELATED ALLOWABLE PROPERTIES FOR VISUALLY GRADED LUMBER. ASTM Standards Part 22, D-245, 1975.
- 02 ASTM - EVALUATING ALLOWABLE PROPERTIES FOR GRADES OF STRUCTURAL LUMBER. ASTM Standards, Part - 22, D-2915, 1975.
- 03 Bauer L.A.F. - MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1979.
- 04 Brotero, F.A. - TAXAS DE TRABALHO ADMISSÍVEIS EM ESTRUTURAS DE PINHO BRASILEIRO. I. P. T. - Extrato do Relatório Oficial nº 1584.
- 05 Coleção Schaum - ESTATÍSTICA. 5.<sup>a</sup> Edição - Rio de Janeiro, McGraw-Hill, 1972.
- 06 Costa Neto, - ESTATÍSTICA. São Paulo, Edgard Blücher, P.L.O. 1977.
- 07 Fusco, P.B. - FUNDAMENTOS ESTATÍSTICOS DA SEGURANÇA DAS ESTRUTURAS. São Paulo, Universidade de São Paulo, 1977.
- 08 Giordano, G. - CONSTRUZIONE IN LENHO. Editore Ulrico Hoepli Milano, 1964.
- 09 Hellmeister, J.C. - ESTRUTURAS DE MADEIRA. 2.<sup>a</sup> Edição rev. São Carlos. EESC/USP, 1977. Notas de Aula.
- 10 Hellmeister, J.C. - SOBRE A DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA MADEIRA. Tese apresentada à EESC para obtenção do Grau de Doutor Engenheiro Civil. São Carlos, EESC/USP - 1973.

- 12 Johnson, - BASIC GRADING RULES AND WORKING STRESSES FOR STRUCTURAL TIMBERS. Us Dept. Agr.. Circ. 295, 23pp. Madison, Wisconsin, 1923.
- 13 Lahr, F.A.R. - ARCO TRELIÇADO DE MADEIRA. Dissertação apresentada à EESC para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Estruturas. São Carlos, EESC/USP, 1978.
- 14 Petrucci, - MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO. 3ª Ed. Porto Alegre, Globo, 1978.
- 15 Santos, L.M. - CÁLCULO DE CONCRETO ARMADO SEGUNDO A NB-1/76 E O CEB/72. São Paulo, Edgard Blücher, 1977.
- 16 Senft, J.F. - A NEW APPROACH TO STRESS GRADING OF LUMBER. & Suddarth, BER. Publisher Journal of the Forest Products Research Society 417N Standards, Part. 22, D-245, 1975.
- 17 Wilson, T.R.C. - GUIDE TO THE GRADING OF STRUCTURAL TIMBERS AND THE DETERMINATION OF WORKING STRESSES. Miscellaneous Publication nº 185. Washington, D.C, 1934.

