

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

**Ligação de Peças Estruturais de
Madeira Através de Cavilhas Partidas
de Eucalipto Citriodora**

Eng.º FRANCISCO ANTONIO ROMERO GESUALDO

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



COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. João Cesar Hellmeister - Orientador (EESC-USP)

Prof. Dr. Justo Moretti Filho - (ESALQ-USP)

Prof. Dr. Walter Savassi - (EESC-USP)

SÃO CARLOS, março de 1982

Aos meus pais

Rosa e Simão

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. João Cesar Hellmeister pela sugestão do tema, pelo incentivo, interesse e dedicação na orientação deste trabalho.

Ao Prof. Francisco Antonio Rocco Lahr pelo frequente acompanhamento deste trabalho, pela atenção, compreensão e carinho nos momentos de dificuldades técnicas e humanas.

Aos funcionários, graduandos, pós-graduandos e professores do Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira pelo espírito de união, cooperação, apoio e amizade.

Ao José Francisco pela dedicação e pela esmerada datilografia.

Ao Adriano e João Batista pelos serviços de desenhos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio monetário.

À Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP pela colaboração necessária para o término deste trabalho.

Ao Centro de Processamento de Dados da Escola de Engenharia de São Carlos pela utilização de seus equipamentos para a análise estatística.

Aos meus familiares minha eterna gratidão pelo incentivo, confiança e verdadeiro amor.

C O N T E Ú D O

	pag.
1. - INTRODUÇÃO.....	01
2. - A CAVILHA.....	06
2.1 - Comentários Gerais.....	06
2.2 - O Eucalipto Citriodora.....	06
2.3 - Características.....	07
2.4 - Preparação das Cavilhas.....	09
2.5 - Encavilhamento.....	15
3. - MODELOS, EQUIPAMENTOS E ENSAIOS.....	18
3.1 - Modelos.....	18
3.2 - Equipamentos e Ensaio.....	19
4. - COMPORTAMENTO DA CAVILHA PARTIDA NA LIGAÇÃO CAVILHADA....	22
4.1 - Cavilha Ideal.....	23
4.2 - Cavilha real.....	24
5. - LIGAÇÃO DE PEÇAS DE PEROBA ROSA SOLICITADAS POR COMPRES - SÃO PARALELA ÀS FIBRAS.....	27
5.1 - Experimentação.....	27
5.2 - Análise dos Resultados.....	30
5.2.1 - Carga Admissível.....	30
5.2.2 - Capacidade de Carga de uma Cavilha.....	35
5.2.2.1 - Representação Analítica.....	35
5.2.2.2 - Representação Gráfica.....	40
6. - LIGAÇÃO DE PEÇAS DE PEROBA ROSA SOLICITADAS POR COMPRES - SÃO NORMAL ÀS FIBRAS.....	44
6.1 - Experimentação.....	44
6.2 - Análise dos Resultados.....	46
6.2.1 - Carga Admissível.....	46
6.2.2 - Capacidade de Carga de uma Cavilha.....	49
6.2.2.1 - Representação Analítica.....	49
6.2.2.2 - Representação Gráfica.....	50

	pag.
7. - LIGAÇÃO DE PEÇAS INCLINADAS EM RELAÇÃO ÀS FIBRAS.....	51
8. - LIGAÇÃO DE PEÇAS DE PINHO DO PARANÁ.....	53
9. - LIGAÇÃO DE PEÇAS SOLICITADAS POR TRAÇÃO.....	55
10. - ESPAÇAMENTOS MÍNIMOS.....	56
10.1 - Espaços para Ligações Solicitadas por Com - pressão Paralela.....	56
10.1.1 - Espaços Cavilha - Borda (e_b) e Ca- vilha - Extremidade (e_c).....	57
10.1.2 - Espaço entre Cavilhas na Direção Normal às Fibras (e_n).....	58
10.1.3 - Espaço entre Cavilhas na Direção Paralela às Fibras (e_p).....	59
10.1.4 - Espaços entre Cavilhas Simultanea- mente Deslocadas na Direção Paralela e Normal às Fibras.....	60
10.1.5 - Verificação dos Espaços Mínimos...	62
10.1.6 - Conclusão.....	65
10.2 - Espaços para Ligações Solicitadas por Tra- ção.....	66
10.3 - Espaços para Ligações Solicitadas por Com- pressão Normal.....	69
11. - EMENDAS CAVILHADAS FLETIDAS.....	70
11.1 - Considerações Gerais.....	70
11.2 - Distribuição de Forças nas Cavilhas.....	71
11.3 - Experimentação.....	74
11.4 - Análise dos Resultados e Conclusões.....	76
12. - CONCLUSÃO.....	83
13. - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85

R E S U M O

A necessidade de soluções adequadas para estruturas de madeira expostas às condições ambientais quimicamente agressivas aos conectores e parafusos metálicos comumente usados para unir peças de madeira, trouxe a idéia das cavilhas.

As conhecidas cavilhas de madeira são feitas de madeira maciça. Para obter melhor ajustamento das cavilhas aos seus furos e facilitar sua cravação, a nova idéia foi partir a cavilha diagonalmente.

A finalidade deste trabalho é apresentar informações a respeito das cavilhas partidas, sua fundamentação teórica, seu cálculo e critérios para projeto e dimensionamento.

O estudo experimental de peças de madeira ligadas através de cavilhas partidas foi feito em compressão paralela e compressão perpendicular às fibras, em tração e em flexão. O espaçamento e a distribuição das cavilhas partidas foi estudado experimentalmente. A influência da densidade e do conteúdo de umidade foi também estudado.

As informações apresentadas são o resultado do ensaio de peças de Peroba Rosa (*Aspidosperma polymneuron*) ligadas por cavilhas partidas de Eucalipto Citriodora (*Eucalyptus citriodora*). São também apresentadas algumas informações relativas aos ensaios de peças de Pinho do Paraná (*Araucária angustifolia*) e cavilhas partidas de Eucalipto Citriodora.

Adotou-se o Sistema Internacional de Unidades.

O acesso às informações relativas ao emprego das cavilhas partidas já é uma contribuição para melhores construções de madeira, principalmente em ambientes agressivos. Entretanto, muito mais pode ser feito antes de se alcançar um completo conhecimento das cavilhas partidas e seu emprego.

S U M M A R Y

The necessity of adequate solutions for wooden structures exposed to environmental conditions chemically aggressive to the metallic connectors and screws commonly used to bring together the wooden parts, brought the idea of the dowels.

The known wooden dowels are made of solid wood. In order to obtain better adjustment of the dowels to their holes, and easier studding the new idea was to split diagonally the dowels.

The purpose of this work is to present information on split dowels, their theoretical fundamentals, their calculation and criterions for design and size choice.

The experimental study of pieces of wooden fastened by split dowels was done on compression parallel and compression perpendicular to the grain, on tension and on bending. Spacing and distribution of the split dowels was experimentally studied. The influence of the density and of the moisture content was also experimentally studied.

The information presented are the result of testing of pieces of Peroba Rosa (*Aspidosperma polymneuron*) fastened by split dowels of Eucalipto Citriodora (*Eucalyptus citriodora*). It is also presented some information on testing of pieces of Parana Pine (*Araucaria angustifolia*) and split dowels of Eucalipto Citriodora.

It was adopted the International System of Units.

The access to the information on the use of the split dowels is already a contribution to better wooden construction, mostly on aggressive environmentals. Nevertheless much more can be done before a complete knowledge of the split dowels and its usage is reached.

NOTAÇÕES

- P = carga de ruptura para uma cavilha.
- \bar{P} = carga admissível para uma cavilha.
- σ_c = tensão de ruptura na compressão paralela.
- E = módulo de elasticidade.
- U = Umidade.
- γ = massa específica (densidade)
- δ = diâmetro do furo.
- b = espessura da peça principal nas ligações ou soma das espessuras das cobrejuntas.
- \bar{P}_θ = carga admissível de uma cavilha na direção θ .
- \bar{P}_p = carga admissível de uma cavilha nas ligações entre peças paralelas de Peroba Rosa.
- \bar{P}_n = carga admissível de uma cavilha nas ligações entre peças perpendiculares de Peroba Rosa.
- P_{pp} = carga de ruptura de uma cavilha nas ligações entre peças paralelas de Pinho do Paraná.

UNIDADES

m = metro (linear)

cm = centímetro (linear)

mm = milímetro

kg = quilograma (massa)

N = Newton (força)

kN = quilo-Newton (força)

MPa = mega-Pascal (tensão)

kg/cm³ = quilograma por centímetro cúbico (massa específica)

RELAÇÕES ENTRE UNIDADES

1 N = 0,1 kgf (quilograma força)

1 kN = 100 kgf

1 kN = 1000 N

1 MPa = 1 N/mm²

1 MPa = 10 kgf/cm²

1. - INTRODUÇÃO

A madeira, sendo um material natural, teve seus primeiros usos com o homem pré-histórico. A falta de técnica elaborada levava-o a empregar a madeira como elemento estrutural, aproveitando a conformação originária dos troncos.

Historicamente, o desenvolvimento da utilização da madeira se inicia com a construção das frágeis, porém estáveis cabanas. A insuficiência de elementos de ligação, na época, gerou as primeiras idéias, baseadas nos sistemas de encaixes, sem a existência de pinos.

A figura 1, HODGKINSON¹⁴, 1976, mostra detalhes de união dos troncos, baseado nos encaixes.

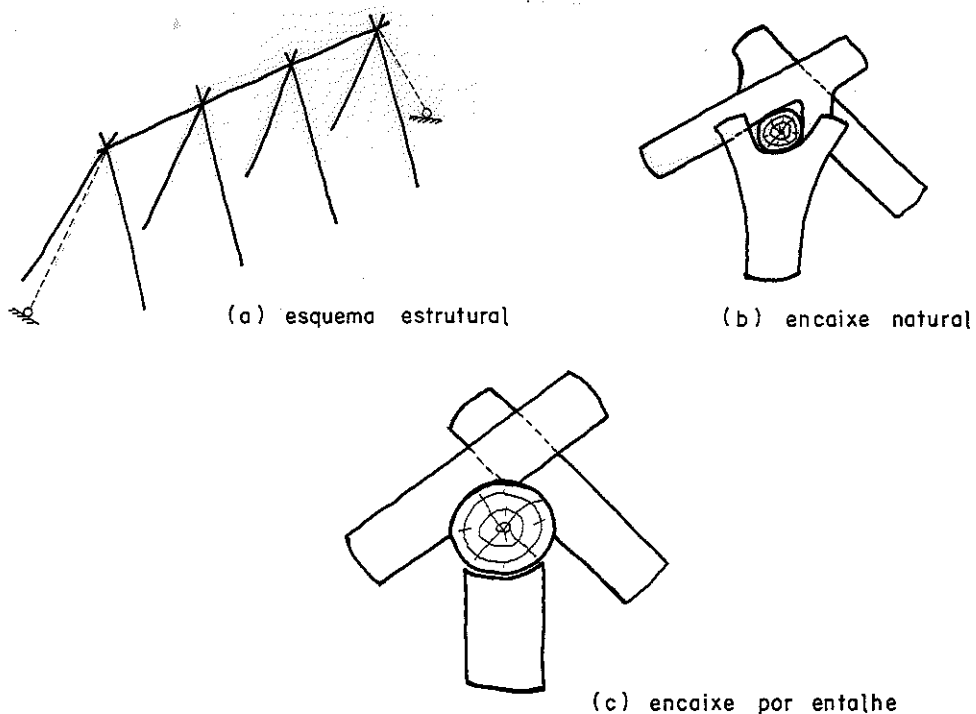


FIG. 1 - Tipos de ligações usadas pelo homem nas cabanas primitivas

A necessidade de técnicas mais elaboradas advinda da evolução do homem, trouxe o desenvolvimento do emprego da madeira, material disponível na época.

Como resultado da aplicação exclusiva da madeira, surgiu o aprimoramento dos sistemas estruturais e dos elementos de ligação.

Mais tarde, porém, por volta do século XVIII, o aço passa a compartilhar os esforços estruturais nas peças de madeira. Empregaram-no em ligações, como pinos, e nas vigas "sanduiche" possibilitando uma capacidade de carga maior do conjunto.

Em meados do século XIX, a madeira sofre um descrédito, causado pelo aparecimento de outros materiais como o concreto e o aço, empregado isoladamente. Consequentemente, estes novos materiais atraíram os pesquisadores, deixando a madeira de ser o material básico para a construção.

A partir de então, o emprego da madeira sem um nível técnico aprimorado de pesquisa, estagnou-se, passando a ser considerada de uso insatisfatório.

Apesar da fase de pouco interesse pela madeira durante o século XIX, sua aplicação estrutural tem recuperado-se nestas últimas décadas.

Os avanços da tecnologia da madeira tem-se desenvolvido principalmente em países como os Estados Unidos, Canadá, Rússia, Itália, França, Inglaterra, Austrália, Portugal e outros.

No Brasil, a madeira ainda é utilizada com acentuada desinformação técnica, de forma quase rudimentar, com evidentes desperdícios.

Embora seja o Brasil um país rico em madeiras, ainda não possui uma tradição madeireira. As pesquisas na área são conduzidas por um número bastante reduzido de pesquisadores, em sua maioria voltados para a caracterização física e mecânica, sem a preocupação da pesquisa na área estrutural.

A aplicação dos conhecimentos práticos, aliados aos princípios da engenharia e à adaptação de técnicas estrangeiras, tem permitido o emprego da madeira em estruturas de coberturas, desde pequenos vãos até vãos da ordem de 30 metros. Vãos maiores seriam facilmente vencidos, bastando para isto o aprimoramento dos conhecimentos.

No Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM) da Escola de Engenharia de São Carlos-USP, vem sendo conduzidos estudos teóricos e experimentais, tendo em vista o aprimora-

mento dos esquemas estruturais mais adequados para a construção utilizando madeira. A experimentação de modelos pouco reduzidos e a construção de estruturas reais, tem revelado a ampla viabilidade do emprego da madeira, com economia, facilidade construtiva, etc.

Tem-se obtido resultados significantes no aperfeiçoamento da geometria das estruturas e das ligações, os dois fatores críticos para vencer grandes vãos com elegância e leveza.

Quanto às ligações pretende-se neste trabalho, incluir uma nova opção entre os tipos existentes.

As ligações existentes, basicamente, são pregadas, parafusadas, coladas, por anéis metálicos, por anéis de plástico, dentadas e cavilhadas.

As ligações pregadas são comumente empregadas em pequenas estruturas e em estruturas provisórias. É um tipo de ligação econômica e de fácil execução, mas aplicável à solidarização entre peças de importância secundária. Sua execução não requer cuidados especiais, devendo-se entretanto, evitar as rachaduras durante a penetração do prego. O dimensionamento segue recomendações da NB 11¹.

As ligações parafusadas são de grande resistência mecânica e são o tipo mais usado na prática. Atualmente se desenvolve trabalho no LaMEM a nível de mestrado, visando o aprimoramento de ligação de peças de madeiras brasileiras utilizando parafusos. O dimensionamento destas ligações tem sido feito no Brasil, de acordo com as recomendações da NB 11¹, e trabalho desenvolvido por LUCHESE e STAMATO¹⁷.

As ligações coladas são pouco utilizadas no Brasil. A norma brasileira (NB 11) não faz menção ao assunto. Encontram-se muitas citações na literatura internacional, BROCHARD³, KARLSEN¹⁶ e SYNDICAT NATIONAL DES CONSTRUCTEURS DE CHARPENTES EM BOIS LAMELLÉ - COLLÉ²⁸. Entre os trabalhos do LaMEM encontra-se uma contribuição para o cálculo e fabricação de peças laminadas para algumas espécies de madeiras brasileiras, conforme ZANDER²⁹.

A utilização estrutural mais comum dos adesivos ocorre nas vigas laminadas, para as estruturas de seção transversal composta maciça ou vazada. Obtem-se com os adesivos ligação rígida e resistente entre peças de madeira. Em geral, para ligação entre elementos de treliças, prefere-se o emprego de outros elementos de ligação.

As ligações por anéis metálicos entre peças estruturais de madeira são bastante eficientes. dada sua elevada resistência mecânica em relação ao espaço necessário para disposição dos elementos de ligação. É própria para ligar peças com esforços elevados. Há grande número de citações na literatura estrangeira. No LaMEM vem sendo desenvolvidos estudos a respeito dos anéis metálicos desde 1971. Após demorado exame bibliográfico, teórico e experimental dos anéis de ligação foi apresentado o trabalho de MATTHIESEN²⁰. Este trabalho representou uma grande contribuição para o conhecimento deste tipo de ligação, dentro da realidade brasileira. Estudou-se o emprego dos anéis metálicos para ligação entre peças de Peroba rosa, Pinho do Paraná e Eucalipto citriodora. Em 1978, HELLMEISTER¹¹, já havia apresentado a idéia básica dos anéis metálicos e principalmente, solidarizando postes de madeira, tendo em vista a obtenção de vigas de seção bi-circular e outras.

As ligações por anéis plásticos são ainda pouco conhecidas. São um tipo semelhante aos anéis metálicos, onde se emprega material sintético (tubos de PVC). MATEUS¹⁹, por volta dos anos 60, publicou pesquisa desenvolvida no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, em Lisboa, mostrando o emprego dos anéis plásticos de pequeno diâmetro. Atualmente, desenvolve-se trabalho semelhante no LaMEM, em São Carlos, com o objetivo de conhecer as características desta ligação, e sua aplicação em conjunto com as cavilhas. O uso dos dois materiais é sugestivo pela característica comum - imunidade à corrosão.

As ligações dentadas, ou por encaixe, são feitas através de cortes especiais, aumentando e racionalizando as áreas de contato. Estas ligações são eficientes e indicadas para diversas situações. Recomenda-se um cuidado especial dos projetistas na escolha das seções transversais das estruturas, condição básica para obter o arranjo das peças, adequado para as ligações por encaixe. Estas ligações, pelas mesmas razões apresentadas com relação aos anéis plásticos - não corrosão - são convenientes para utilização em ambientes agressivos, principalmente quando empregados em conjunto com as ligações cavilhadas. As ligações dentadas são comumente citadas na literatura, GIORDANO⁹, HANSEN¹⁰, KARLSEN¹⁶, OZELTON²¹ e PEARSON²².

A ligação de peças estruturais de madeira utilizando cavilhas de madeira tem sido feita através de cavilhas cilíndricas.

As cavilhas são especialmente recomendadas para ambientes agressivos de indústrias químicas ou situados à beira-mar.

Os projetos são, geralmente, falhos devido à falta de informações adequadas ao emprego racional das cavilhas. A NB-11¹ é omissa a respeito.

Será apresentado neste trabalho um estudo abrangente das cavilhas partidas, designação adotada para indicar a cavilha cilíndrica partida na forma de duas cunhas para melhorar sua colocação e comportamento.

2. - A CAVILHA

2.1 - Comentários Gerais

Os edifícios construídos à beira mar, ou os edifícios de indústrias químicas em geral são sujeitos ao ataque altamente prejudicial do ar úmido, salino, ou impregnado de produtos químicos. A construção de estruturas de madeira apresenta características bastante satisfatórias para tais condições, desde que os elementos de ligação das peças estruturais tenham características compatíveis. É necessário que todos os componentes da estrutura não se danifiquem sob as condições ambientais citadas, GIORDANO⁸.

O uso das cavilhas partidas de Eucalipto Citriodora permite a construção de estruturas altamente protegidas contra a corrosão. A resistência à corrosão aliada à resistência mecânica, baixo custo e simplicidade de produção, tornam a aplicação das cavilhas viável em estruturas de edifícios com as mais variadas finalidades, desde os galpões industriais, os depósitos, os cortumes, os silos para estocagem de material, até as igrejas e outras construções de frequência predominantemente social.

2.2 - O Eucalipto Citriodora

O Eucalipto Citriodora (Eucalyptus citriodora, Hook) é uma espécie de madeira classificada botanicamente na divisão das Fanerogamas.

Na subdivisão das Fanerogamas, o Eucalipto Citriodora classifica-se entre as Angiospermas (ou Dicotiledôneas). Esta classificação representa as madeiras duras ("hard wood").

Pela própria classificação botânica, o Eucalipto Citriodora é uma espécie de madeira de elevada resistência mecânica, comparável à do Ipê, Cabreúva, Maçaranduba, etc.

Comparando-se a resistência mecânica do Eucalipto Citriodora, com a resistência mecânica das madeiras das peças interligadas, empregadas nos modelos ensaiados nesta pesquisa (Peroba Rosa e Pinho do Paranã), tem-se uma relação em torno de 1,6 a 2,6 respectivamente, em favor do Eucalipto Citriodora.

Ensaio7s específicos para caracterização física e mecânica

ca do Eucalipto Citriodora empregado na montagem dos modelos ensaiados, resultaram os seguintes valores médios:

$$\sigma_c = 66,4 \text{ MPa}$$

$$E = 16.578 \text{ MPa}$$

$$\gamma = 1,07 \text{ g/cm}^3$$

$$U = 22,5\%$$

2.3 - Características

Cavilhas são elementos cilíndricos de madeira duras, no caso de Eucalipto Citriodora, empregados na ligação entre peças estruturais de madeira.

Podem ser de dois tipos: comuns e partidas.

As cavilhas comuns são simples cilindros (pinos) de madeira, encaixados sob pressão em furos previamente executados. KARLSEN¹⁶, GIORDANO⁹ e MOLITERNO¹⁸ fazem breves citações a este tipo de cavilha. ECKELMAN^{6,7} e PIEDADE²³ apresentam estudos mais específicos. Destes, o primeiro relata o comportamento da cavilha comum ao arrancamento na direção do furo, como subsídio aos projetistas de estruturas de mobílias em geral. Apresenta formulação teórica para dimensionamento, resultante de experimentação em corpos de prova adequados. A aplicação destes resultados em estruturas de cobertura pode ser viável para o dimensionamento de peças de contraventamento, apoios de terças ou quaisquer outras fixações de ordem secundária, sem traspasse da cavilha nas peças. Este estudo não pode ser aplicado diretamente às espécies de madeiras brasileiras, pois, foi desenvolvido com espécies americanas (cavilhas de Sugar Maple com peças de 15 espécies típicas para a fabricação de móveis).

O segundo desenvolveu trabalho experimental com peças de Peroba Rosa e Pinho do Paraná ligadas através de cavilhas comuns de Eucalipto Citriodora. Foram estudadas as ligações com peças nas posições paralela e normal às fibras. Foi analisado também, o comportamento das cavilhas comuns aplicadas às vigas laminadas de Pinho do Paraná (laminação vertical).

Com o intuito de melhorar a eficiência das ligações cavilhadas, CORDOVIL e HELLMEISTER⁴ utilizaram pela primeira vez as cavilhas partidas.

As cavilhas podem ser obtidas torneando-se peças de madeira em forma retilínea, cilíndrica (cavilha comum). Um corte oblíquo, fig. 2.(a), da cavilha comum, permite a obtenção de duas peças na forma de cunhas plano-cilíndricas, fig. 2.(b), elementos constituintes da cavilha partida, mais adequada para o ajuste dentro do furo, fig. 3.

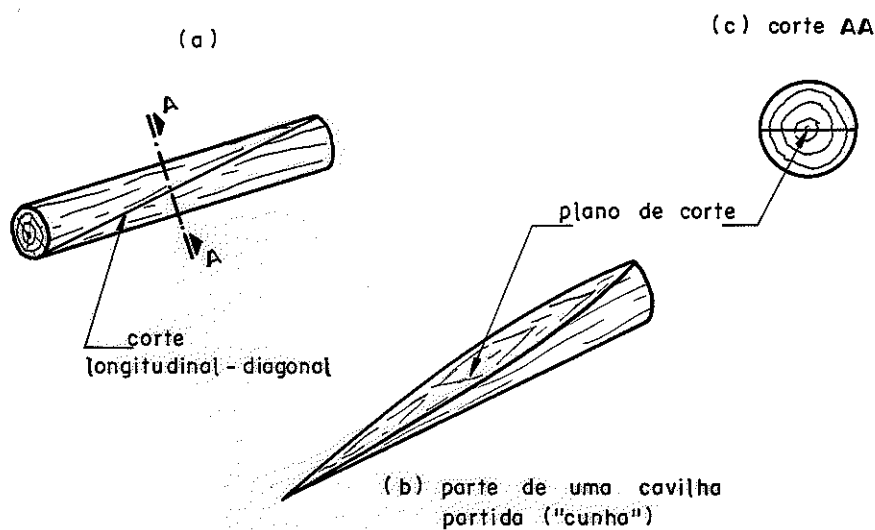


FIG. 2 - Detalhes de uma cavilha partida

O corte oblíquo da cavilha sugere sua justaposição especial, garantia de rigidez do conjunto das peças ligadas, resultando em ligações compactas, bem ajustadas e de aspecto visual agradável, com os elementos de ligação totalmente embutidos nas peças ligadas, fig. 3.

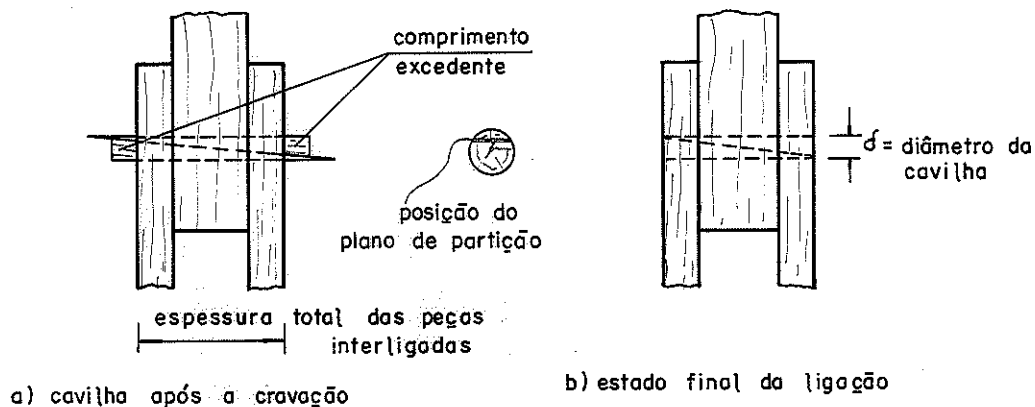


FIG. 3 - Aspecto das ligações cavilhadas

Para aumentar a aderência da cavilha ao furo, recomenda-se a aplicação do adesivo estrutural nas superfícies das "cunhas", facilitando o escorregamento relativo entre as mesmas na etapa de cravação. A aplicação deste adesivo não altera a capacidade da ligação a curto prazo, uma vez que seu efeito é perpendicular à direção da solicitação principal. A longo prazo, a cola gem permitirá melhores condições de rigidez do conjunto, aumentando a garantia de permanência da cavilha dentro do furo.

A posição das "cunhas" para cravação da cavilha deve ter o plano de partição perpendicular à direção da solicitação principal, conforme sugere a fig. 4.

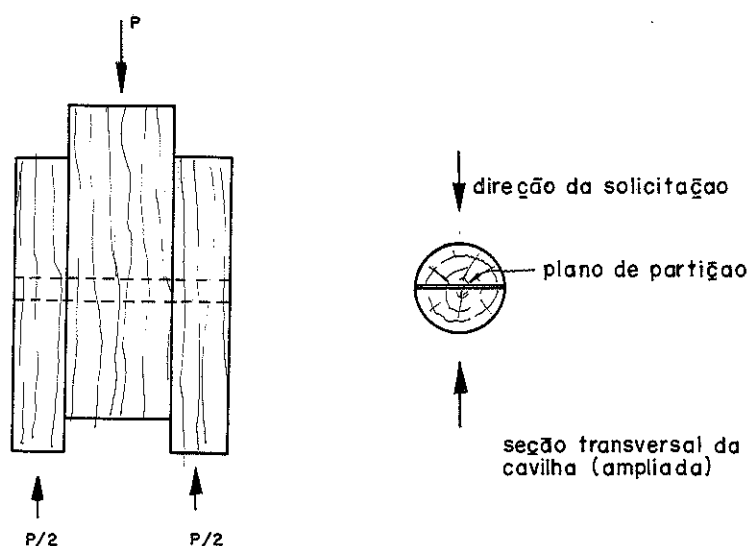


FIG. 4 - Orientação para o plano de partição

A sugestão anterior é adequada, pois o ajuste na direção considerada é fornecida pelo efeito cunha. Quando ocorre a solicitação, há um aumento da pressão de contato entre as "cunhas", aumentando o atrito e dificultando o deslocamento relativo entre as mesmas.

2.4 - Preparação das Cavilhas

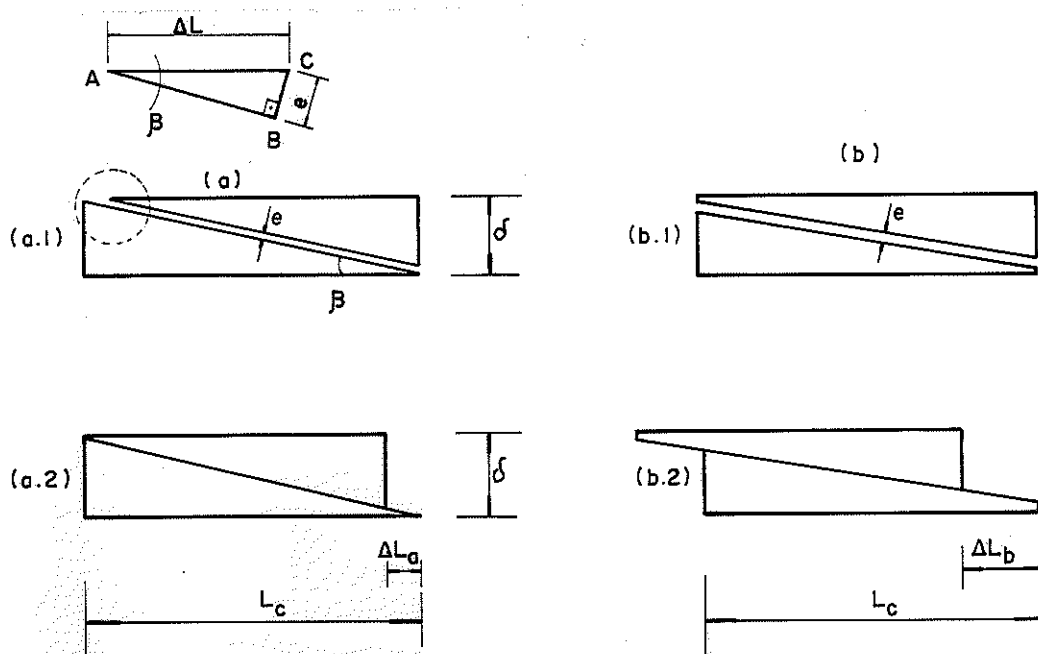
O primeiro passo, na preparação das cavilhas, consiste na obtenção de peças de Eucalipto Citriodora de seção quadrada

com lados aproximadamente iguais ao diâmetro desejado para as cavilhas mais 2 mm ($\delta + 2$ mm) e comprimentos de acordo com a soma das espessuras das peças interligadas, como sugerido na fig. 5, mais o comprimento necessário para a fixação das peças no equipamento de arredondamento das peças.

A partir das peças de seção quadrada obtem-se peças arredondadas (seção circular) por meio de equipamentos adequados. Estes equipamentos podem ser de diversos tipos. Os mais comuns são o torno mecânico e a máquina empregada na confecção de cabos de vassouras.

As peças cilíndricas de comprimento L_c , fig. 5, são submetidas ao corte oblíquo, através de serra circular e de dispositivo apropriado (serrador de cavilhas), descritos com detalhes em parágrafo adiante.

No caso de grande demanda de cavilhas, é conveniente um cálculo mais aprimorado do comprimento L_c , para economia de material. É importante notar o aproveitamento da inclinação do plano de corte diagonal ilustrado na fig. 5, para redução do comprimento excedente.



- e = espessura do corte (espessura da serra)
- L_c = soma das espessuras das peças a serem ligadas + comprimento excedente para traspasse
- δ = diâmetro da cavilha

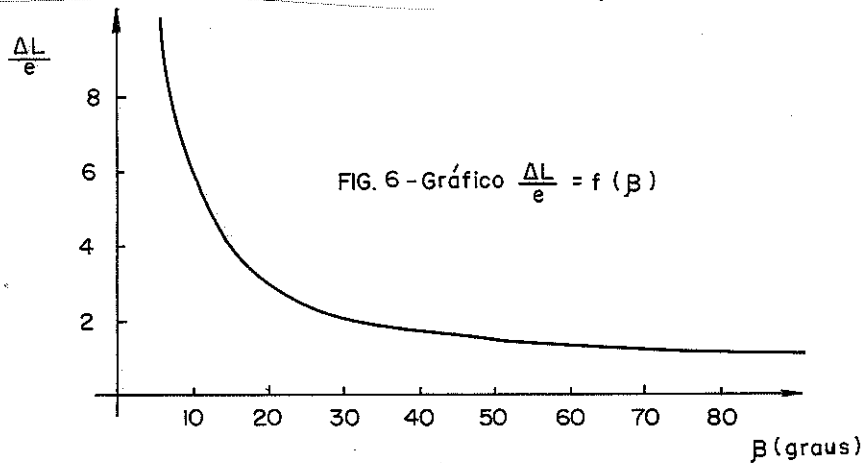
FIG. 5 - Efeito da posição do corte [longitudinal - oblíquo

Relaciona-se, facilmente, o deslocamento relativo entre as "cunhas" (Δl) em função da espessura (e) da serra e do ângulo β .

Pelo triângulo retângulo indicado na parte superior da fig. 5, obtém-se:

$$\text{sen } \beta = \frac{e}{\Delta l} , \text{ ou seja } \frac{\Delta l}{e} = \frac{1}{\text{sen } \beta}$$

Constroem-se, a partir desta equação, o gráfico da fig.6.



Depreende-se do gráfico da fig. 6, que a situação ideal, de menor Δl ($\Delta l = e$), ocorre para $\beta = 90^\circ$. Porém, um corte a 90° não tem significado prático.

A outra situação extrema ocorre para $\beta = 0$, quando então, Δl é infinito. Assim, o ângulo de inclinação de corte (β), deve assumir valores intermediários de 0° a 90° .

Como se observa na fig. 7, β corresponde ao arco cuja tangente é a relação entre δ e a distância x .

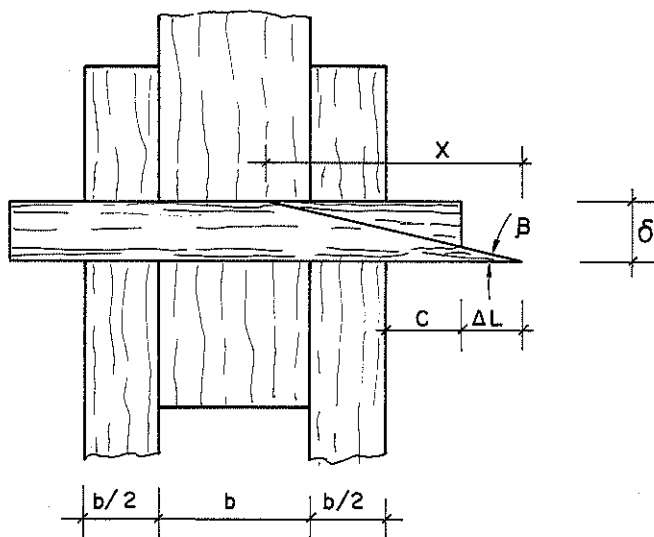


FIG. 7 - Efeito desfavorável causado para altos valores de β

Observa-se pela fig. 7, que para haver viabilidade e eficiência construtiva, a distância x deve ser maior ou igual à soma das espessuras das peças interligadas, para garantir o traspasse das "cunhas". Acontece porém, que a extremidade das "cunhas" não coincide com a face externa das peças ligadas; há uma diferença (d) para o ajuste desejado. Desta forma, sendo $x = 2b$, não ocorrerá o traspasse necessário, fig. 8, voltando-se à indesejável situação mostrada na fig. 7.

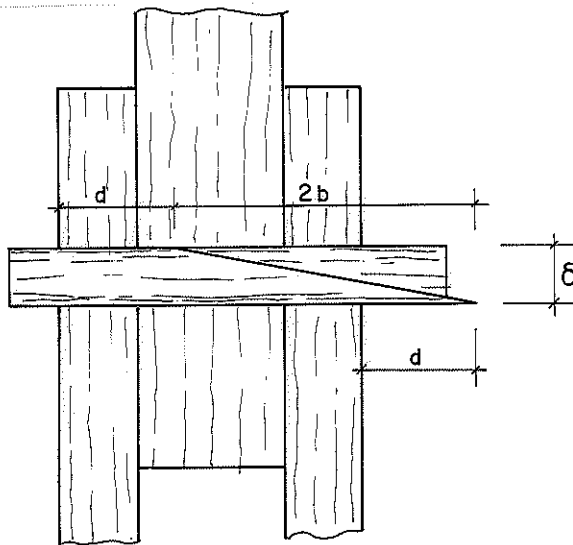


FIG. 8 - Situação particular para determinação do ângulo
 $\beta \rightarrow \beta = \text{arctg} \left(\frac{6}{2b} \right)$

A figura 9, ilustra o caso também indesejável, no qual o ângulo β é pequeno. Há um traspasse bastante grande das "cunhas", pois Δl é grande em consequência de β pequeno ($\Delta l = e/\text{sen } \beta$).

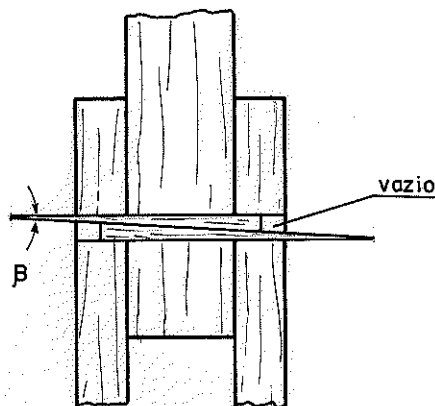


FIG. 9 - Ligação cavilhada - corte longitudinal
Consequência da inclinação da linha do
corte diagonal mal escolhida

Em vista do exposto, considera-se conveniente assumir $x = L_c$, sendo L_c igual à soma das espessuras a serem ligadas, mais 40%. O comprimento excedente de 40% é previsto para compensar os deslocamento Δl , o ajuste (acomodação) da cavilha no furo e as eventuais danificações das extremidades das "cunhas" durante a cravação.

Assim sendo, o ângulo β tem o valor do arco cuja tangente é δ/L_c fig. 7, resultando um plano de partição que é um plano oblíquo particular contendo a tangente ao círculo (seção transversal da cavilha) de uma das bases, e a tangente diametralmente oposta do círculo da outra base do cilindro, fig. 10.

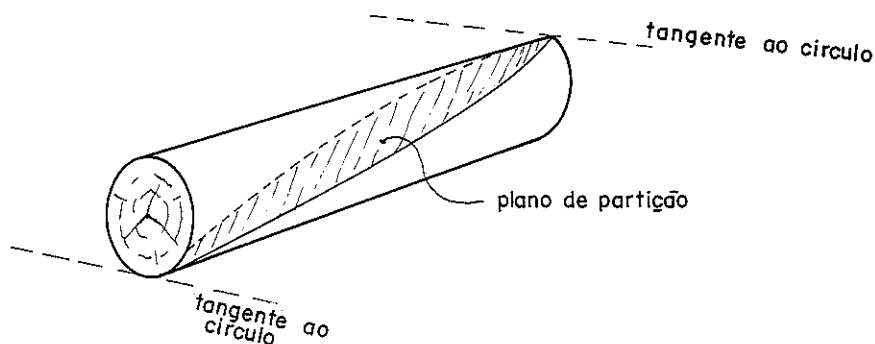


FIG. 10 - Plano de partição conveniente

Para a execução do corte diagonal utiliza-se o serrador de cavilhas, fig. 11.

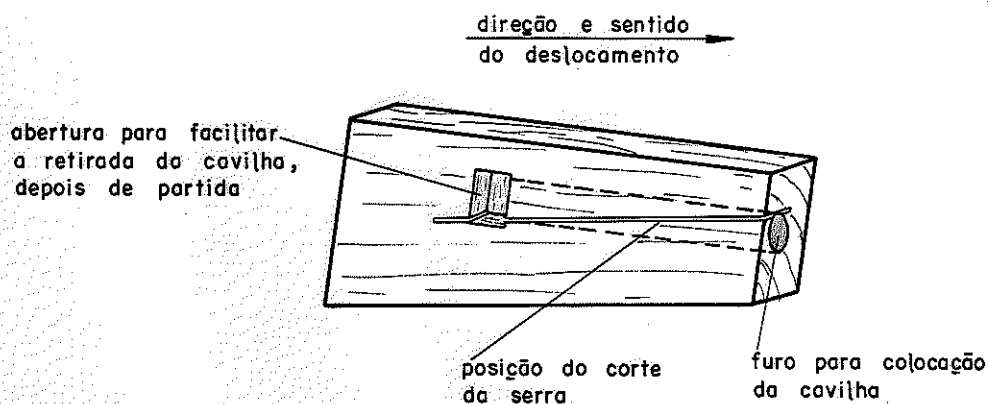


FIG. 11 - Serrador de cavilhas

O serrador de cavilhas pode ser uma peça de madeira bem resistente, de comprimento pouco maior que o da cavilha e seção transversal apropriada: (6 x 12) ou (6 x 16) cm². A face inferior tem inclinação de acordo com as indicações da fig. 5. Na seção transversal, há um furo de diâmetro δ , ligeiramente superior ao da cavilha, paralelo à face superior, no qual se introduz a cavilha para o corte diagonal.

A fig. 12 ilustra o esquema geral para utilização do serrador de cavilhas.

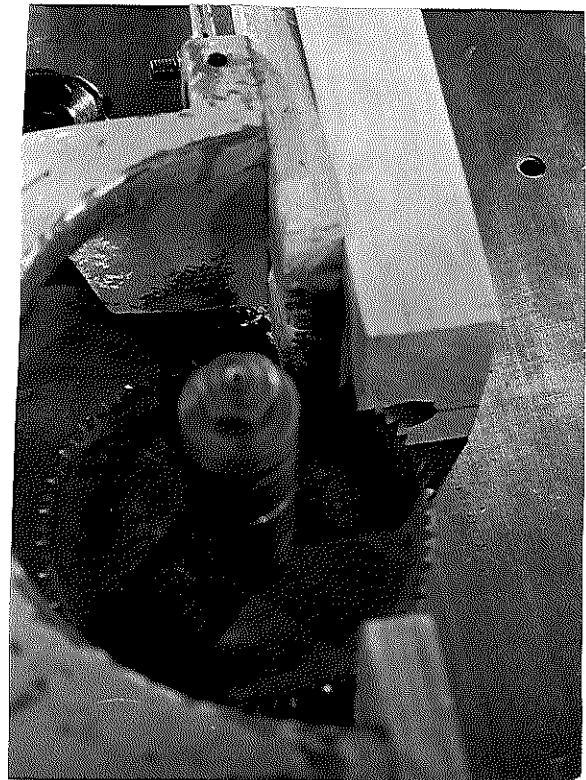
Emprega-se uma tupa com serra circular. O serrador, com a face inclinada para baixo, mantém a cavilha inclinada. Assim, o deslocamento horizontal do serrador produz o corte inclinado na cavilha.

Após o corte, a retirada da cavilha partida ("cunhas"), é feita com o auxílio da abertura lateral do serrador, no qual se introduz ferramenta apropriada, forçando a cavilha para fora do furo.

É prudente manter a correspondência entre os pares de "cunhas", prendendo-os com fita colante.



(a) vista lateral



(b) vista superior

FIG. 12 - Utilização do serrador de cavilhas

Para melhor solidarização e ajuste das "cunhas" após a cravação da cavilha, recomenda-se uma raspagem ou lixamento das mesmas, para tornar as superfícies lisas e sem farpas.

2.5 - Encavilhamento

O processo descrito tem como referência os corpos de prova utilizados na pesquisa. No entanto, considera-se praticamente idêntica a montagem de qualquer ligação cavilhada em estruturas reais.

A fig. 13 mostra as etapas de montagem de uma ligação cavilhada.

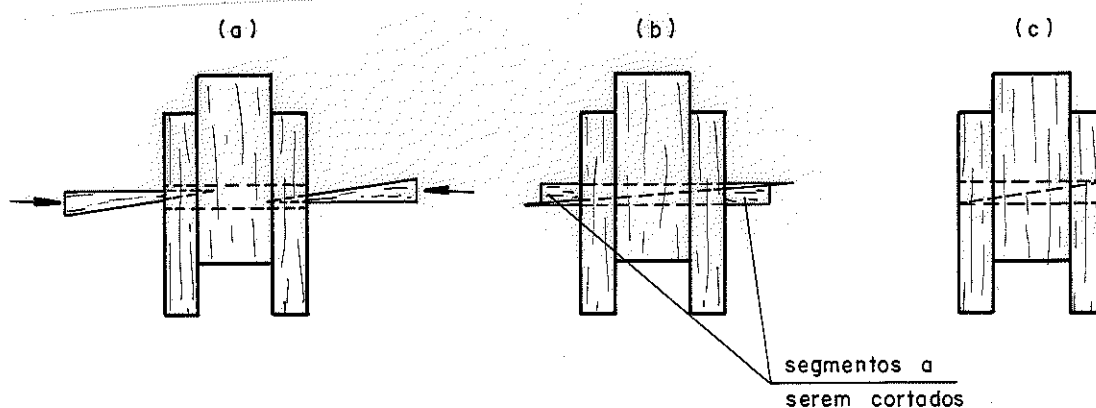


FIG. 13 - Etapas de montagem de ligações cavilhadas

A etapa mostrada na fig. 13(a) é precedida pela fixação das peças, através de pregos, para obter furos perfeitamente centrados. Estes pregos devem ter comprimento maior que a espessura da cobrejunta e o menor diâmetro possível para evitar rachaduras.

Após a execução dos furos para alojar as cavilhas, retiraram-se os pregos e prendem-se as peças através de grampos fixados ("sargentos"), fig. 14, para se proceder à cravação das cavilhas.

Na ligação das peças de estrutura real é dispensável o uso de pregos, antes da furação. O emprego de grampos fixadores torna-se viável, uma vez que os furos são executados por furadeira manual (não em bancada).

Antes da cravação, aplica-se adesivo nas superfícies das "cunhas". O adesivo será escolhido segundo as características do ambiente ao qual a ligação estará submetida.

Para estrutura de grande responsabilidade e sob condi -

ções de umidade elevada, é recomendável um adesivo de maior resistência mecânica e de comportamento adequado na presença da água. Em casos normais, os adesivos comuns (Cascorez, Cascolar, Tenas, ou similares) satisfazem as exigências, sem prejuízos a capacidade de carga da ligação.

Segundo a experimentação desenvolvida, a curto prazo, o uso do adesivo é dispensado, sem alterar as características resistentes da ligação.

A cravação das cavilhas se processa pelo movimento relativo das "cunhas" em sentidos opostos, fig. 13(a), até o perfeito ajuste, fig. 13(b).

O ajuste das "cunhas" se faz por meio de percussão a golpes de martelo (ou ferramenta similar), aplicados na extremidade de uma das "cunhas", enquanto a outra permanece apoiada, fig. 14 e 15.

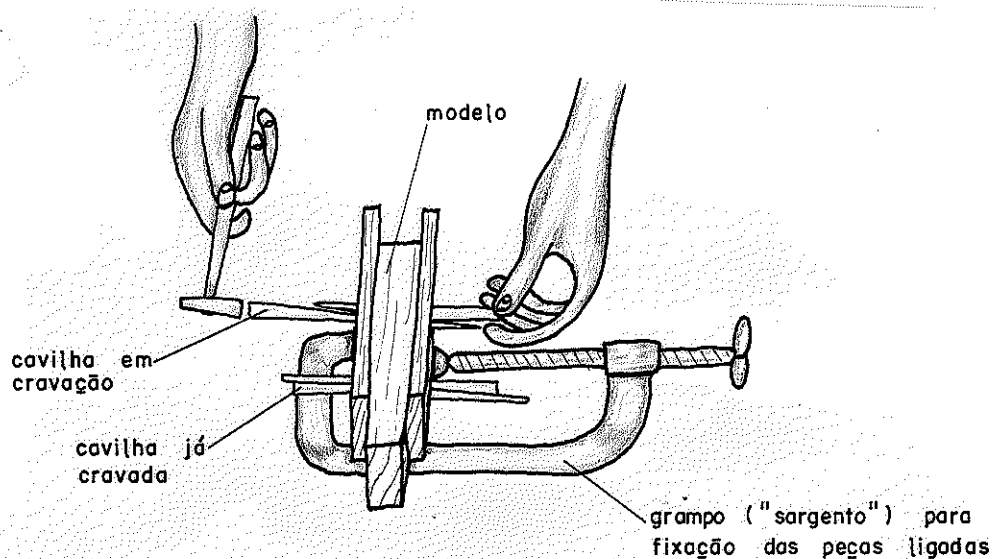
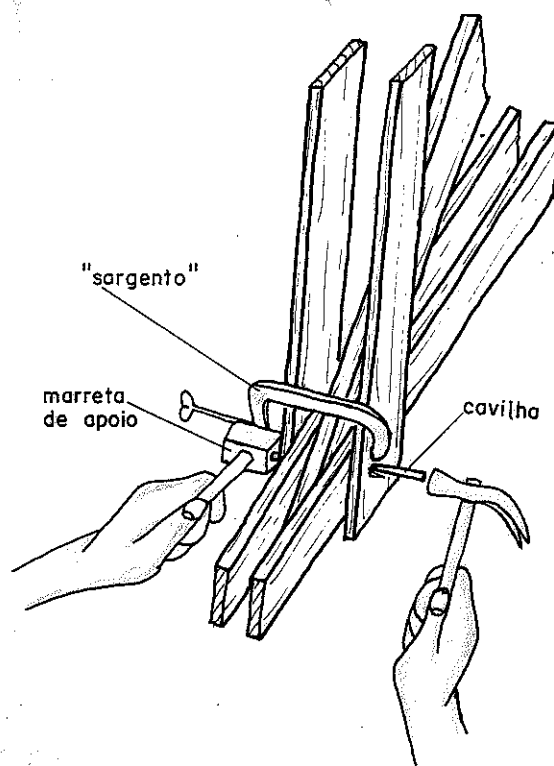
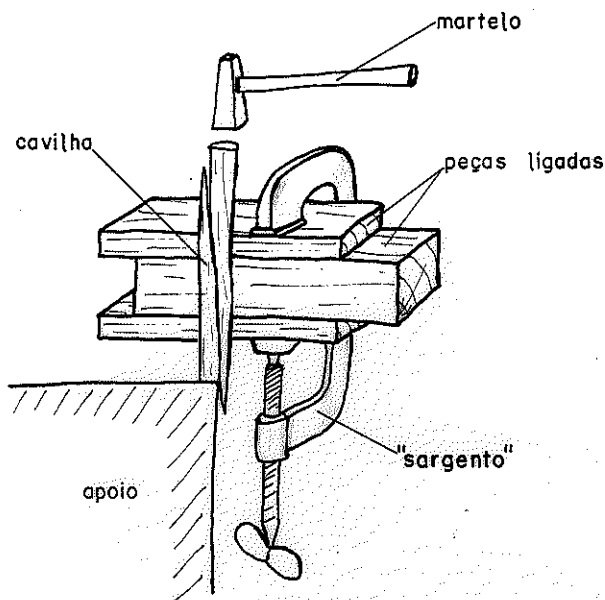


FIG. 14 - Encavilhamento

Para melhor ajuste das cavilhas, recomenda-se apoiar a extremidade da "cunha" não golpeada, como ilustra a fig. 15. Evita-se, desta forma, o deslocamento de todo o conjunto (a cavilha) para o outro lado do furo. Sem este apoio não ocorre deslocamento relativo entre as "cunhas".

(a) - seção longitudinal de um modelo com cavilha em cravação



(b) Cravação das cavilha nas ligações de estrutura real

FIG. 15 - Montagem de ligações cavilhadas

Ao longo da operação do ajuste, deve-se alternar a extremidade golpeada, ou seja, ora uma extremidade está apoiada, ora está a outra. Consegue-se, assim uma melhor acomodação da cavilha no furo.

Este procedimento se repete até que o deslizamento relativo entre as "cunhas" seja dificultado. O operador deve ter a percepção do momento apropriado para cessar os golpes, pois a insistência, ou aplicação de golpes violentos poderá fendilhar a madeira das peças interligadas pelo efeito cunha.

Completado o ajuste de uma cavilha, procede-se à cravação das demais. Completada a operação, faz-se uma verificação dos ajustes de cada cavilha e uma vistoria geral para detectar possíveis danos na ligação.

O corte dos segmentos salientes será a operação final, acompanhado de lixamento ou acabamento para um melhor aspecto visual, fig. 13(c). Obtém-se assim um conjunto compacto de peças e os elementos de ligação (cavilhas) totalmente embutidos nas peças interligadas.

3. - MODELOS, EQUIPAMENTOS E ENSAIOS

3.1 - Modelos

O desenvolvimento experimental teve como base a realização de ensaios em modelos na escala natural. Basicamente, são de três tipos: compressão paralela às fibras, fig. 16(a), compressão perpendicular às fibras fig. 16(b) e tração paralela às fibras fig. 16(c).

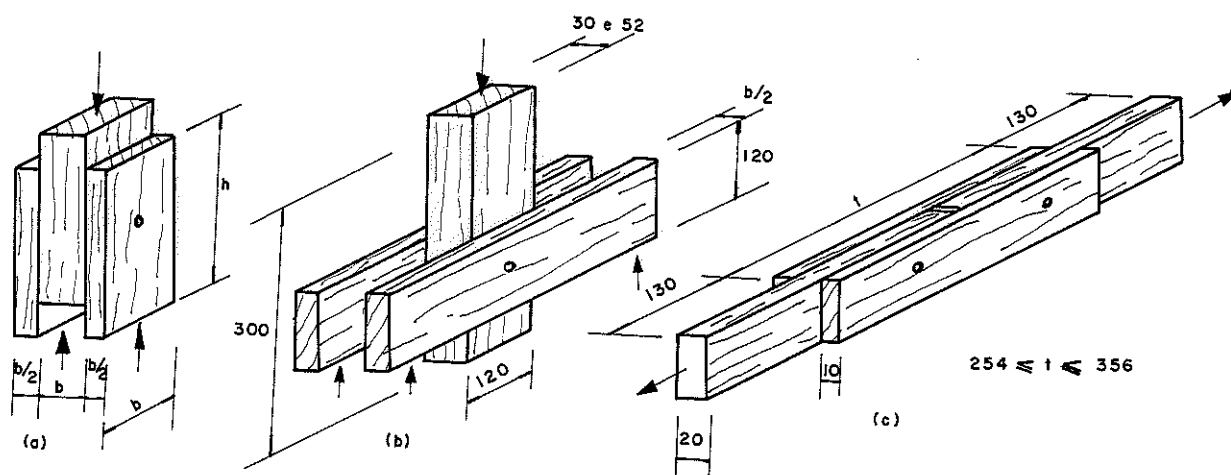


FIG.16- Tipos básicos de corpos de prova.(medidas em mm)

Observa-se pela fig. 16, a orientação das fibras quanto aos tipos de sollicitação. Nas ligações por compressão e por tração paralela, as fibras das peças interligadas estão orientadas na mesma direção. Na ligação por compressão perpendicular, o ângulo formado entre as fibras das peças interligadas é noventa graus.

As dimensões dos modelos não seguiram um padrão, ou seja, variaram em função do objetivo do ensaio e do diâmetro da cavilha. As dimensões para os modelos de compressão paralela tiveram uma maior variação; b variou entre 20 mm e 60 mm, h entre 70 mm e 180 mm e d dentre 40 mm e 120 mm. Para os demais tipos de modelos as dimensões estão apresentadas na fig. 16(b) e 16(c).

Desenvolveu-se, também, o estudo de emendas cavilhadas em peças fletidas. A descrição detalhada dos modelos empregados está contida no capítulo 11.

3.2 - Equipamentos e Ensaios

Os ensaios foram realizados no LaMEM empregando-se cilindros hidráulicos, anéis de carga, relógios comparadores e outros equipamentos auxiliares.

O sistema de ensaio para os modelos de ligação de peças solicitadas por compressão paralela ou perpendicular às fibras está ilustrado na fig. 17. Consiste de um cilindro hidráulico e de um anel dinamométrico. O sistema de apoio superior é articulado, sendo constituído por duas placas metálicas interligadas por uma esfera de aço encaixada em sulcos semi-esféricos existente nas chapas. A extremidade inferior do modelo é apoiada diretamente sobre o "prato" do cilindro hidráulico.

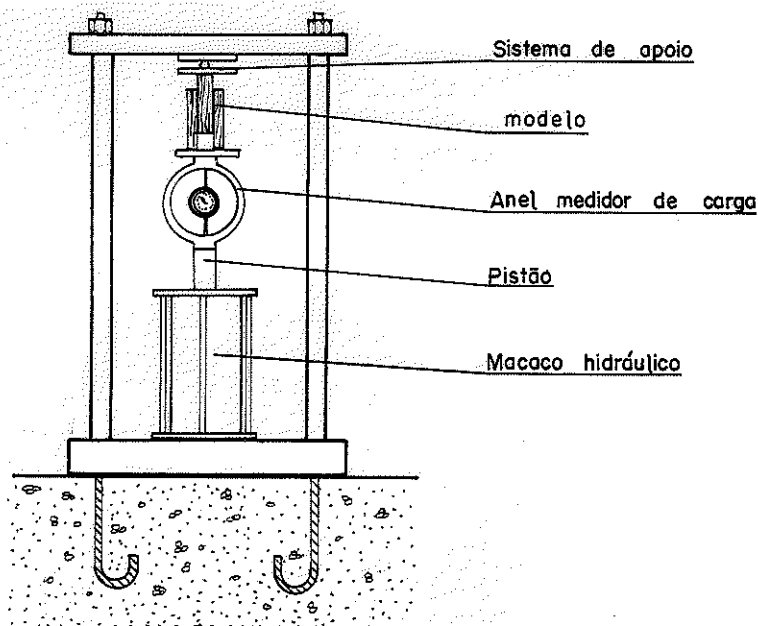


FIG. 17 - Dispositivo para ensaios de modelos

Nos ensaios, os modelos são cuidadosamente centralizados para evitar excentricidades em relação ao eixo longitudinal do cilindro, para se obter uma distribuição uniforme de carga nas cavilhas.

A aplicação da carga é gradativa até a ruptura, com leituras periódicas de deformação relativa entre as peças ligadas, através de relógios comparadores instalados nos modelos, conforme fig. 18, para ligação de peças na direção paralela às fibras.

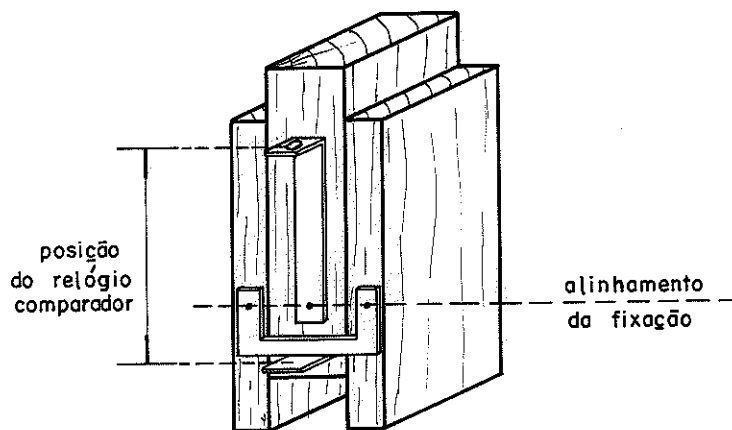


FIG. 18 - Fixação dos relógios comparadores nos modelos de ligações paralelas

Os relógios comparadores devem ser fixados segundo um mesmo alinhamento transversal. A leitura média assim obtida representa o deslocamento entre as peças, sem acréscimos por deformação da madeira interligada; observar os detalhes da fig. 18.

A fixação das peças de suporte dos relógios comparadores nos modelos solicitados por compressão perpendicular às fibras, está esquematizada na fig. 19.

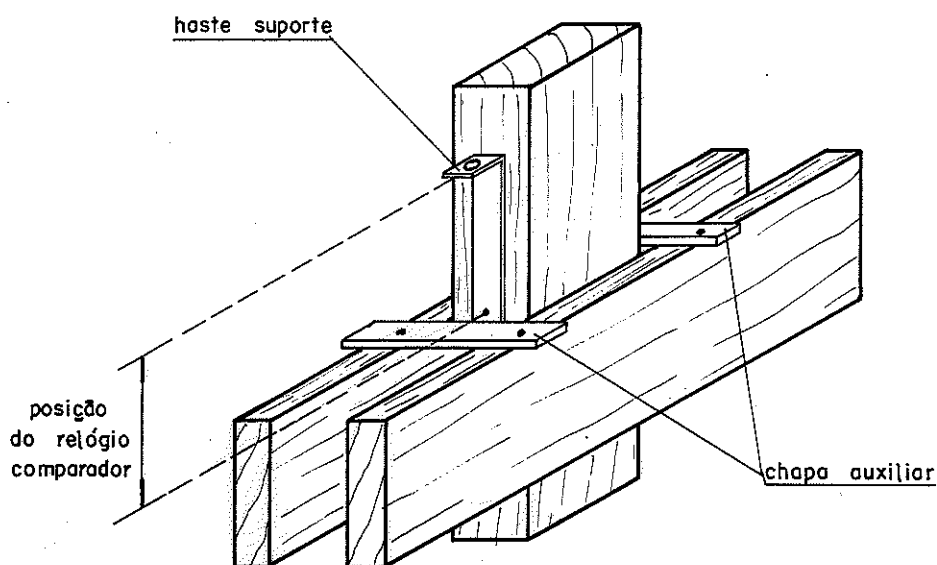


FIG. 19 - Fixação dos relógios comparadores nos modelos de ligações perpendiculares

A haste suporte do relógio comparador é fixada por um prego num ponto nivelado com a chapa auxiliar, permitindo a leitura dos deslocamentos relativos, conforme considerações anteriores.

Para maior representatividade dos deslocamentos as leituras são tomadas a partir dos dois relógios comparadores colocados em faces opostas dos modelos. Adota-se o valor médio das mesmas.

Para caracterização física e mecânica da madeira empregada em cada modelo, fez-se a determinação dos parâmetros correspondentes: tensão de ruptura na compressão paralela às fibras, unidade e densidade da madeira.

Estes parâmetros permitiram relacionar a capacidade resistente das ligações, em função das características do material da mesma, na forma de equações matemáticas.

4. - COMPORTAMENTO DA CAVILHA PARTIDA NA LIGAÇÃO CAVILHADA

Pretende-se neste capítulo fornecer subsídios para entendimento do comportamento e equacionamento da capacidade de carga da cavilha partida como elemento de ligação, frente às solicitações desenvolvidas durante as fases de carregamento, desde a carga inicial até a ruptura.

Para ligações com pequenas cargas (pequenas deformações) pode ser considerada válida a distribuição de tensões mostrada na fig. 20.

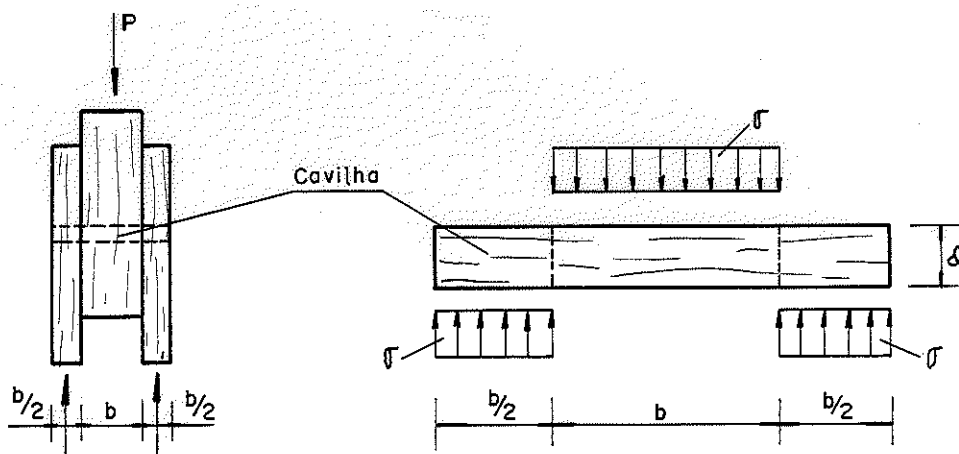


FIG. 20 - Distribuição de tensões sobre a cavilha infinitamente rígida

A transferência de esforços na ligação ocorre entre as peças interligadas e a cavilha. As peças interligadas são solicitadas na direção paralela às fibras, enquanto a cavilha é solicitada na direção perpendicular às fibras.

Considerando as características do material madeira, de menor resistência à solicitação perpendicular, a cavilha deverá ser de espécie de madeira mais resistente que a das peças interligadas, possibilitando uma equivalência entre as resistências perpendicular e paralela das espécies de madeira envolvidas na ligação.

4.1 - Cavilha Ideal

Para simplificar o estudo teórico e o entendimento do comportamento da cavilha, será admitido inicialmente, uma cavilha na forma ideal, ou seja, de rigidez infinita.

A fig. 21 ilustra a distribuição de tensões para o caso ideal - cavilha indeformada.

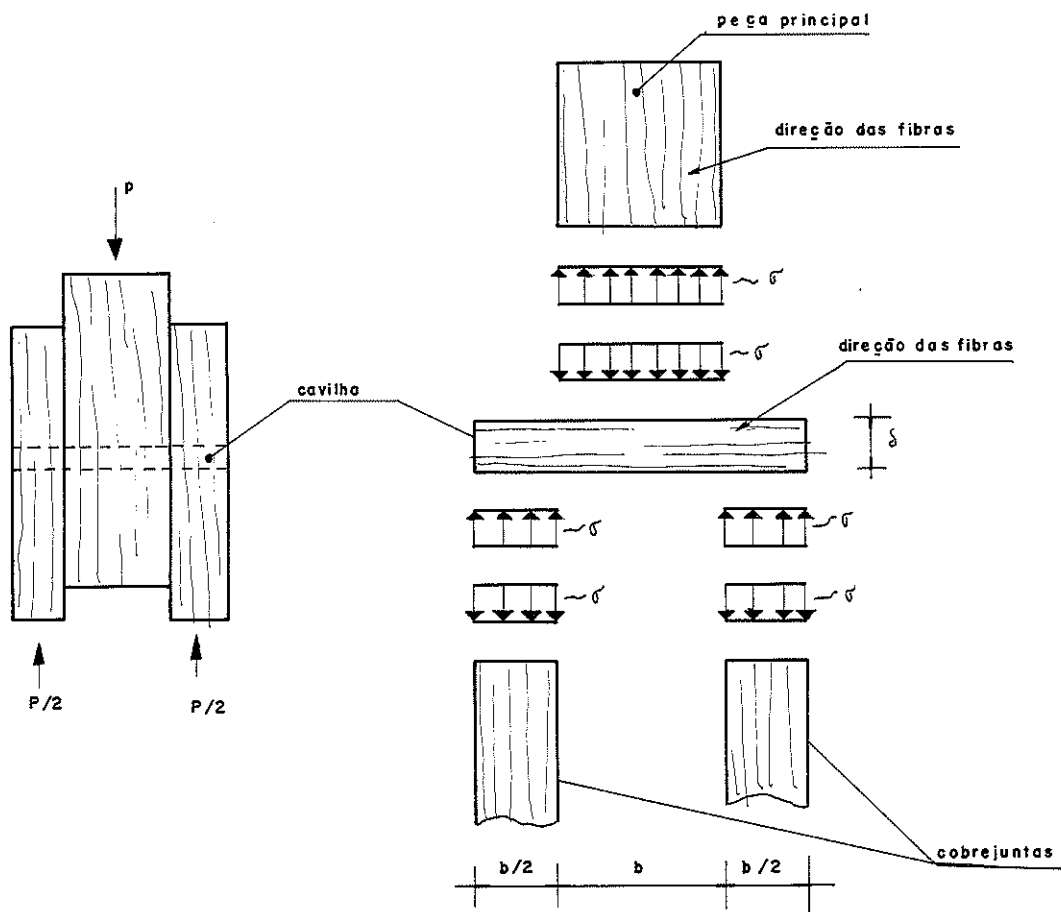


FIG. 21- Distribuição de tensões sobre a cavilha e as peças interligadas - caso ideal

Pela fig. 21, observa-se que a carga aplicada sobre uma cavilha é distribuída na área de contato, relativa à projeção da cavilha no comprimento b e largura δ . Assim sendo, a tensão σ é equivalente à carga P (carga de uma cavilha) dividida pela área $(b \cdot \delta)$, resultando: $\sigma = P / (b \cdot \delta)$.

Considerando válida a distribuição uniforme de tensões até a ruptura, a máxima tensão σ corresponderá à tensão de ruptura na compressão paralela às fibras (σ_c) da madeira interligada, ou à tensão de ruptura na compressão perpendicular às fibras (σ_n) da madeira da cavilha.

Sendo a cavilha, por hipótese inicial, um elemento indeformável, a ruptura da ligação ocorrerá na madeira das peças interligadas, resultando, portanto, $\sigma = \sigma_c$.

Chamando $P = P_i$, para designar carga de ruptura para o caso ideal (situação hipotética), obtem-se a partir da expressão de σ a equação (1).

$$P_i = b \cdot \delta \cdot \sigma_c \dots\dots\dots (1)$$

4.2 - Cavilha Real

No caso real a cavilha é um material deformável. A forma retilínea da cavilha é mantida apenas num estágio inicial do carregamento. Acréscimos sucessivos de carga afetarão a conformação inicial da cavilha, fazendo surgir concentração de tensões nas interfaces das peças interligadas, fig. 22 e 23, tornando a distribuição de tensões ao longo da cavilha menos uniforme.

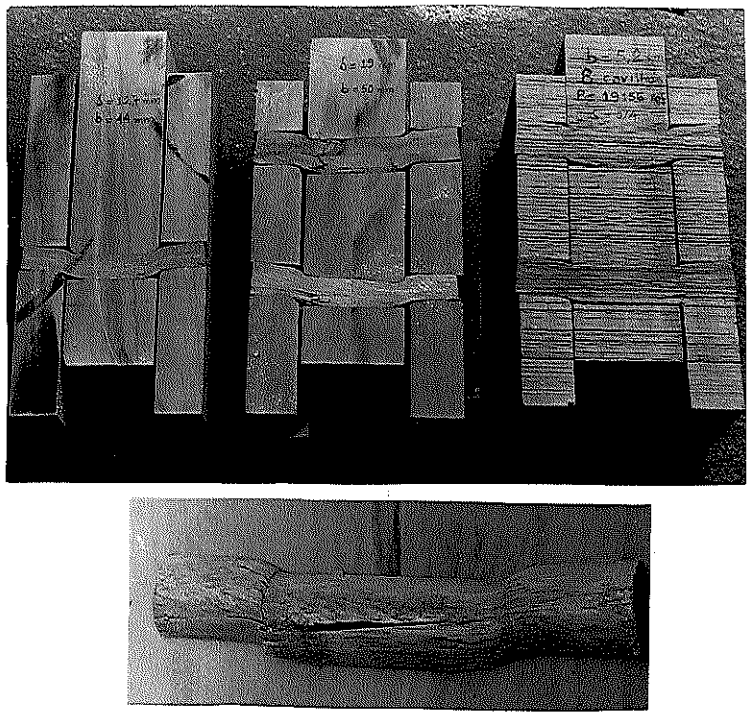


FIG.22-Aspecto final da cavilha na ruptura

tensões mais uniforme, com pontos de concentração atenuados. O efeito desfavorável da flexão na cavilha é menos influente.

A cavilha pode ser comparada à uma viga sobre apoio elástico, na qual atuam esforços de momento fletor, força cortante e compressão perpendicular às fibras.

Obviamente, pelo princípio da ação e reação, a cavilha aplicará seu carregamento sobre o apoio elástico, no caso, a madeira da ligação.

Em síntese, a rigidez da ligação depende dos vários parâmetros citados: diâmetro (δ), espessura das peças interligadas (b) e tensão de ruptura à compressão (σ) das madeiras envolvidas na ligação. Indiretamente, estão relacionadas à capacidade de carga da ligação os parâmetros umidade, densidade e deformações, representados pela resistência mecânica (σ) das madeiras.

Para quantificar analiticamente a ruptura de uma ligação cavilhada, o capítulo 5, item 5.2.2, apresenta o tratamento estatístico empregado na obtenção das equações de cálculo, considerando a equação (1) como básica.

Assim sendo, os parâmetros influentes na capacidade de carga da cavilha real, efetivamente são os mesmos da cavilha indeformável (hipotética).

É oportuno lembrar que a tensão na compressão perpendicular às fibras da madeira da cavilha tem influência na capacidade de carga da ligação. Porém considerando a inexistência de uma ruptura perfeitamente definida, para solicitações perpendiculares na madeira¹², a NB-11 adota a tensão de compressão perpendicular às fibras em função da compressão paralela às fibras. A aplicação de carga perpendicular é ilimitada, porém as deformações são excessivas.

Omitiu-se este parâmetro (tensão de compressão perpendicular da madeira da cavilha) na equação real de cálculo, pelo fato de ter sido estudada somente cavilhas de uma espécie de madeira: o Eucalipto Citriodora. Assim, esta influência é constante, sendo representada pelo parâmetro k (ver equação 2 - item 5.2.2.1).

Quanto às deformações ou deslocamentos relativos entre as peças ligadas, observou-se que são significativas em presença das recomendações da NB-11, como pode ser visto no item 5.2.1.

Enfim, a equação 1, tornou-se básica para o equacionamento geral, deixando apenas de ter os parâmetros envolvidos uma variação linear, como será visto no item 5.2.2.1.

5. - LIGAÇÃO DE PEÇAS DE PEROBA ROSA SOLICITADAS POR COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS

Este tipo de ligação foi tomado como básico para o desenvolvimento de toda pesquisa desenvolvida, por ser de características mais gerais e de execução (ensaio) mais fácil.

Os primeiros ensaios, com peças de Peroba Rosa, objetivaram o conhecimento do comportamento das ligações cavilhadas com base nas considerações expostas no capítulo 4.

Para eliminar a possibilidade de redução da capacidade da ligação por efeito de espaçamentos insuficientes entre cavilhas, empregaram-se modelos utilizando apenas uma cavilha.

O conhecimento inicial do comportamento da ligação cavilhada, conduziu à idealização de novos ensaios, variando o diâmetro, o número de cavilhas e a espessura das peças interligadas.

Esta primeira série constou de 58 modelos. As dimensões, características gerais e capacidade de carga das cavilhas são apresentados em anexo.

A partir destes resultados, antes de uma análise definitiva, elaborou-se um esquema complementar de ensaios para um estudo mais abrangente das ligações cavilhadas, como se descreve no próximo item.

5.1 - Experimentação

Os ensaios desenvolvidos foram esquematizados para simular no laboratório as condições de uso, baseado nas características inerentes às estruturas de madeira¹³. Os modelos tiveram suas dimensões próximas das bitolas comerciais das peças de madeira encontradas nas serrarias, portanto em escala natural, fig. 24.

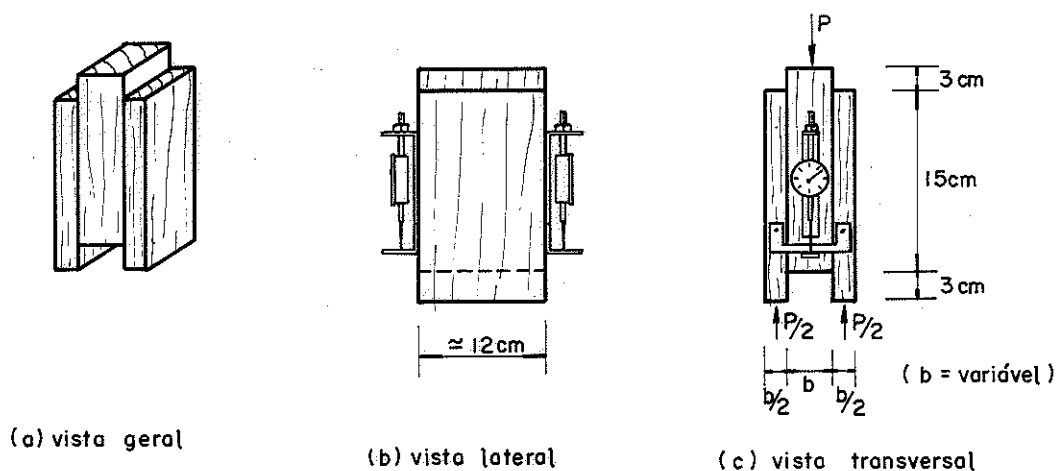


FIG. 24 - Modelo para ensaios de compressão paralela às fibras

Leituras sucessivas de cargas e de deslocamentos, através de medidores de carga e de relógios comparadores, permitiram a análise do comportamento das cavilhas durante o carregamento, conforme gráficos 1 a 10, vistos adiante.

Procurou-se com estes ensaios abranger um intervalo de variação significativo para os parâmetros considerados influentes na capacidade de carga da ligação cavilhada.

Ensaaiaram-se nesta fase, mais 54 modelos de Peroba Rosa, seguindo um esquema planejado para incluir várias situações distintas. Teve-se o intuito de conseguir variação de umidade e de densidade, mais ampla e representativa.

Para a preparação destes modelos foram escolhidas 6 vigas de Peroba rosa de características diferentes, através de ensaios não destrutivos, na tentativa de abranger o inteiro intervalo de variação de densidade da Peroba Rosa. Cada viga foi dividida em três partes como é indicada na fig. 25.

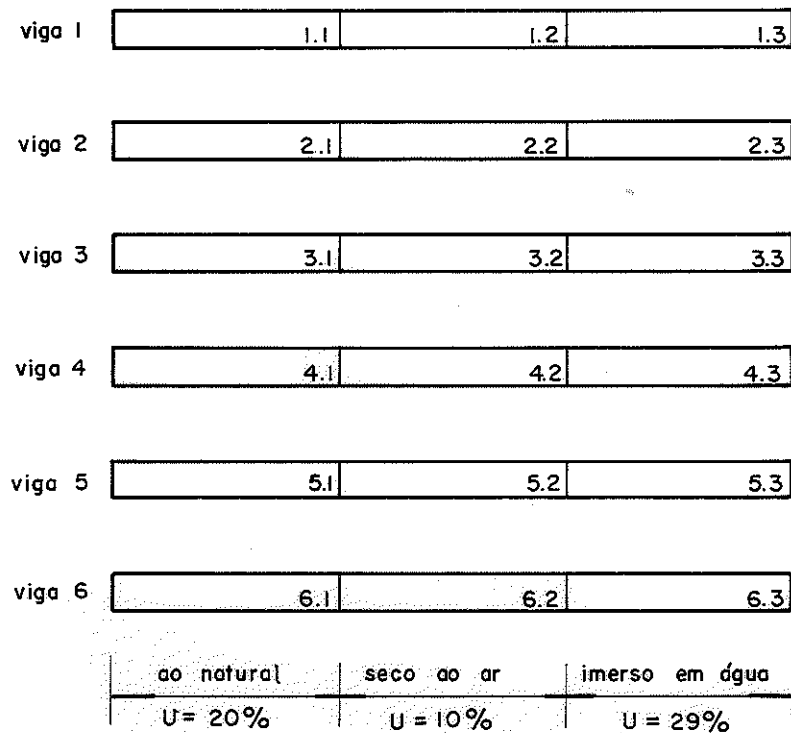


FIG.25 - Esquema de obtenção dos modelos para diferentes umidades e densidades

Cada uma das três partes foi identificada por dois algarismos: i, j (viga i, parte j). Cada parte, foi subdividida em três, na forma de modelos para ensaio de cavilhas de três diâmetros: 12,7 mm, 19,0 mm e 25,4 mm. Ainda, de cada parte, retiraram-se corpos de prova para caracterização física e mecânica da madeira empregada nas ligações.

A parte 1 de todas as vigas foi ensaiada logo após a montagem dos modelos representando a condição natural das vigas, com umidade média em torno de 20%.

Os modelos retirados da parte 2 foram deixados ao ar, em ambiente seco e quente, durante 45 dias. A umidade média final foi aproximadamente 10%.

Para representar a condição de umidade elevada os modelos da parte 3, foram imersos em água durante 20 dias, atingindo a umidade média de 29%.

Nos modelos desta série de ensaio empregaram-se 4 cavilhas. A espessura (b) das peças variou: 20 mm, 40 mm e

60 mm, e também os diâmetros correspondentes: 12,7 mm, 19,0 mm e 25,4 mm.

Desta forma, obteve-se ampla representatividade das dimensões e das características físicas e mecânicas da madeira.

Em anexo são apresentadas as características gerais desta série de ensaios.

5.2 - Análise dos Resultados

5.2.1 - Carga Admissível

Os gráficos 1 a 10 exemplificam o comportamento da ligação cavilhada, através da média dos resultados de alguns tipos de modelos ensaiados. Relacionam a carga aplicada na ligação e o deslocamento relativo entre as peças ligadas.

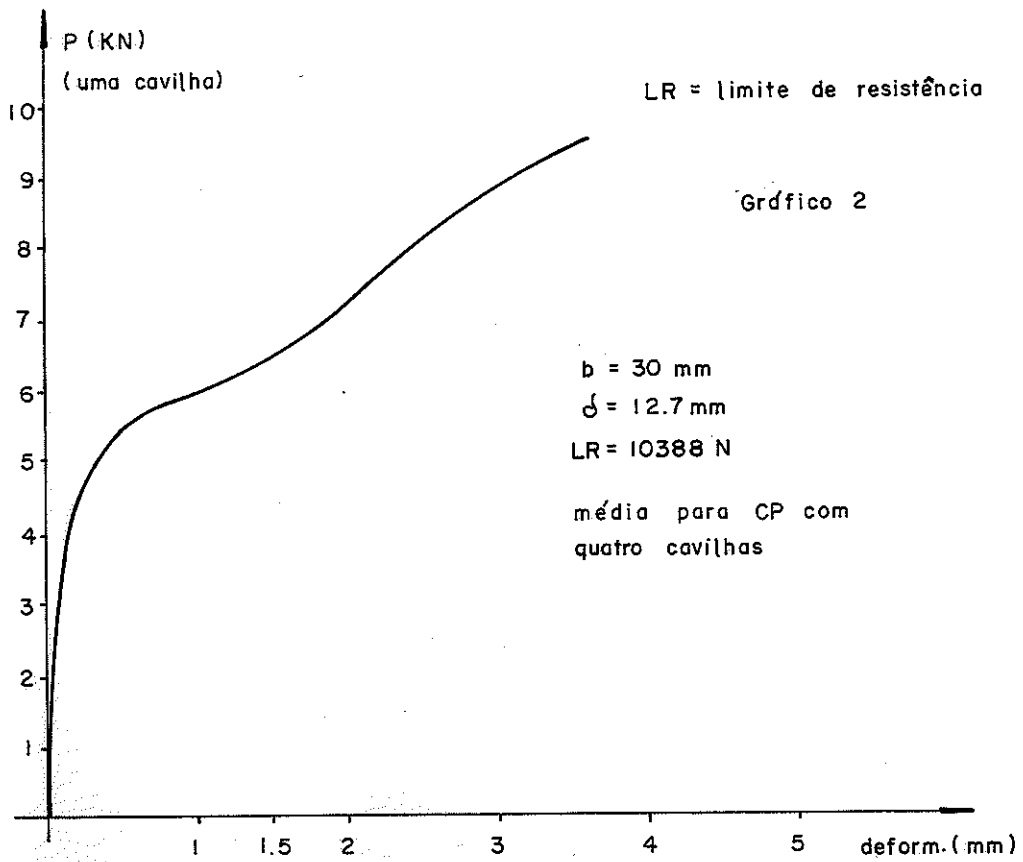
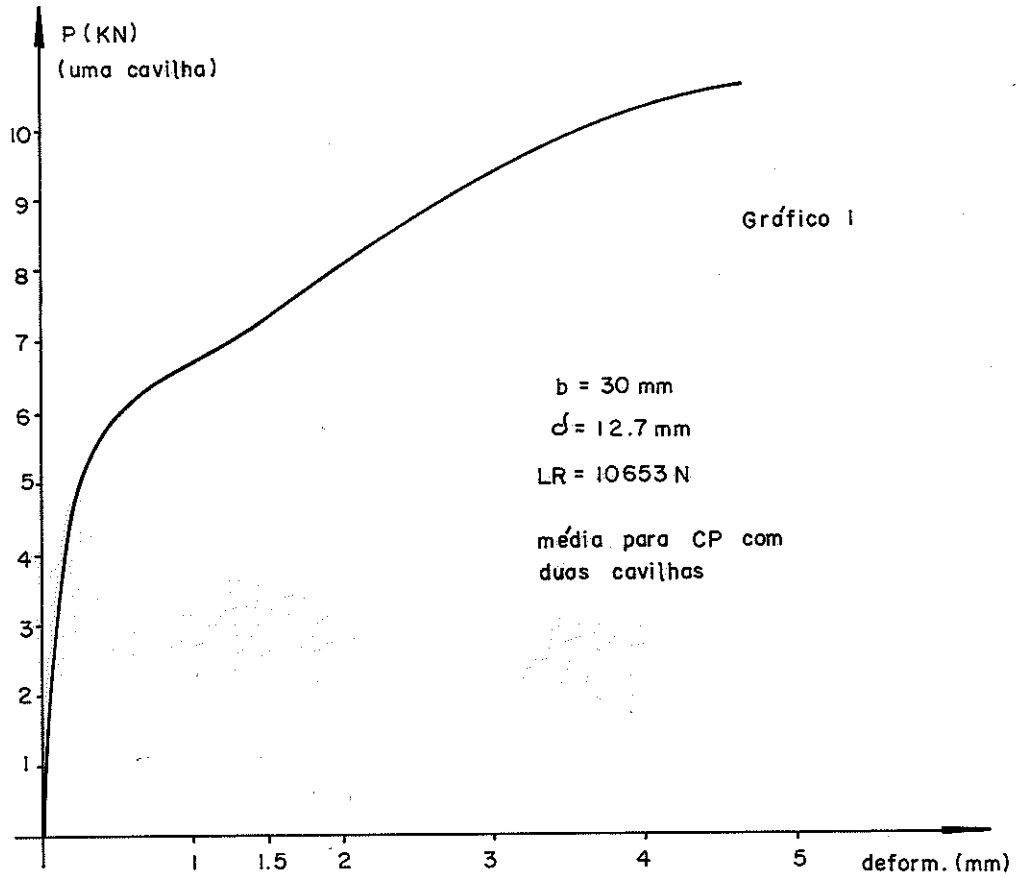
Os máximos deslocamentos relativos lidos nos ensaios são da ordem de 5,0 mm. Em alguns casos, gráficos 1, 2, 4 e 6, conseguiram-se leituras, revelando o comportamento quase completo da ligação - da carga inicial à carga máxima, no limite de resistência.

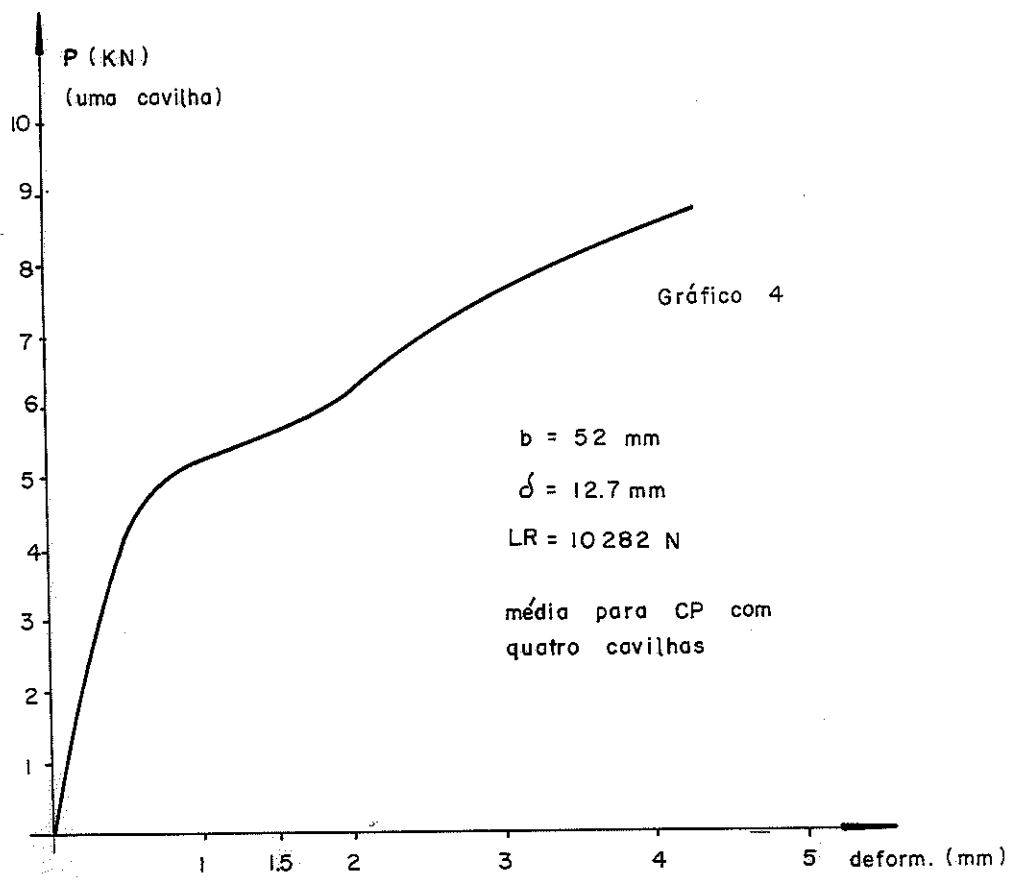
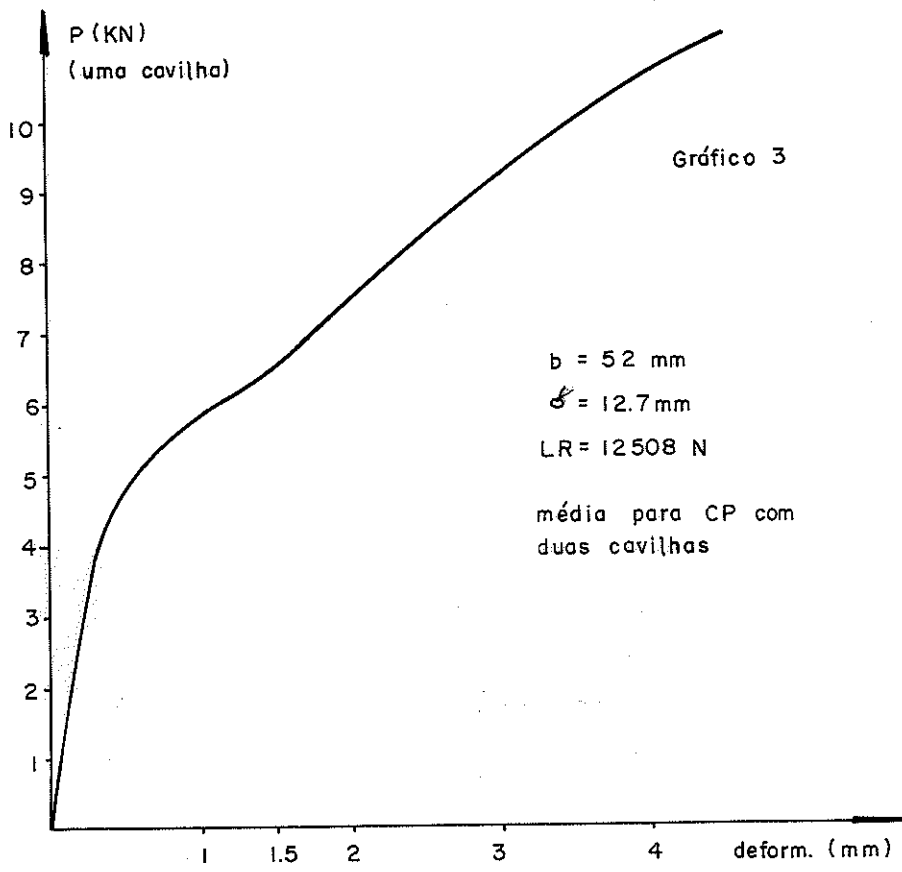
As leituras finais são mais difíceis, por se tratar de ensaios destrutivos. Retiram-se os relógios comparadores antes da ruína, para resguardá-los de possíveis danos.

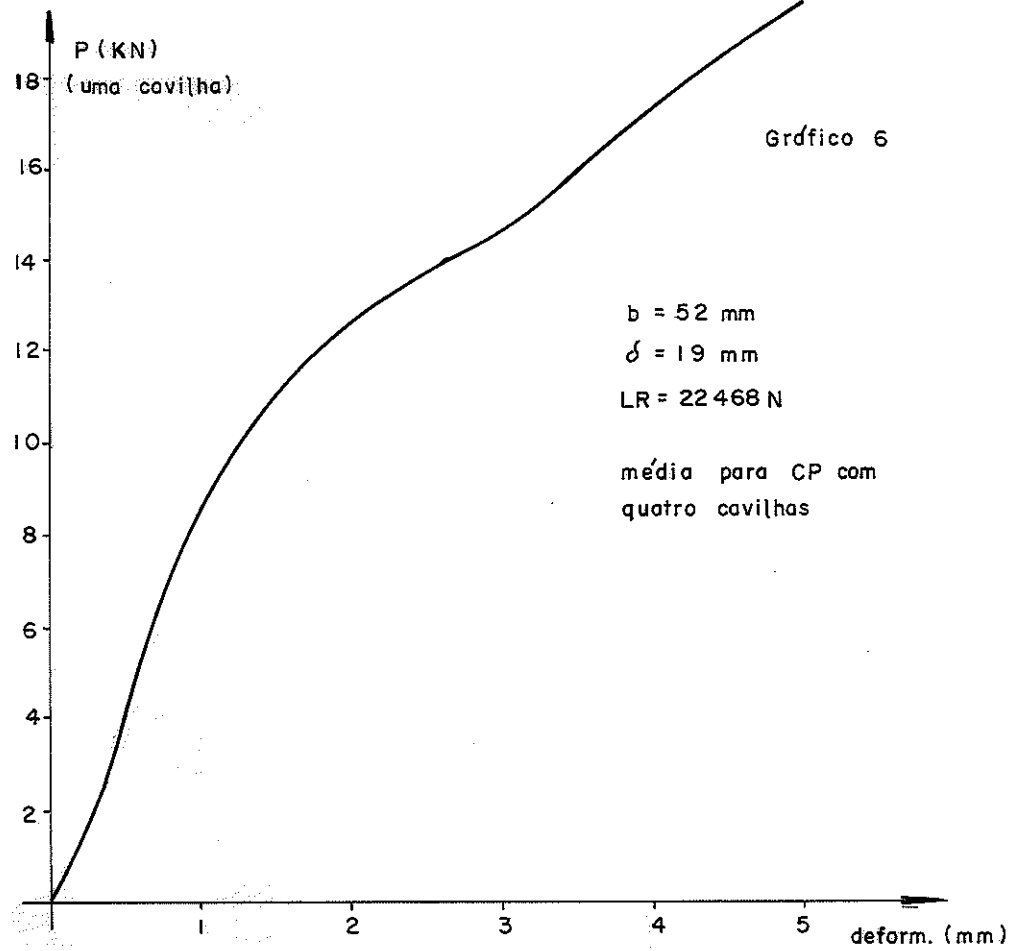
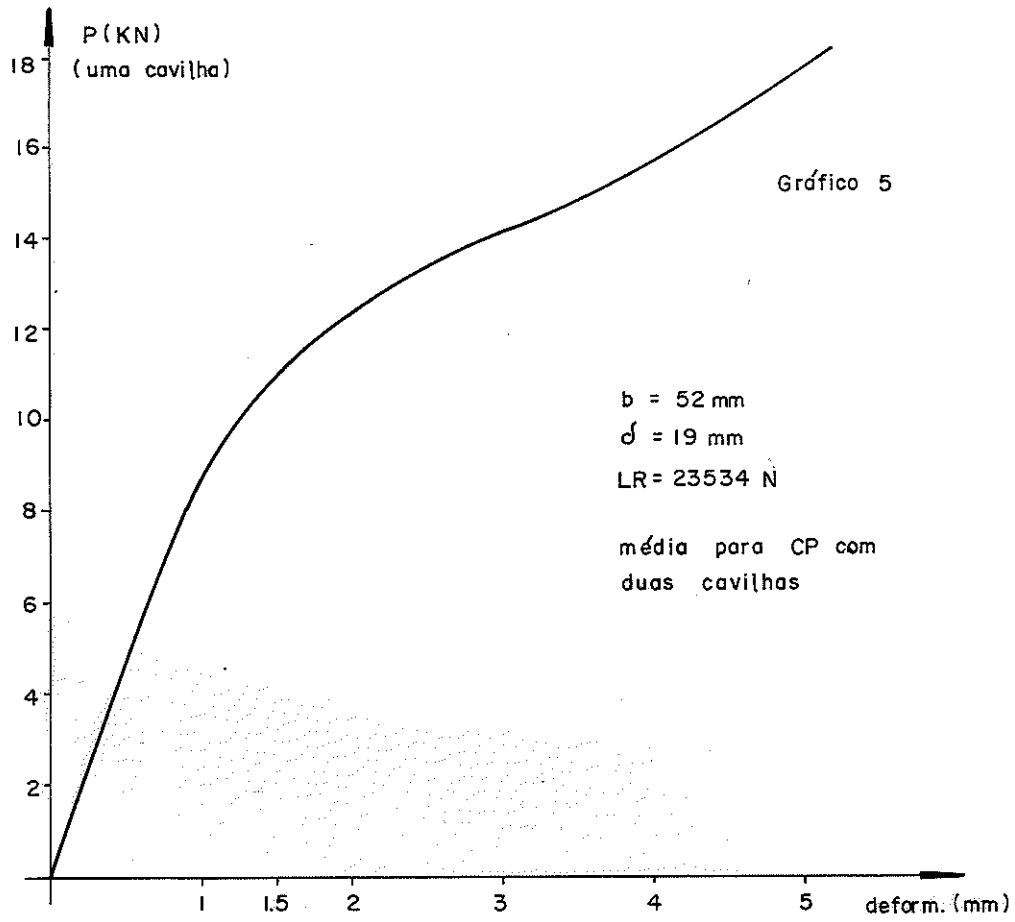
Observa-se, através dos gráficos, um comportamento semelhante para quaisquer ligações, independentemente da espessura das peças e do diâmetro da cavilha.

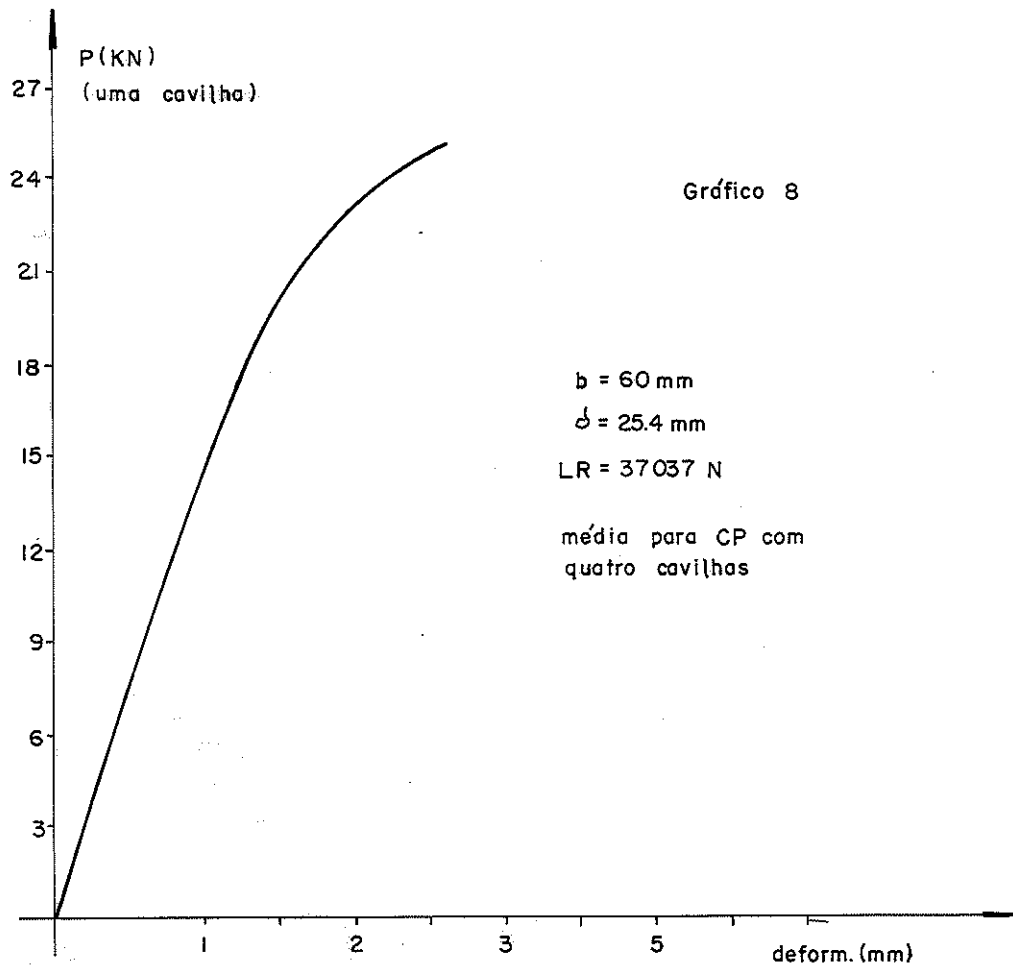
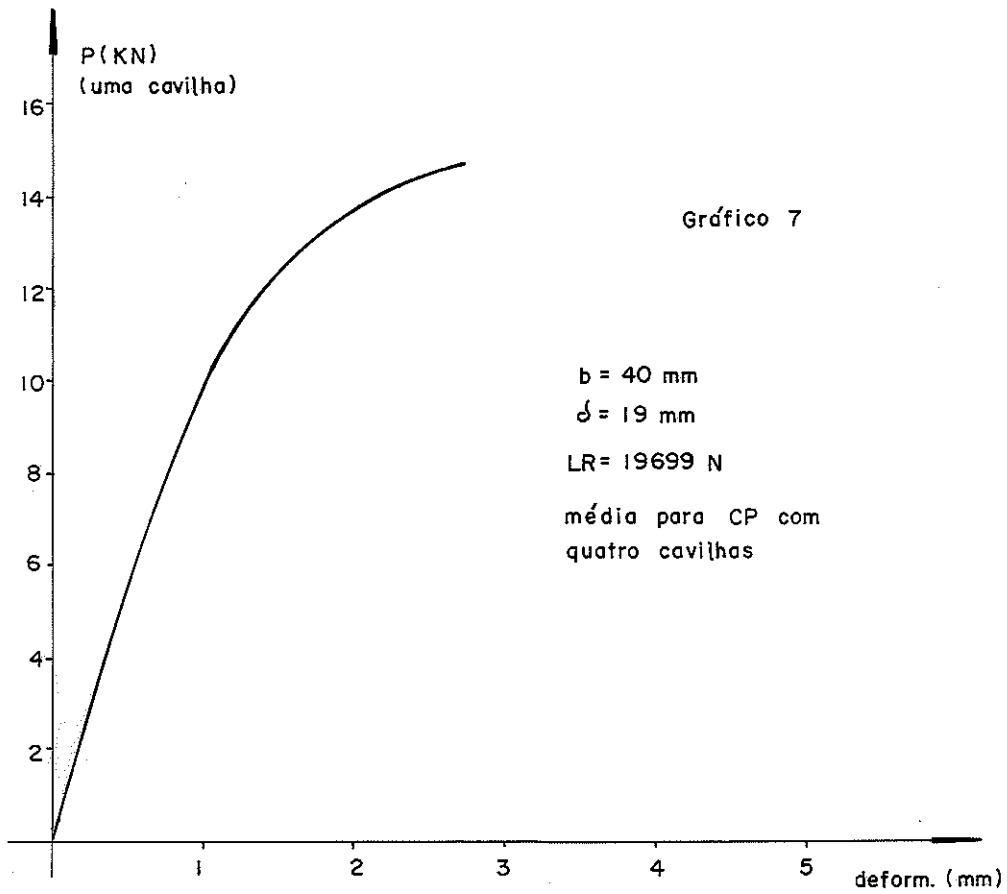
O comportamento geral compreende um trecho inicial reto. Acréscimos de carga provocam maiores deslocamentos relativos, passando para um intervalo ligeiramente curvo, até atingir um patamar com algumas oscilações. A partir deste patamar surge novo trecho com tendência à reta.

Em outras palavras, existe um trecho inicial em regime elástico até a plastificação, definida por uma mudança de inclinação. Há também, uma espécie de patamar após a mudança de inclinação. Posteriormente, existe um novo regime (plástico) até ocorrer a ruptura.









Segundo recomendação da NB-11, item 66(a), a força admissível da ligação deve ser igual ao menor dos valores:

- i) 50% do limite de proporcionalidade
- ii) 20% do limite de resistência
- iii) força correspondente ao deslocamento relativo entre as peças ligadas de 1,5 mm.

A condição (iii) é a mais favorável. O deslocamento relativo de 1,5 mm sempre ocorre quando a ligação está em regime plástico, para cargas superiores a 50% do limite de resistência.

A condição (i) é de difícil caracterização pois o início da plastificação situa-se num intervalo de carregamento, sem um ponto definido.

A condição (ii), 20% do limite de resistência, é perfeitamente caracterizada. Considerou-se como o critério mais representativo para a definição a carga admissível de uma cavilha.

Assim sendo a carga admissível nas ligações cavilha - das será assumida como:

$$\bar{P}_p = 0,2 \cdot P_p$$

sendo \bar{P}_p a carga admissível e P_p a carga de ruptura.

5.2.2 - Capacidade de Carga de uma Cavilha

5.2.2.1 - Representação Analítica

A capacidade de carga de uma cavilha foi estabelecida em função dos parâmetros b , δ e σ_c , através de análise estatística.

O modelo estatístico empregado foi a regressão linear múltipla, com auxílio do programa REGRE¹⁵ para o computador IBM-1130.

O programa fornece diversas informações (médias, desvios padrões, coeficientes de regressão, correlação, etc), permitindo estabelecer a tendência do conjunto de dados, com ajuste a uma função representativa.

Foram testadas 28 funções para representar os dados. Obtiveram-se resultados satisfatórios, com coeficiente de correlação 0,972.

A função básica é a equação (1) $\rightarrow P = b \cdot \delta \cdot \sigma_c$, da cavilha ideal, com uma variável dependente (P) e três independentes (b , δ e σ_c).

Outras variáveis relacionadas com o material da cavilha Eucalipto Citriodora, poderiam ter sido incluída na equação. Tratando-se, entretanto de um material de características praticamente constantes, existirá uma constante (k) respondendo por estas características.

A umidade e a densidade, também, poderiam ser incluídas nesta equação, mas, a tensão de compressão é função destes parâmetros, representando-os na equação. Estabeleceu-se, mais adiante esta dependência, com a equação (4), tendo a tensão (σ_c) em função da umidade (U) e da densidade (γ).

A função mais representativa foi encontrada pela técnica de aplicação de logaritmos à equação dada, e posterior ajuste, por regressão linear, a uma reta cujas variáveis são logaritimos.

Este procedimento é bastante citado na literatura^{26, 27}. Para maiores esclarecimentos, explana-se esta técnica a seguir.

Aplicando-se logaritmos aos dois membros da equação (1) e usando as propriedades matemáticas adequadas obtém-se:

$$\underbrace{\log P}_Y = \underbrace{\log b}_{x_1} + \underbrace{\log \delta}_{x_2} + \underbrace{\log \sigma_c}_{x_3}$$

Então, a regressão linear múltipla é aplicada aos logaritmos das variáveis. Daí resulta uma equação do tipo:

$$y = k' + m \cdot x_1 + n \cdot x_2 + p \cdot x_3$$

Voltando à forma inicial (logarítmica), pode-se escrever a equação:

$$\log P = \log k' + \log b^m + \log \delta^n + \log \sigma^p$$

Chegando-se finalmente, a uma expressão do tipo:

$$P = k \cdot b^m \cdot \delta^n \cdot \sigma^p \dots\dots\dots (2)$$

Este tipo de equação representa mais fielmente a capacidade de carga de uma cavilha.

A equação (3) fornece a capacidade de carga admissível (\bar{P}_p) para uma cavilha nas ligações submetidas à compressão paralela. O valor da constante k obtido na análise estatística foi

20,2, mas considerando o coeficiente de segurança igual a 5, definido no item 5.2.1, inclui-se a redução na própria constante k , resultando o valor 4,0.

Salienta-se, ainda, cuidados à atribuição dos valores da tensão σ_c . Embora a carga determinada pela equação (3) seja admissível, a tensão σ_c utilizada é a de ruptura.

As unidades empregadas devem pertencer ao Sistema Internacional. Usam-se as seguintes unidades: $[P] = N$, $[b] = mm$, $[\delta] = mm$ e $[\sigma_c] = MPa$.

Para caracterizar a capacidade de carga nas ligações paralelas coloca-se a letra minúscula "p".

A análise de regressão utilizando os resultados experimentais obtidos nos ensaios com os 112 corpos de prova mencionados na sua última versão, apresentou a listagem mostrada na página 38, na qual os logarítimos das variáveis P_p , b , δ e σ_c são representados pelos números 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

A partir destes resultados pode-se escrever a equação (3).

$$\bar{P}_p = 4,0 \cdot b^{0,39} \cdot \delta^{1,51} \cdot \sigma_c^{0,28} \dots\dots\dots (3)$$

Os parâmetros estatísticos inerentes à esta equação são:

nº de dados = 112

correlação múltipla = 0,972

erro padrão da estimativa = 11%

valor de F = 616 - altamente significativa

MULTIPLE REGRESSION.....CAVILH
SELECTION..... 1

VARIABLE NO.	MEAN	STANDARD DEVIATION	CORRELATION X VS Y	REGRESSION COEFFICIENT	STD. ERROR OF REG. COEF.	COMPUTED T VALUE
2	1.57399	0.14788	0.68528	0.38600	0.03548	10.87811
3	1.20321	0.10807	0.93032	1.50997	0.05185	29.11844
4	1.66054	0.06206	-0.19827	0.28113	0.07909	3.55436

DEPENDENT

1	4.19691	0.19843
---	---------	---------

INTERCEPT 1.30567
MULTIPLE CORRELATION 0.97200
STD. ERROR OF ESTIMATE 0.04726

$$\log P_p = 1,306 + 1,51 \log \delta + 0,39 \log b + 0,28 \log \sigma_c$$

$$\therefore P_p = 20,2 \cdot b^{0,39} \cdot \delta^{1,51} \cdot \sigma_c^{0,28}$$

ANALYSIS OF VARIANCE FOR THE REGRESSION

SOURCE OF VARIATION	DEGRESS OF FREEDOM	SUM OF SQUARES	MEAN SQUARES	F VALUE
ATTRIBUTABLE TO REGRESSION	3	4.12931	1.37643	
DEVIATION FROM REGRESSION	108	0.24125	0.00223	616.17248
TOTAL	111	4.37056		

A existência de uma equação generalizada, independente da relação b/δ , evidencia um comportamento uniforme das cavilhas, como representado na fig. 26(a). Este comportamento distingue-se do comportamento dos parafusos, fig. 26(b), apresentados na NB-11¹ e por LUCHESE e STAMATO¹⁷.

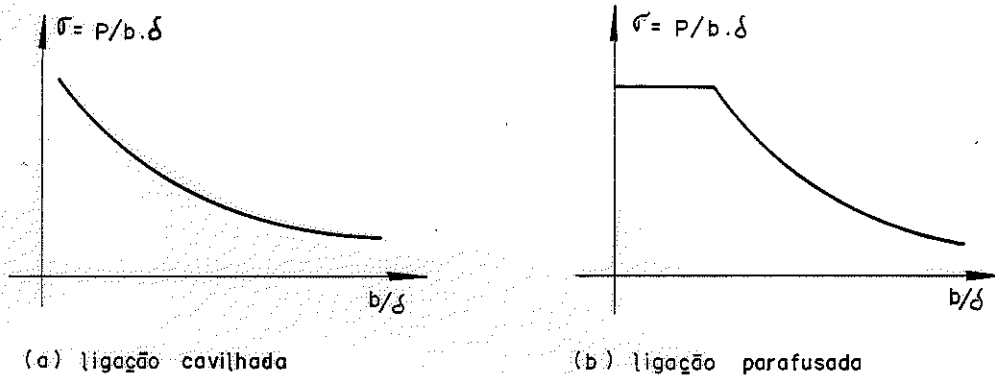


FIG. 25 - Gráficos : $(P/b.\delta) \times (b/\delta)$

Observa-se para os parafusos, um patamar inicial no qual a ruptura da ligação ocorre por esmagamento da madeira, como se não houvesse deformação do parafuso (infinitamente rígido). Para relações b/δ maiores, o comportamento se modifica pela influência da deformação do parafuso.

Consequentemente, o cálculo da capacidade do parafuso depende da relação b/δ , resultando equações de cálculo distintas para as duas situações.

No caso das cavilhas, o comportamento uniforme evidencia a influência da deformação da cavilha na ruptura, independentemente do valor b/δ .

Como foi dito em parágrafos anteriores, estabeleceu-se a dependência da tensão (σ_c) em função da umidade (U) e da densidade (γ).

O procedimento estatístico foi idêntico ao aplicado para relacionar a capacidade de carga de uma cavilha.

Os coeficientes de correlação obtidos não foram plenamente satisfatórios, como obteve HELLMMEISTER¹² em pesquisa mais

específica. Entretanto, foi o melhor ajuste conseguido e representativo da madeira pesquisada, equação (4).

As unidades, de acordo com o Sistema Internacional de Unidades, são: $[\sigma_c] = \text{MPa}$, $[\gamma] = \text{g/cm}^3$ e a umidade (U) em porcentagem.

$$\sigma_c = 275 \cdot \gamma^{0,97} \cdot U^{-0,58} \dots\dots\dots (4)$$

Os parâmetros estatístico obtidos foram:

- nº de dados = 50
- correlação múltipla = 0,785
- erro padrão da estimativa = 10%
- valor de F = 38

5.2.2.2 - Representação Gráfica

A equação (3), a quatro variáveis, é de difícil representação gráfica.

A montagem de diagrama representativo deve ser efetuada por partes.

Dividiu-se a equação (3) $\bar{P}_p = 4,0 \cdot b^{0,39} \cdot \delta^{1,51} \cdot \sigma_c^{0,28}$ em duas partes, atribuindo a multiplicação $(b^{0,39} \cdot \delta^{1,51})$ a uma nova variável chamada de S_c . Ficou-se, portanto com a expressão:

$$\bar{P}_p = (4,0 \cdot \sigma_c^{0,28}) \cdot S_c$$

Tomando-se o conjunto de valores $S_c = b^{0,39} \cdot \delta^{1,51}$, é possível sua representação gráfica independentemente das demais variáveis, obtendo-se o diagrama da fig. 27.

Os valores de S_c , designado como área corrigida, representa uma área de contacto da cavilha com a peça ligada, hipotética, corrigida pelos coeficientes $n = 0,39$ e $m = 1,51$. É portanto, uma área ideal para absorver os esforços aplicados na ligação.

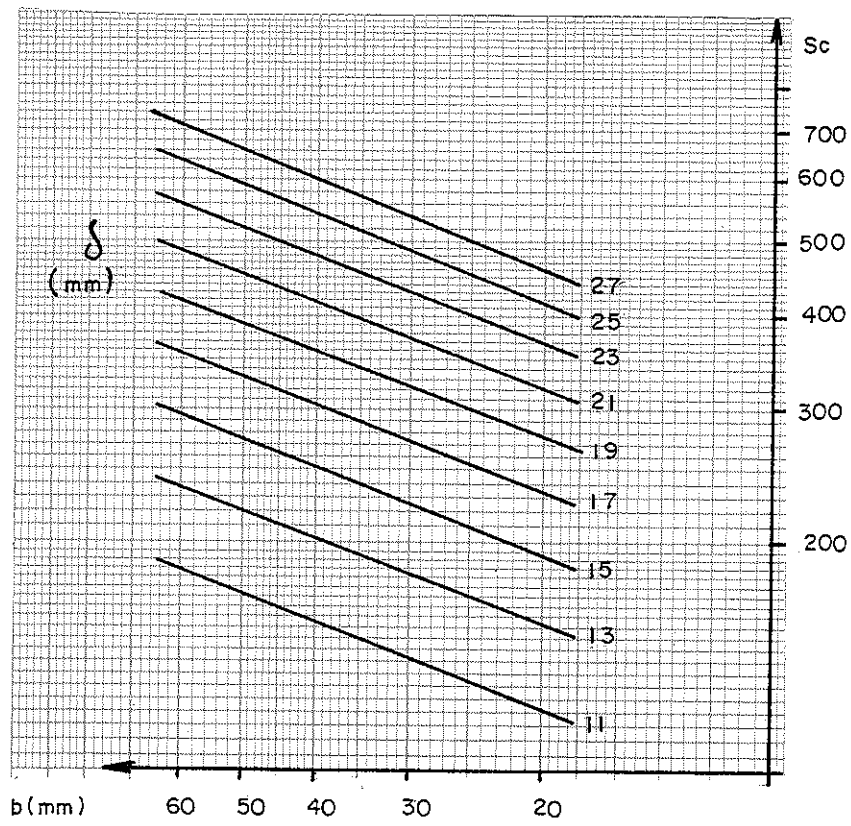


FIG. 27 - Diagrama $Sc = f(b, \delta)$

Os valores da tensão σ_c em função da umidade (U) e da densidade (γ) - equação (4), também podem ser representados grãfi camente como apresentado na fig. 28.

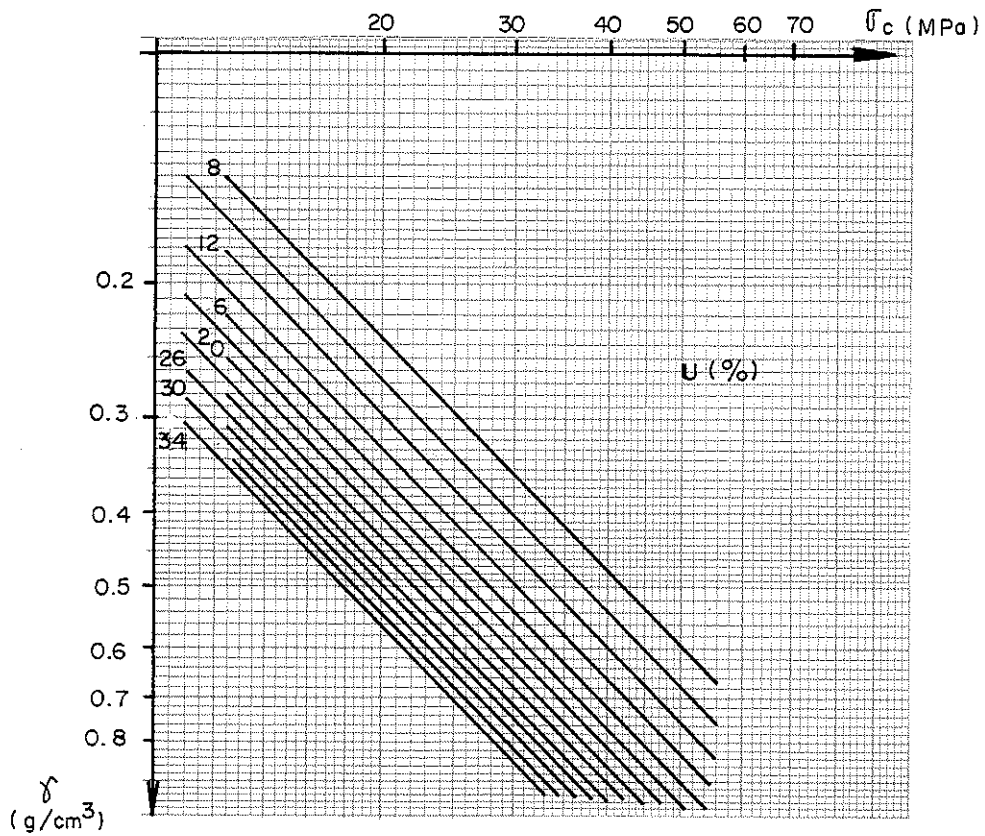


FIG. 28 - Diagrama $\sigma_c = f(\gamma, U)$

Considerando-se estes dois diagramas, idealizou-se a montagem do diagrama apresentado na fig. 29. Intercalou-se um novo diagrama para representar a equação (3). Resultou um diagrama com as informações úteis para dimensionamento da capacidade de uma cavilha.

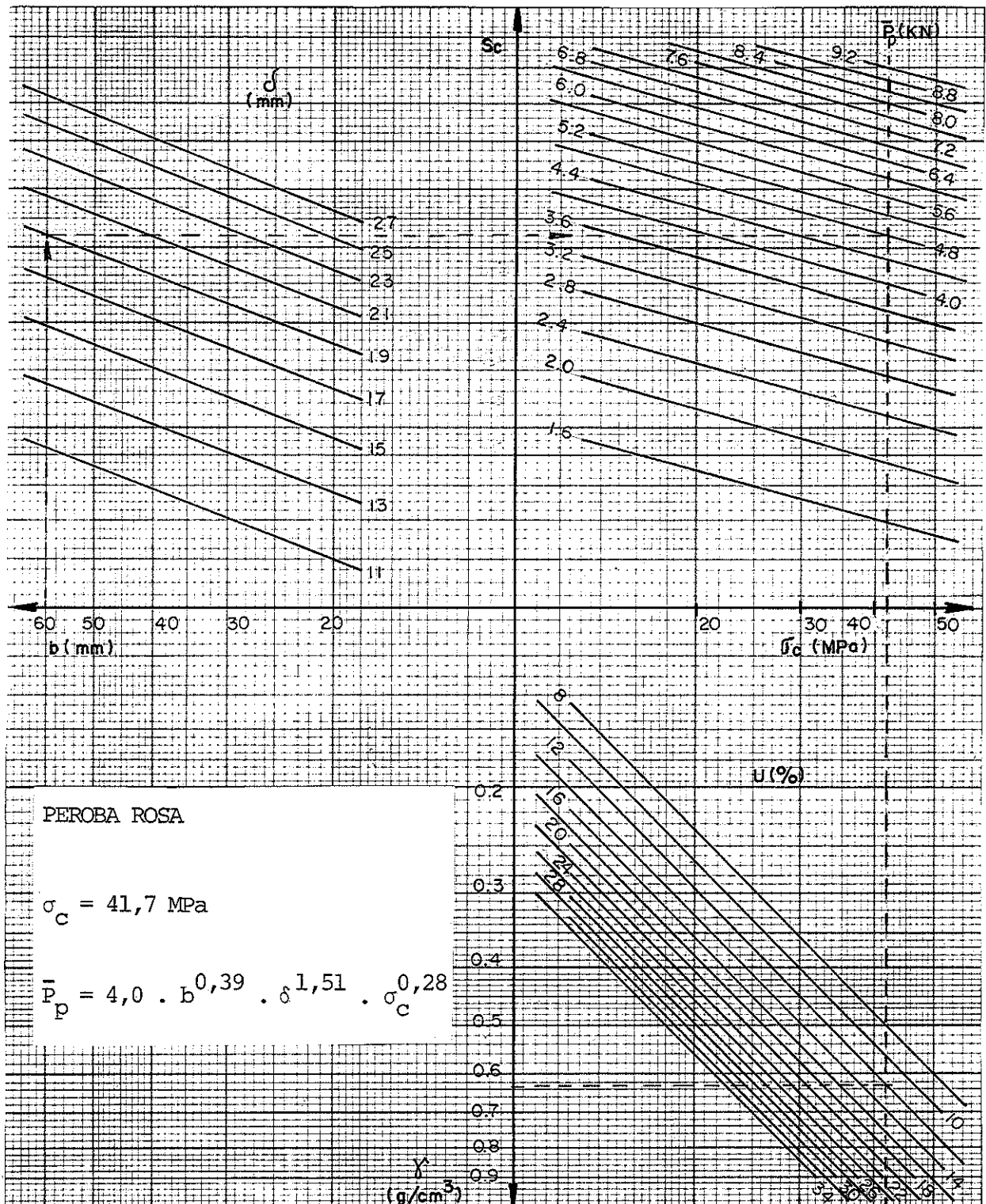


FIG. 29 - Diagrama para ligações cavilhadas solicitadas paralelamente às fibras

O valor procurado poderá ser qualquer das variáveis. O diagrama sempre é válido, independente do sentido da procura da incógnita.

As linhas tracejadas da fig. 29, exemplificam a utilização do diagrama. As setas mostram o sentido das linhas tracejadas em busca do valor procurado.

Por exemplo, tendo-se uma ligação com peças de Peroba Rosa solicitadas por compressão paralela às fibras, com $b = 60$ mm $\delta = 19$ mm, é imediato conhecer o valor da máxima carga admissível para uma cavilha. A tensão (σ_c) de ruptura na compressão paralela da Peroba Rosa, segundo a NB-11, é 41,7 MPa (425 kgf/cm²).

Partindo-se do valor $b = 60$ mm, tem-se o encontro com a reta definida para $\delta = 19$ mm (1º quadrante). A linha tracejada representa o lugar geométrico da carga \bar{P}_p . No encontro com a linha vertical passando por σ_c estará o valor de $\bar{P}_p = 4800$ N (valor procurado).

Com o auxílio do 3º quadrante pode-se conhecer as características da madeira empregada na ligação. Supondo a umidade de 12%, encontrar-se-á:

$$\gamma = 0,63 \text{ g/cm}^3$$

Não há necessidade do conhecimento do valor de S_c . É apenas uma informação complementar.

6. - LIGAÇÃO DE PEÇAS DE PEROBA ROSA SOLICITADAS POR COMPRESSÃO NORMAL ÀS FIBRAS

6.1 - Experimentação

O tipo de modelo utilizado está ilustrado na fig.30.

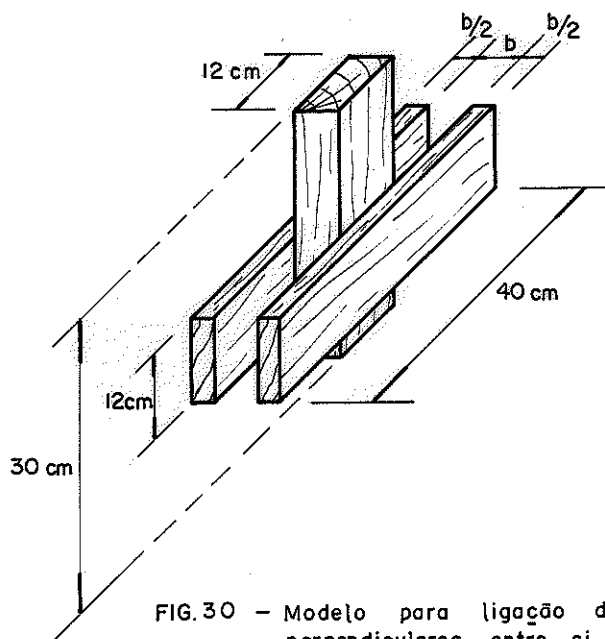


FIG.30 - Modelo para ligação de peças perpendiculares entre si

Ensaíram-se 25 modelos idênticos ao da figura 30. , com variação do número, diâmetro das cavilhas e espessura das peças enterligadas.

Os diâmetros considerados foram de 12,7 mm e 19,0 mm, por incluírem-se em uma faixa viável para o emprego do tipo de ligação em questão. Diâmetros maiores são inadequados pela insuficiência de espaço disponível para distribuição de cavilhas na ligação. Prefere-se a utilização de um número maior de cavilhas de diâmetros menores às cavilhas de diâmetros maiores.

A tabela I reúne os resultados dos ensaios realizados.

TABELA I - Ligação de Peças Solicitadas por Compressão Normal

δ (mm)	b (mm)	σ_c (MPa)	P_n (N) p/uma cavilha
12,7	30	46,6	9555
		46,6	7583
		36,7	8662
		50,5	9261
		35,6	8888
		38,1	8250
	52	46,6	10507
		41,9	10291
		36,7	10399
		57,3	12998
		41,1	11272
		40,7	9339
19,0	30	41,9	12998
		36,7	9104
		36,3	13047
		36,3	12616
		39,4	12115
		39,4	12351
	52	46,6	16412
		61,6	24780
		43,6	18698
		42,6	19875
		38,0	15215
		38,7	16088
		41,7	16030

6.2 - Análise dos Resultados

6.2.1 - Carga Admissível

O comportamento geral deste tipo de ligação é semelhante ao da ligação paralela.

O esmagamento da madeira ocorre com evidência nas peças da madeira interligada, conforme ilustra a fig. 31.

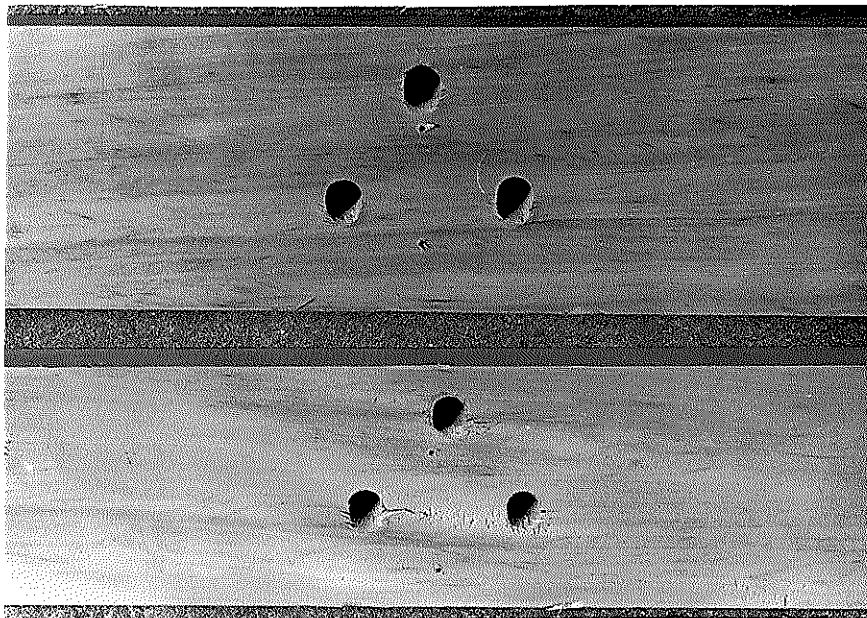
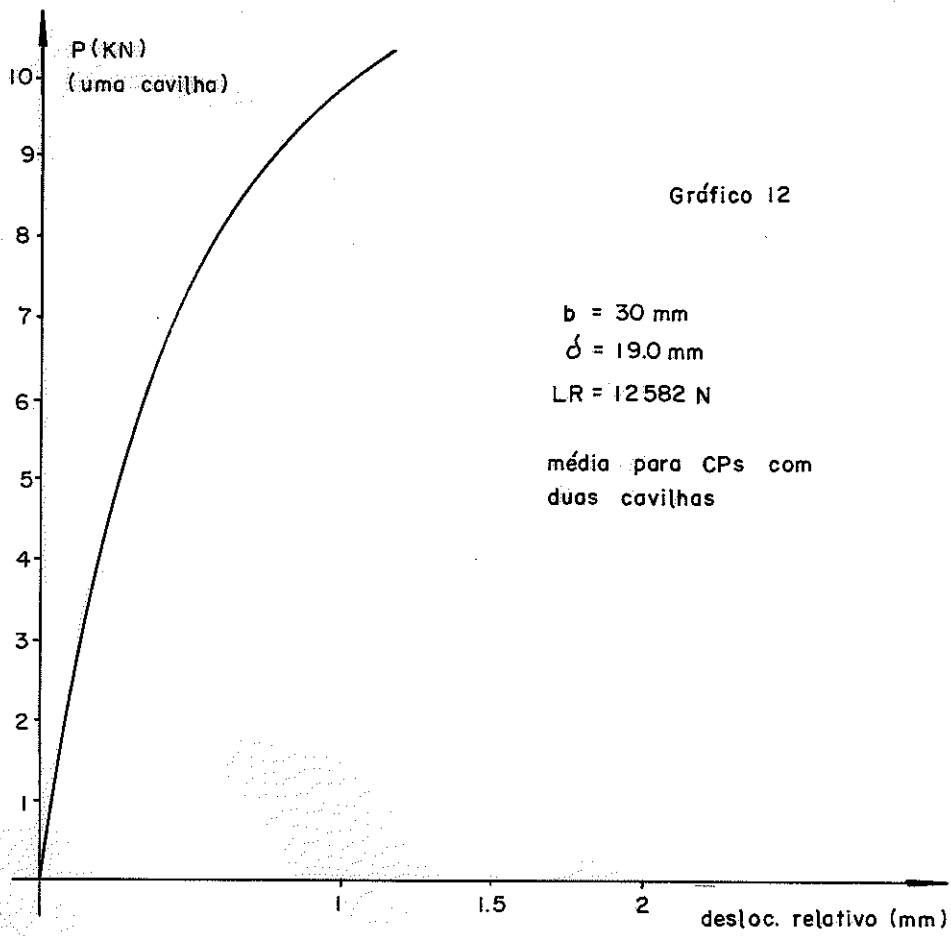
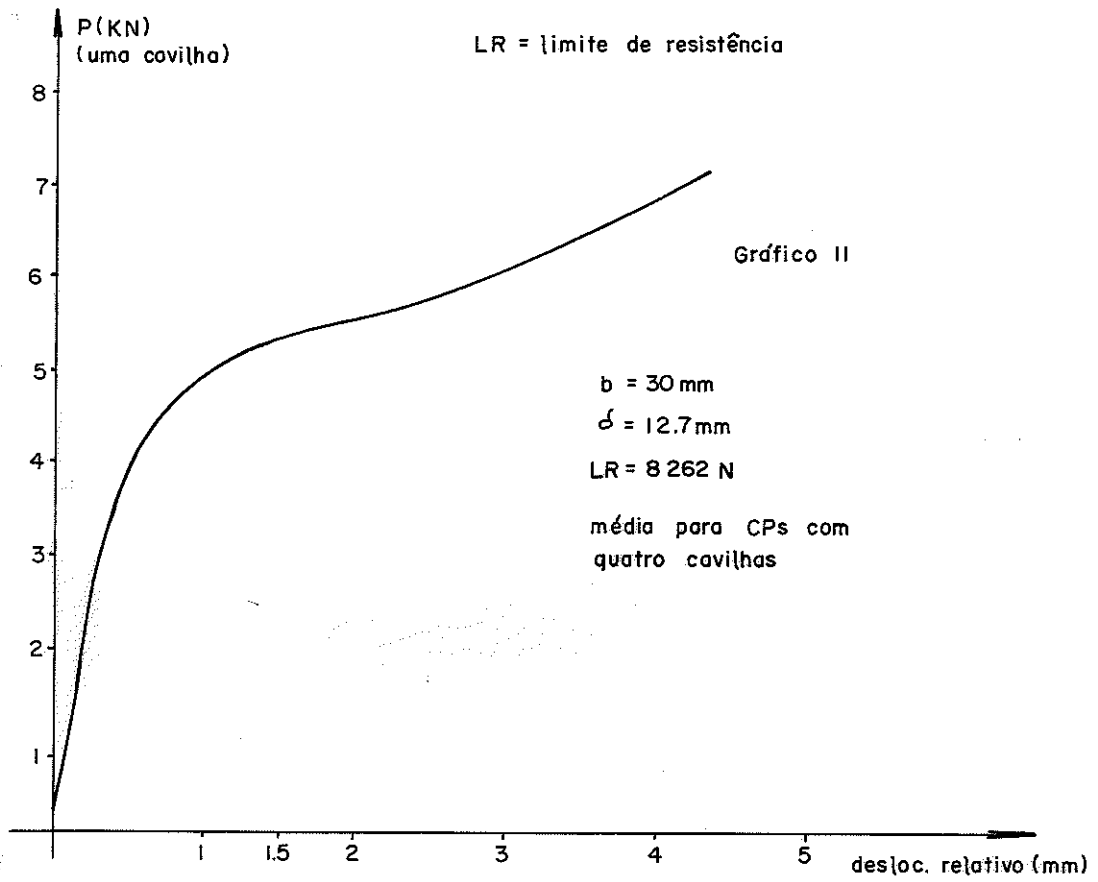


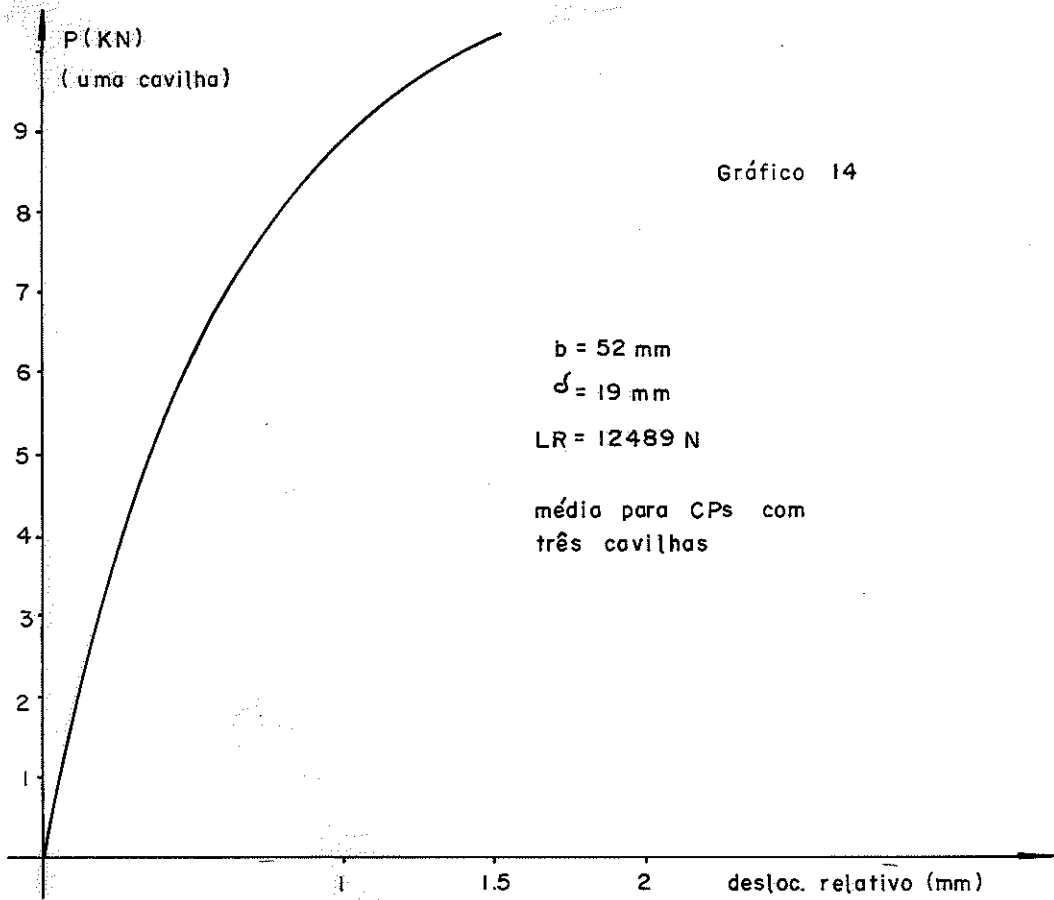
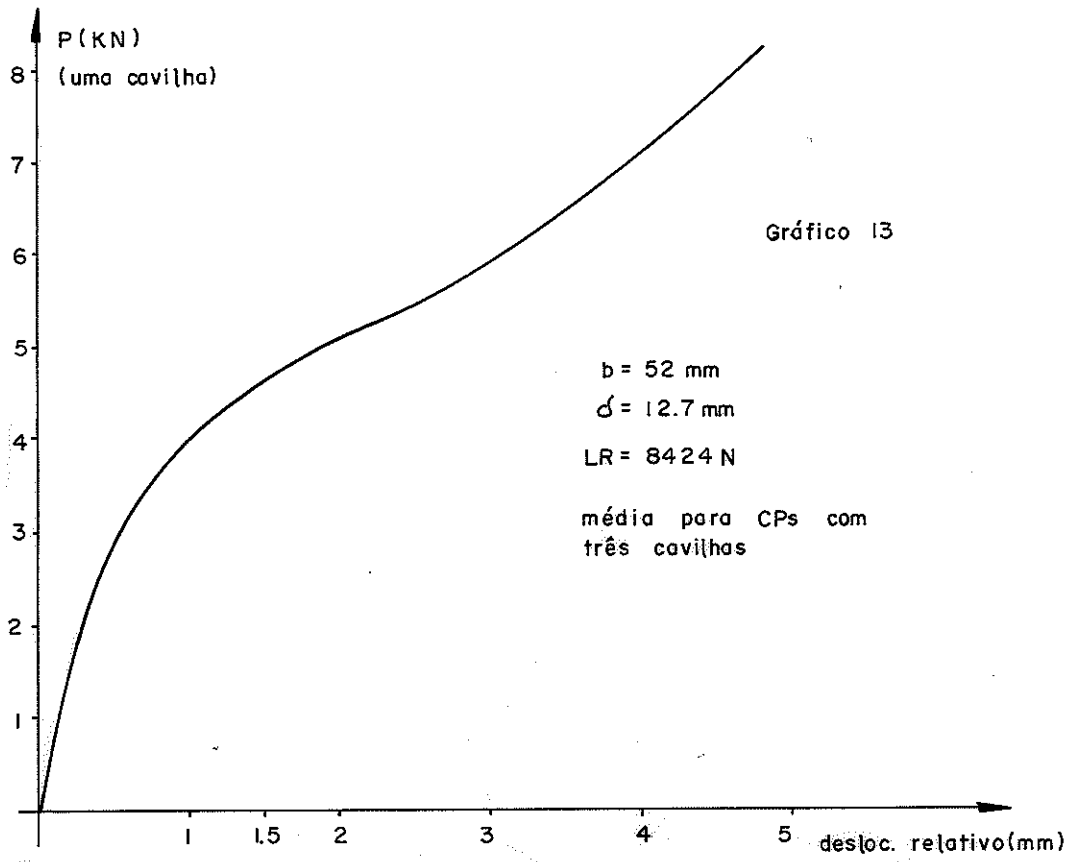
FIG. 31 - Esmagamento das peças interligadas nas ligações perpendiculares

Os gráficos 11 a 14 apresentam as características destas ligações, relacionando a aplicação de carga e o deslocamento relativo entre as peças ligadas. Observa-se um comportamento idêntico ao da compressão paralela, tornando válidas aqui as considerações desenvolvidas no item 5.2.1. Consequentemente, o coeficiente de segurança é o mesmo:

$$\bar{P}_n = 0,2 P_n$$

sendo \bar{P}_n a carga admissível na ligação perpendicular (normal) e P_n a carga de ruptura.





6.2.2 - Capacidade de Carga de uma Cavilha

6.2.2.1 - Representação Analítica

Assumindo as considerações desenvolvidas nos capítulos 4 e 5, a capacidade de uma cavilha é função dos parâmetros: b , δ e σ_c .

Por coerência, ao invés de σ_c (tensão de compressão paralela) dever-se-ia considerar o valor da tensão limite de resistência na compressão normal (σ_n). Entretanto, a madeira submetida à compressão normal às fibras, no limite de resistência, não apresenta ruptura, mas ruína¹².

A aplicação de carga normal às fibras atinge seu valor máximo, sem ruptura. Ocorre apenas uma acomodação plástica dos elementos anatómicos da madeira.

Para efeito de projeto, a Norma Brasileira considera a tensão de compressão normal às fibras em função da tensão de compressão paralela. Assim, pela NB-11, a tensão normal $\bar{\sigma}_n = 0,06 \sigma_c$ é equivalente a 30% da tensão admissível de compressão paralela: $\bar{\sigma}_n = 0,30 \bar{\sigma}_c$.

Assim sendo, torna-se coerente, aplicar os mesmos critérios usados no estudo da ligação de peças submetidas à compressão paralela.

A mesma análise estatística desenvolvida no item 5.2.2 foi empregada para este tipo de ligação.

Resultou a equação (5).

$$\bar{P}_n = 1,9 \cdot b^{0,45} \cdot \delta^{1,09} \cdot \sigma_c^{0,67} \dots\dots\dots (5)$$

Os parâmetros estatísticos relacionados com esta equação são:

nº de dados = 25

correlação múltipla = 0,943

erro padrão da estimativa = 10,5%

valor de F = 224 - altamente significativo

Comparando-se as equações (3) (ligação paralela) e a equação (5) (ligação normal), observa-se, coerentemente, uma contribuição maior da parcela correspondente a σ_c para a ligação nor

mal. Nesta, o coeficiente de σ_c é 0,67, enquanto na ligação paralela é 0,28. Isto é uma consequência do esmagamento da madeira ligada, na região de contato com a cavilha, por compressão normal.

6.2.2.2 - Representação Gráfica

A fig. 32, traduz graficamente a equação (5). Sua montagem e utilização são idênticos aos da fig. 29. item 5.2.2.2.

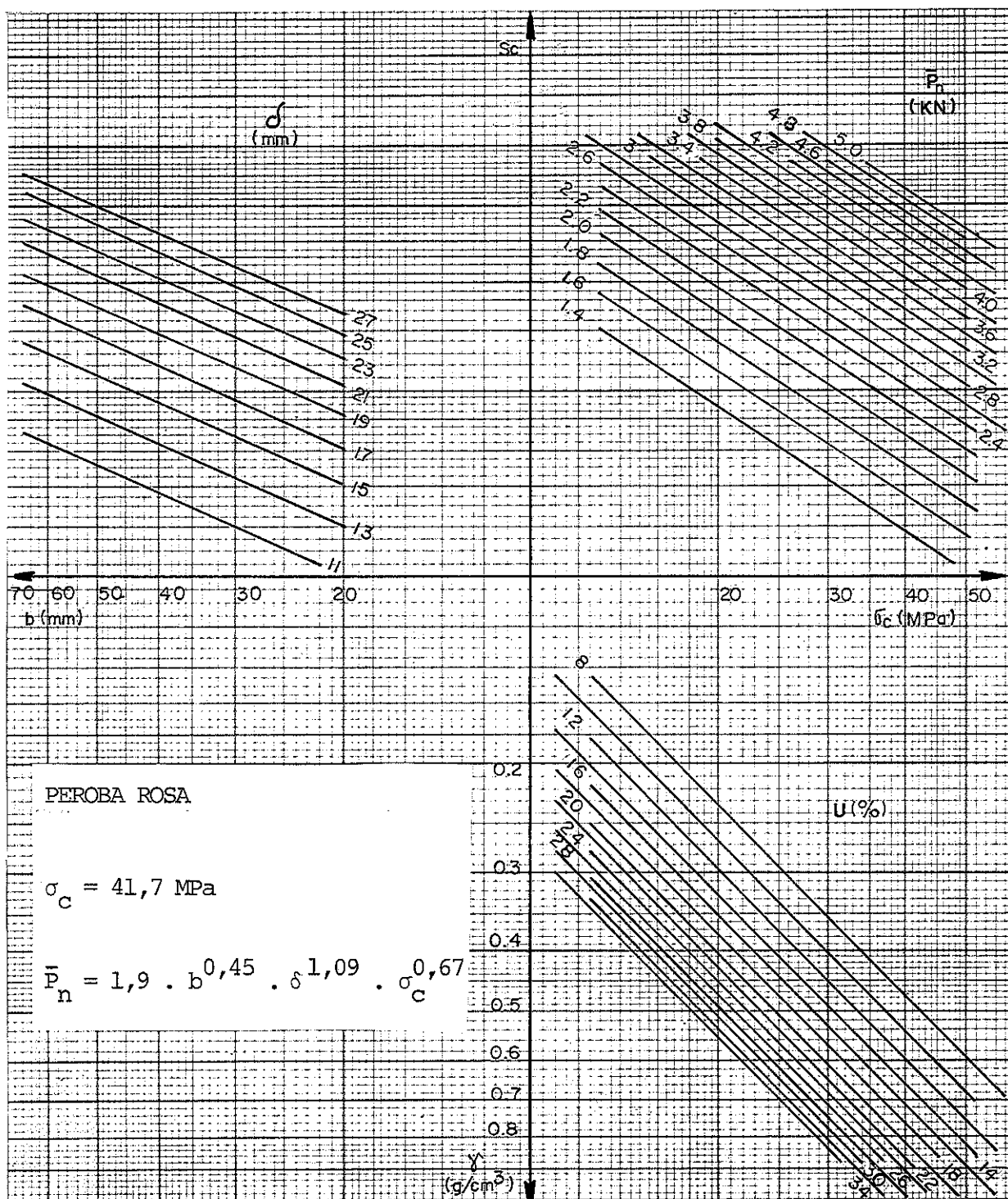
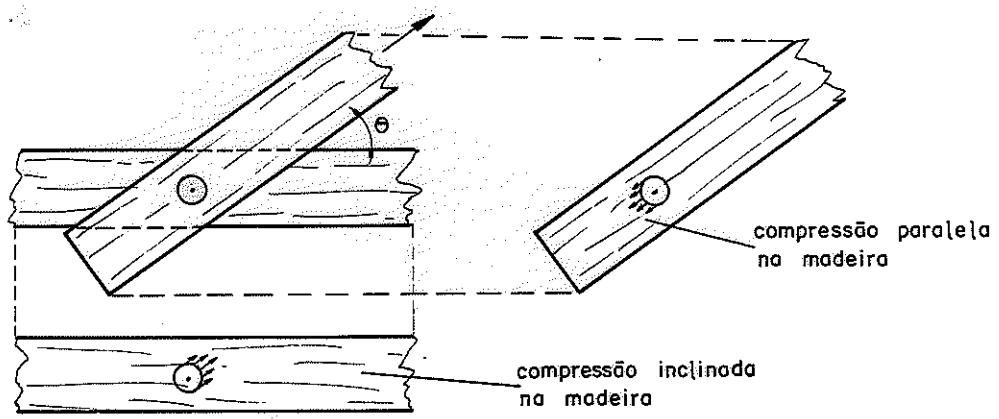


FIG. 32 - Diagrama para ligações cavilhadas solicitadas perpendiculares às fibras

7. - LIGAÇÃO DE PEÇAS INCLINADAS EM RELAÇÃO ÀS FIBRAS

A NB-11¹ quando se refere aos esforços inclinados em relação às fibras, para as ligações com parafuso de aço, item 67(b) - IV, recomenda a equação de Hankinson:

$$\bar{P}_\theta = \frac{\bar{P}_p \cdot \bar{P}_n}{\bar{P}_p \cdot \text{sen}^2 \theta + \bar{P}_n \cdot \text{cos}^2 \theta} \dots\dots\dots (6)$$



sendo:

θ = ângulo da direção do esforço com a direção das fibras.

\bar{P}_θ = esforço admissível na direção θ

\bar{P}_p e \bar{P}_n = esforços admissíveis nas direções paralela e normal

Estudo desenvolvido no LaMEM com anéis metálicos¹⁹ comprovaram a expressão acima.

Em vista da validade desta expressão para a ligação parafusada e para a ligação com anéis metálicos, pode ser considerada extensível para a ligação através de cavilhas partidas.

Scholten simplificou a utilização da equação acima construindo o diagrama que tem o seu nome¹³ relacionando tensões admissíveis.

O diagrama da fig. 33, imita o de Scholten para a determinação de \bar{P}_θ .

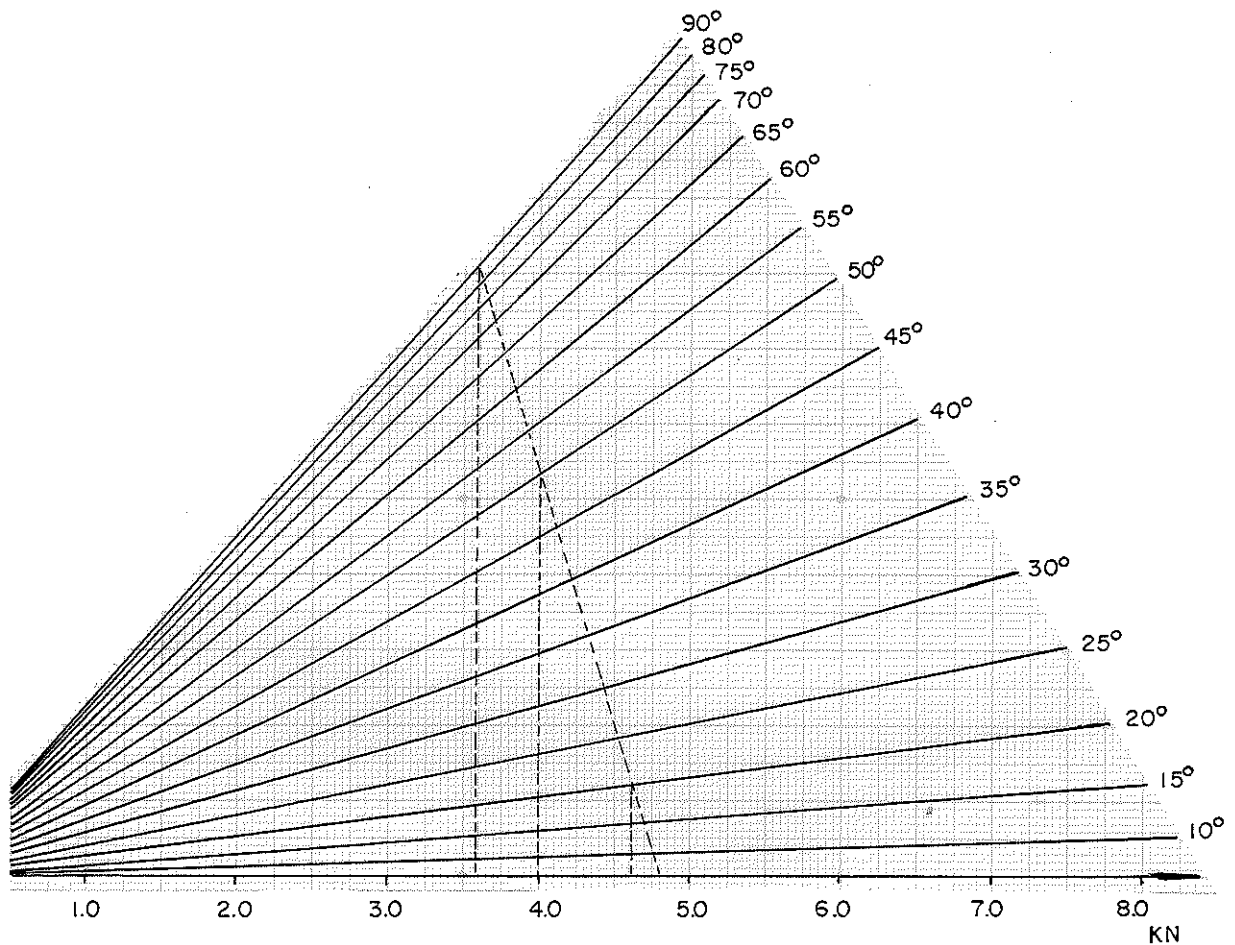


FIG.32 - Diagrama para determinação de \bar{P}_θ

Seja a capacidade de carga de uma cavilha na direção paralela e normal igual a: $P_p = 4,8 \text{ kN}$ e $\bar{P}_n = 3,6 \text{ kN}$. Deseja - se conhecer a capacidade de carga nas direções $\theta = 50^\circ$ e $\theta = 20^\circ$.

Pelo diagrama acima ou pela equação (6) vem:

$$\bar{P}_{50^\circ} = 4,02 \text{ kN}$$

$$\bar{P}_{20^\circ} = 4,62 \text{ kN}$$

8. - LIGAÇÃO DE PEÇAS DE PINHO DO PARANÁ

Tendo em vista a obtenção dos espaçamentos mínimos em ligações cavilhadas (capítulo 10), desenvolveu-se no presente capítulo, o estudo de ligações de peças de Pinho do Paraná através de cavilhas partidas de Eucalipto Citriodora.

Optou-se pelo Pinho do Paraná pela disponibilidade do material e para obtenção de resultados experimentais relativos à ligação de peças desta madeira através de cavilhas.

Este não foi um estudo abrangente. Restringiu-se à cavilha de diâmetro 12,7 mm e peças de espessura variando entre 22 mm a 48 mm, dimensões satisfatórias para o estudo dos espaçamentos mínimos.

A aplicação do modelo estatístico adotado nos casos anteriores, aos resultados obtidos nos 84 modelos ensaiados originou a equação (7).

$$P_{pp} = 113 \cdot b^{0,43} \cdot \sigma_c^{0,74} \dots\dots\dots (7)$$

A equação (7) é específica para o diâmetro $\delta = 12,7$ mm e fornece a capacidade de carga na ruptura P_{pp} . O índice "pp" representa a ligação de peças de Pinho do Paraná solicitadas por compressão paralela. Os parâmetros estatísticos relacionados com esta equação foram:

nº de dados = 84

correlação múltipla = 0,935

erro padrão da estimativa = 9%

valor de F = 571 - altamente significativa

Com a finalidade de se obter uma equação genérica para o Pinho do Paraná, incluindo a variação do diâmetro δ , fez-se a verificação da equação (3) da Peroba Rosa, para os 84 resultados de Pinho do Paraná.

Utilizando-se a regressão linear para relacionar os valores de carga dos ensaios de Pinho do Paraná com os valores de carga obtidos pela equação (3), determinou-se uma nova constante k e mantiveram-se os coeficientes dos parâmetros b, δ e σ_c , equação (8).

$$\bar{P}_{pp} = 2,9 \cdot b^{0,39} \cdot \delta^{1,51} \cdot \sigma_c^{0,28} \dots\dots\dots (8)$$

A correlação múltipla obtida para esta equação foi 0,911.

Considerando a mudança do valor da constante $k = 2,9$, em relação a $k = 4,0$ da equação (3) e a correlação mais baixa, tem-se a equação (8) para cálculo da carga admissível de uma cavilha em ligações de Pinho do Paraná, somente na falta de informações mais precisas.

Será da maior conveniência, em época oportuna, desenvolver-se a experimentação da ligação de modelos de Pinho do Paraná, utilizando cavilhas de Eucalipto Citriodora de diâmetros maiores que 12,7 mm.

Reforça-se, mais uma vez, ser a equação (7) perfeitamente válida para carga de ruptura de uma cavilha, com diâmetro $\delta = 12,7$ mm, em ligações de peças de Pinho do Paraná, enquanto a equação (8), embora mais genérica, não assegura valores perfeitamente confiáveis.

9. - LIGAÇÃO DE PEÇAS SOLICITADAS POR TRAÇÃO

A análise da distribuição de forças nas cavilhas permite considerar comportamentos idênticos para as ligações cavilhadas solicitadas por compressão ou por tração.

As diferenças entre os tipos de solicitação são de ordem secundária: sentido da solicitação e distância da última cavilha à extremidade.

Quanto ao sentido da solicitação, a resistência da madeira é a mesma; sua capacidade de carga não se altera.

Quanto ao espaçamento entre a última cavilha e a extremidade da peça ligada, fig. 34, existe necessidade de estudo para a sua determinação.

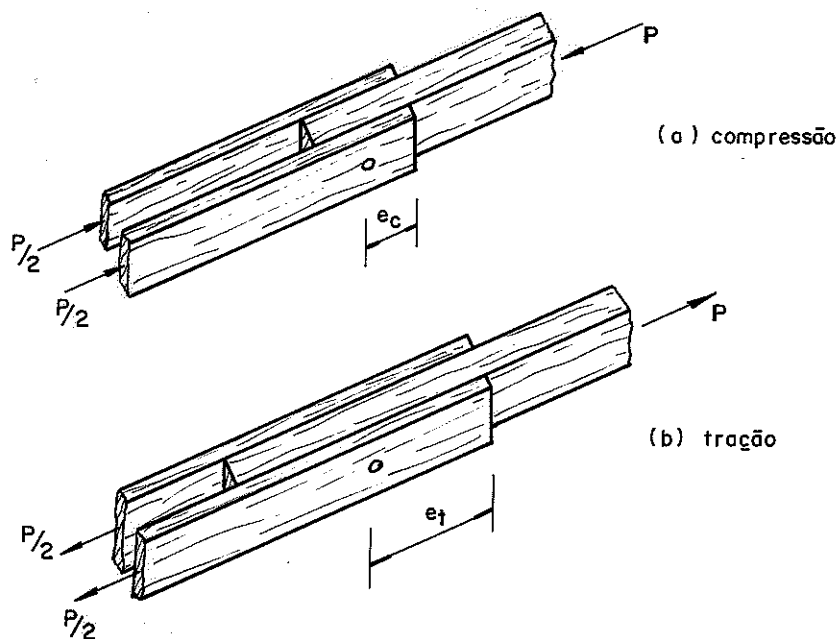


FIG. 34 - Espaçamento cavilha - extremidade na direção da fibra ($e_c < e_t$)

As equações (3) e (5) tornam-se válidas também para a tração.

Considerou-se necessário um estudo para determinação dos espaçamentos mínimos entre cavilhas e entre cavilhas e extremidades.

O capítulo 10 trata especificamente do assunto. O item 10.4 complementa as considerações sobre ligações tracionadas.

10. - ESPAÇAMENTOS MÍNIMOS

O estudo dos espaçamentos mínimos baseou-se em determinações experimentais em modelos de Pinho do Paraná com cavilhas partidas de Eucalipto Citriodora.

A referência básica para este estudo foi a equação (7) do capítulo 8.

10.1 - Espaçamentos para Ligações Solicitadas por Compressão Paralela

A distribuição de cavilhas considerada satisfatória para o estudo em questão, refere-se a aplicação de apenas duas cavilhas.

As direções relativas para duas cavilhas podem assumir três posições diferentes como indicado na fig. 35, normal às fibras, na mesma direção das fibras e deslocada em relação às fibras.

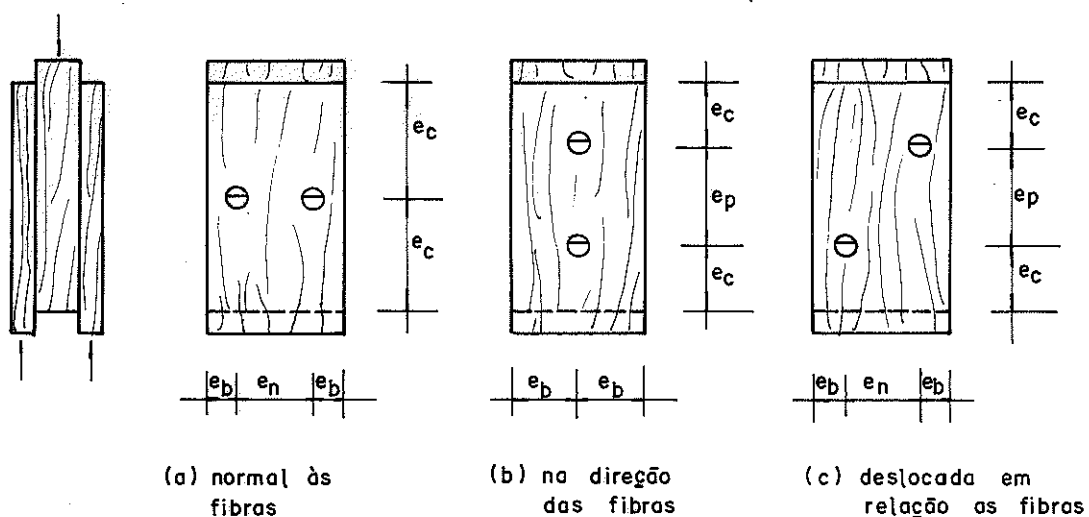


FIG. 35 - Disposições possíveis para duas cavilhas

Adotou-se a simbologia indicada na figura 35, com os seguintes significados:

e_p = espaçamento entre cavilhas na direção paralela às fibras

e_n = espaçamento entre cavilhas na direção normal às fibras

e_b = espaçamento entre a cavilha e a borda

e_c = espaçamento entre cavilha e extremidade na direção paralela à fibra, para a compressão.

10.1.1 - Espaçamentos Cavilha - Borda (e_b) e Cavilha - Extremidade (e_c)

Iniciou-se o estudo ensaiando modelos ligados por apenas uma cavilha. A intenção foi determinar a área de influência para uma cavilha, obtendo-se assim, a distância mínima da cavilha à borda e à extremidade.

Esta série de ensaios constou de 15 modelos dividido em 5 grupos. Cada grupo com 3 modelos, representou uma dimensão de largura (d) e comprimento (a).

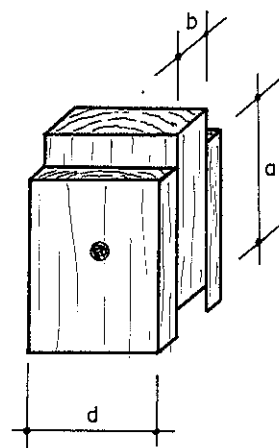
A tabela II fornece os resultados desta série de ensaios. Estes corpos de prova tiveram valores constantes para b, δ e σ_c . De acordo com a equação (7), a capacidade de carga esperada para estas ligações será 7594 N.

TABELA II

Valores de P_{pp} - Área de Influência para uma cavilha

$b = 24 \text{ mm} \rightarrow \delta = 12,7 \text{ mm} \rightarrow \sigma_c = 46,5 \text{ MPa}$

GRUPO	DIMENSÃO (d' x a) (mm ²)	P_{pp} médio para 3 modelos (N)
1	25 x 50	7370
2	40 x 50	7795
3	45 x 55	7937
4	50 x 60	8079
5	55 x 65	8079



Examinando a tabela II, a partir do 2º grupo de modelos, os resultados apresentados são aparentemente superiores aos esperados, face à equação (7). O aumento de área (d x a) corresponde a um aumento de P_{pp} médio para 3 modelos ensaiados. Este aumento é bastante pequeno e, com isto, pouco satisfatório à vista do maior consumo de madeira para a ligação. Torna-se portanto, aceitável a dimensão (40 x 50) mm².

A dimensão (40 x 50) mm² corresponde à largura d = 40 mm e comprimento a = 50 mm, equivalendo aos espaçamentos:

$$e_b = \frac{1}{2} \cdot \frac{40}{12,7} \approx 1,5 \delta \quad e_c = \frac{1}{2} \cdot \frac{50}{12,7} = 2,0 \delta$$

adotados a partir deste experimento, salvo qualquer evidência experimental futura em contrário.

10.1.2 - Espaçamento entre Cavilhas na Direção Normal às Fibras (e_n)

Utilizando os resultados obtidos no item anterior, ensaiaram-se modelos do tipo apresentado na figura 35(a), com duas cavilhas. Esta série constituiu-se de 3 grupos de 5 cp, totalizando 15 cp.

A tabela III reúne as informações e resultados desta série de ensaio.

TABELA III - Determinação de e_n
 b = 24 mm - δ = 12,7 mm
 P_{pp} para uma cavilha

GRUPO	e_b	e_c	e_n	σ_c	Valor de Ensaio	Valor Esperado
	(δ)	(δ)	(δ)	(MPa)	P_{pp} média de 5 cps (N)	P_{pp} (N)
1º	1,5	2,0	2,0	46,0	7571	7534
2º	1,5	1,5	3,0	46,0	7431	7534
3º	1,5	2,0	3,0	40,0	6828	6794

Aparentemente, adotar $e_c = 1,5 \delta$ ao invés de $2,0 \delta$ do item anterior, explica a obtenção de P_{pp} menor que o esperado, confirmando adequação do valor $e_c = 2,0 \delta$.

Entre os valores $e_n = 2,0 \delta$ e $e_n = 3,0 \delta$, prefere-se o primeiro pela sua maior eficiência tendo em vista corresponder ao menor consumo de madeira.

10.1.3 - Espaçamento entre Cavilhas na Direção Paralela às Fibras (e_p)

Este espaçamento, fig. 35 (b), requer maiores cuidados, pois a distribuição de tensão é crítica. A transferência de tensões da peça principal para as cobrejuntas ocorre ao longo de um caminho definido pela direção das fibras que passam pelos dois furos, fig. 36.

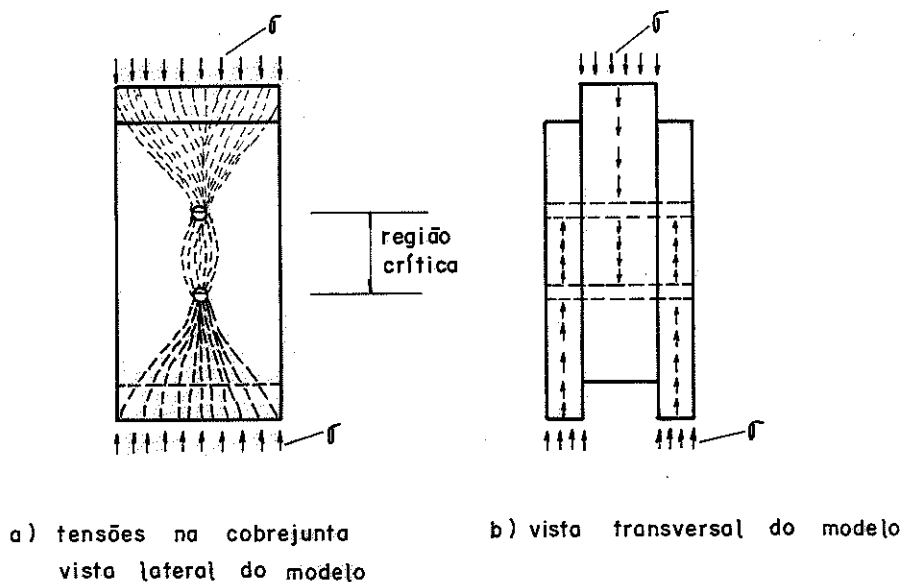


FIG. 35 - Idealização do caminhamento das tensões para ligações com duas cavilhas colocadas na mesma direção da fibra

Executaram-se 5 grupos de ensaios, de 5 modelos para cada grupo, totalizando 25 modelos. Os resultados obtidos são apresentados na tabela IV.

TABELA IV - Determinação de e_p

$b = 24 \text{ mm}$ - $\delta = 12,7 \text{ mm}$

P_{pp} = para uma cavilha

GRUPO	e_b (δ)	e_c (δ)	e_p (δ)	σ_c (MPa)	Valor de Ensaio	Valor Esperado
					P_{pp} média de 5 cps (N)	P_{pp} (N)
1 φ	1,5	1,5	2,0	41,5	2783	6981
2 φ	1,5	2,0	2,0	41,5	3163	6981
3 φ	1,5	2,0	3,0	41,5	4174	6981
4 φ	1,5	2,0	4,0	41,5	6957	6981
5 φ	1,5	2,0	4,0	40,0	7193	6794

O valor $e_p = 4,0 \delta$ resulta ligação com maior capacidade de carga da cavilha, quando comparada com o valor esperado da equação (7), tornando-se portanto, aceitável como espaçamento entre cavilhas na direção paralela às fibras.

10.1.4 - Espaçamentos entre cavilhas simultaneamente Deslocadas na direção Paralela e Normal às Fibras

Para otimizar a distribuição de cavilhas nas ligações, fez-se um estudo complementar, considerando a variação simultânea dos espaçamentos na direção normal e na direção paralela às fibras da madeira, fig. 37.

Este estudo tem em vista o aproveitamento do espaço para distribuição das cavilhas nas ligações, principalmente nos casos de ligações com peças solicitadas por grandes esforços, com área restrita para distribuição das cavilhas.

Na fig. 37, é apresentada a disposição das cavilhas

nos modelos para esta série de ensaios. Adotaram-se, sucessivamente $e_n = 0,5 \delta$, $e_n = 1,0 \delta$ e $e_n = 1,5 \delta$, correspondendo respectivamente aos valores $e_p = 3,0 \delta$, $e_p = 2,0 \delta$ e $e_p = 1,0 \delta$

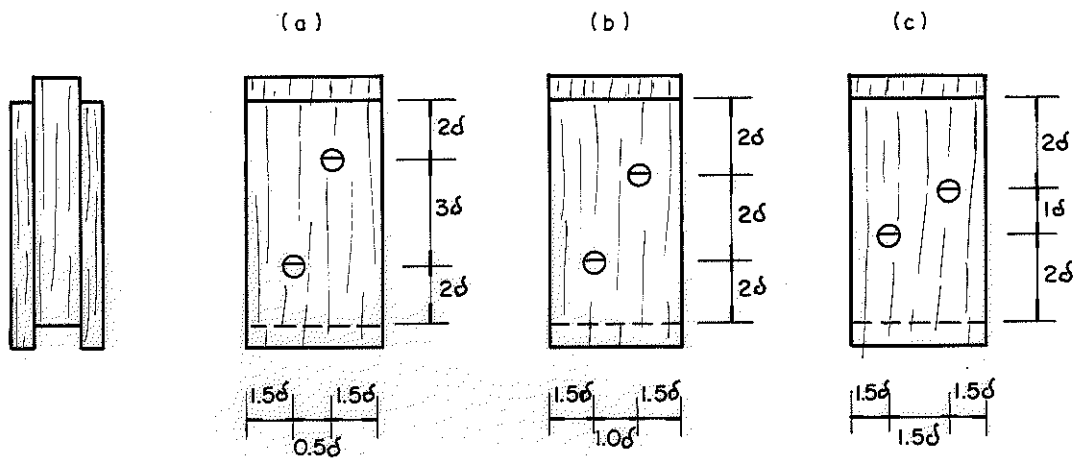


FIG.37 - Distribuição das cavilhas para estudo da variação simultânea de espaçamentos

Os ensaios apresentaram os resultados da tabela V

TABELA V - Variação Simultânea de e_p e e_n

$b = 24 \text{ mm}$ - $\delta = 12,7 \text{ mm}$ - $\sigma_c = 34,6 \text{ MPa}$

$P_{pp} = 6102 \text{ MPa}$ (valor esperado)

(carga para uma cavilha)

GRUPO	P_{pp} média de 4 cps (N)
Fig. 31 (a)	5984
Fig. 31 (b)	6023
Fig. 31 (c)	6117

Os resultados podem ser considerados satisfatórios para as combinações de afastamentos adotados embora, nos casos (a) e (b), a capacidade de carga das cavilhas seja ligeiramente menor. A redução da carga P_{pp} é inferior a 2%.

10.1.5 - Verificação dos Espaçamentos Mínimos

Para testar a situação geral de ligações cavilhadas envolvendo diferentes espaçamentos, número e posição de cavilhas, ensaiaram-se mais 8 grupos de três modelos. Os oito grupos correspondem a oito casos diferentes de 3 a 6 cavilhas com a disposição apresentada na fig.38.

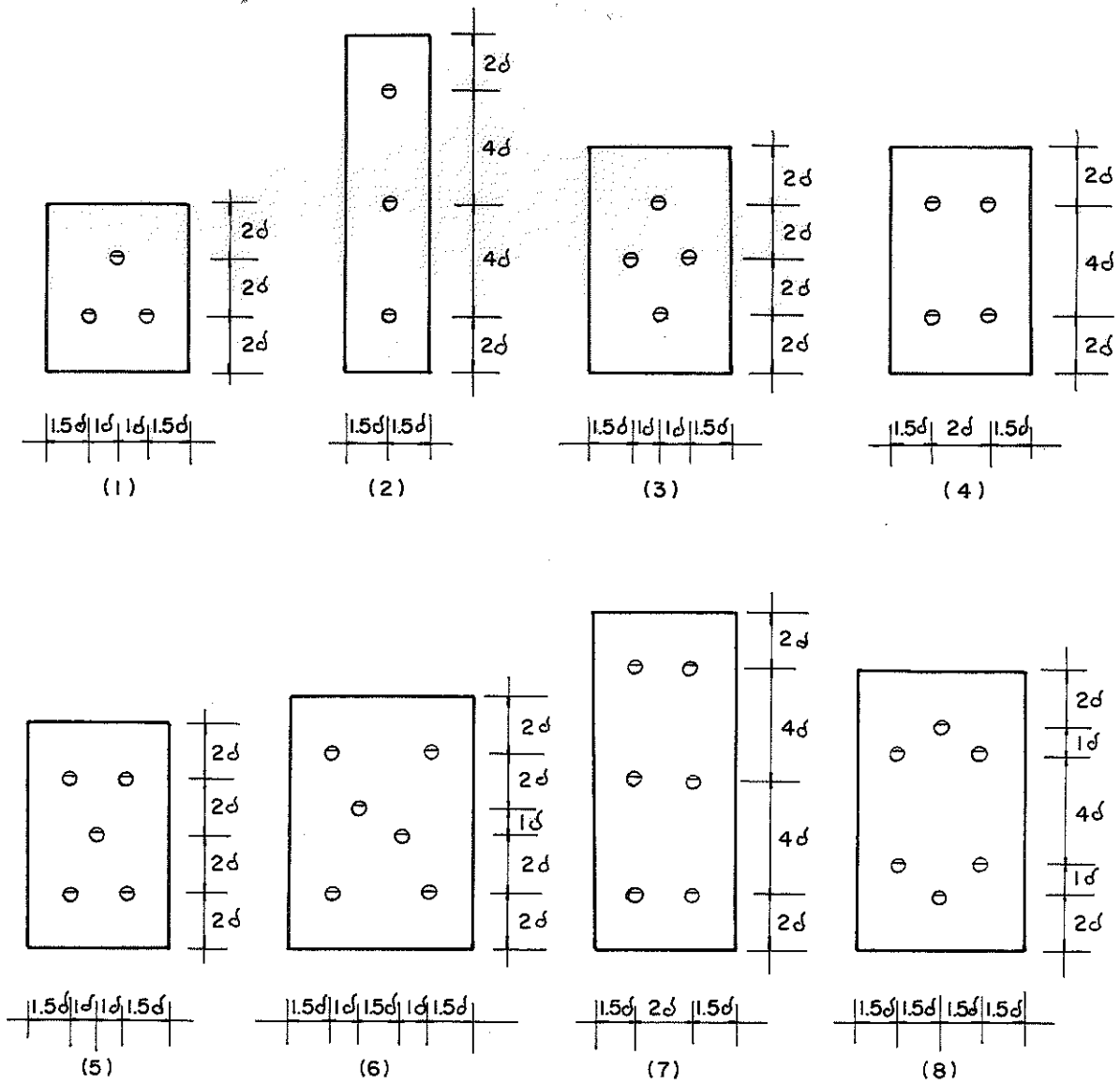


FIG.38 — Disposição de cavilhas para verificação dos espaçamentos mínimos

Destes ensaios resultou a tabela VI.

TABELA VI

Verificação dos Espaçamentos Mínimos

b = 24 mm - δ = 12,7 mm

(cargas para uma cavilha)

GRUPO	σ_c (MPa)	P_{pp} (N) Esperado	P_{pp} (N) Média de 3mod.
(1)	56,0	8714	8705
(2)	36,9	6400	7423
(3)	36,9	6400	7198
(4)	36,9	6400	6973
(5)	33,4	5945	5802
(6)	33,4	5945	5905
(7)	36,9	6400	6317
(8)	36,9	6400	6636

A comparação entre os valores P_{pp} esperados e obtidos comprovam a validade dos espaçamentos adotados, no estudo de peças de Pinho do Paraná e cavilhas de 12,7 mm.

Para verificar estas recomendações de espaçamentos para ligações utilizando cavilhas com outro diâmetro e outra madeira, fez-se uma série de ensaios com Peroba Rosa nas condições mais críticas, empregando-se 6 e 8 cavilhas, com a distribuição indicada na fig. 39.

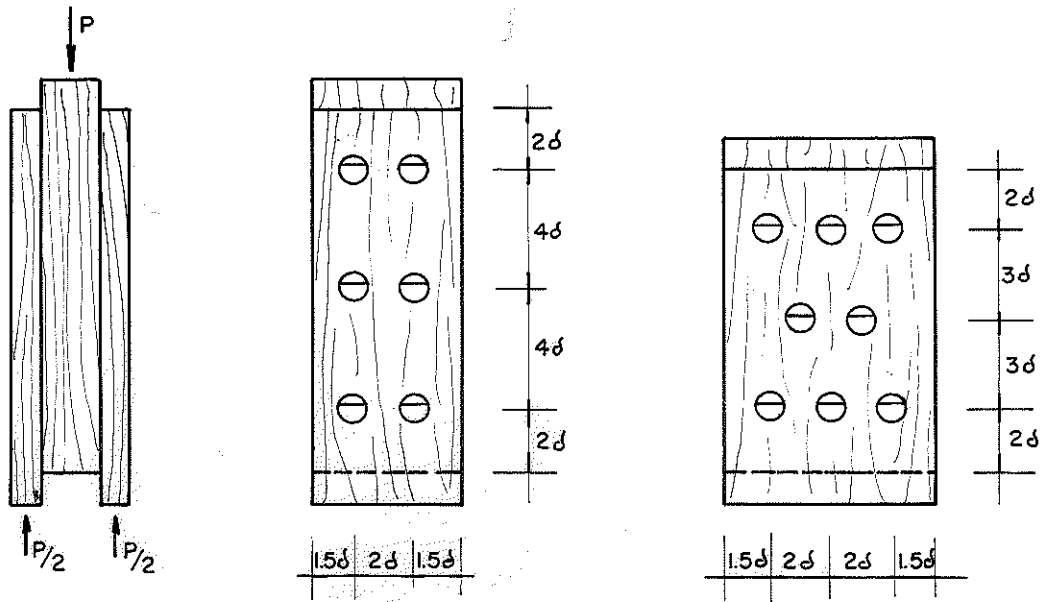


FIG. 39 - Modelo para verificação dos espaçamentos mínimos para ligações de peroba rosa

A tabela VII mostra os resultados destes ensaios.

TABELA VII - Verificação dos Espaçamentos Mínimos para Ligações de Peroba Rosa - Diâmetros 12,7 mm e 19,0 mm

nº de Cavilhas	nº de modelos	b (mm)	δ (mm)	P _{pp} (N) (esperado)	P _{pp} (N) (obtido)	(*) Erro (%)
6	3	52	12,7	79086	76283	- 4
8	3	54	12,7	106165	103291	- 3
6	1	52	12,7	73557	73604	0
8	1	52	12,7	102820	103240	0
8	1	50	12,7	98361	105526	+ 7
6	1	30	19,0	119400	116602	- 2
6	1	52	19,0	148634	159746	+ 8
8	1	52	19,0	198178	187920	- 5
6	3	30	19,0	112930	104256	- 8

$$(*) \text{ Erro} = \frac{P_{pp} \text{ (obtido)} - P_{pp} \text{ (esperado)}}{P_{pp} \text{ (esperado)}} \cdot 100$$

A análise da tabela VII comprova os espaçamentos recomendados, também, para a Peroba Rosa e cavilhas de diâmetros 12,7 mm e 19,0 mm, presumindo-se sua validade para qualquer diâmetro.

10.1.6 - Conclusão

A fig. 40, reúne as informações quanto aos espaçamentos mínimos para ligações solicitadas por compressão paralela.

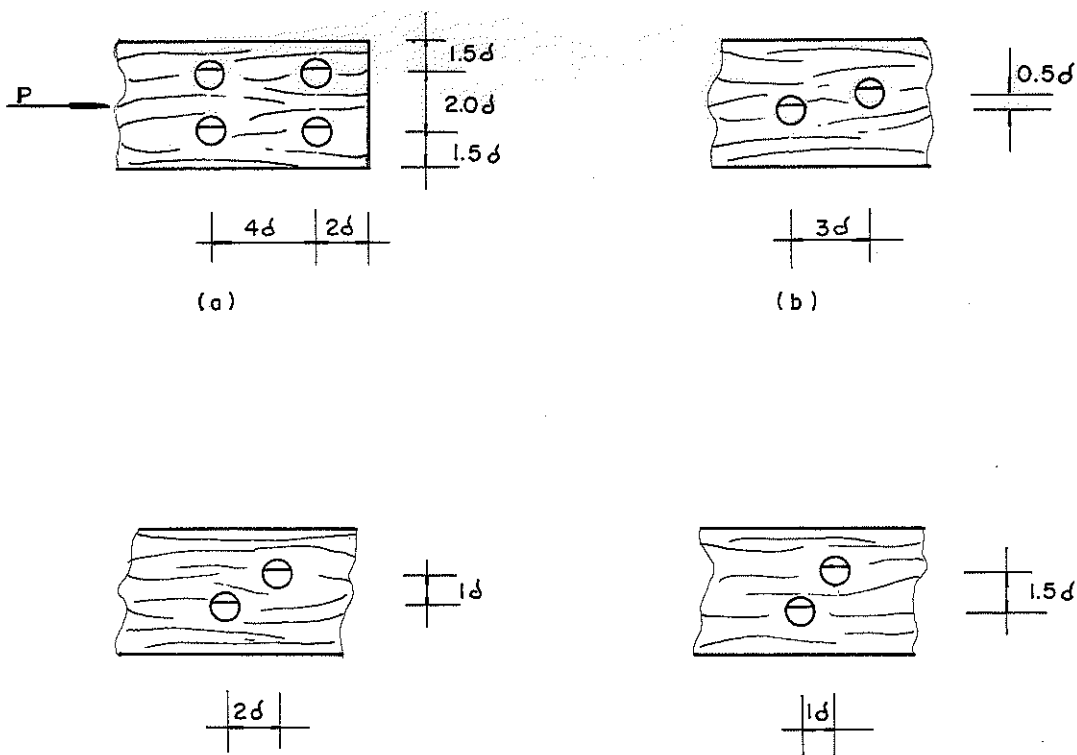


FIG. 40 - Espaçamentos para ligações paralelas comprimidas

A fig. 40 (a), fornece os valores dos espaçamentos entre cavilhas dispostas na direção normal e paralela às fibras, e espaçamentos da cavilha à borda e à extremidade. As figuras (b), (c) e (d) correspondem às situações intermediárias, com cavilhas desalinhas, simultaneamente deslocadas em relação às direções paralela e normal.

A fig. 41, é bastante útil para a determinação de espaçamentos entre cavilhas; é sugerida como gabarito de montagem das ligações em obras. A região hachurada representa o domínio (área de influência) de uma cavilha sobre as outras. Para uma cavilha na parte central, não poderá haver nenhuma outra cavilha incluída na região hachurada, considerando-se a direção das fibras indicadas.

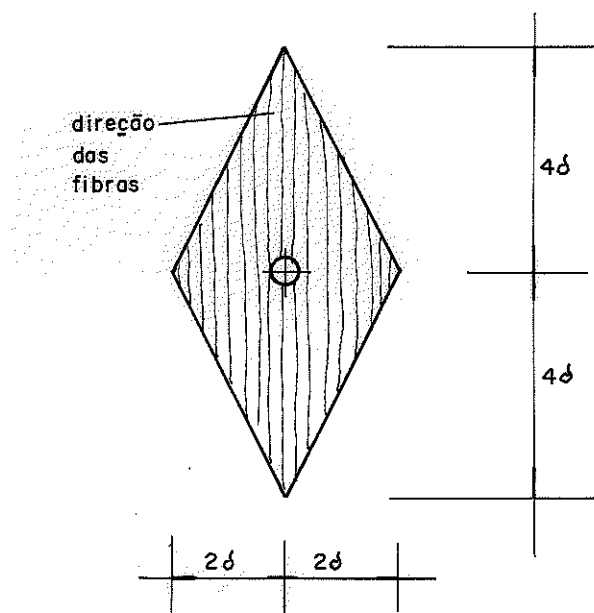


FIG. 41 - Região de domínio para uma cavilha

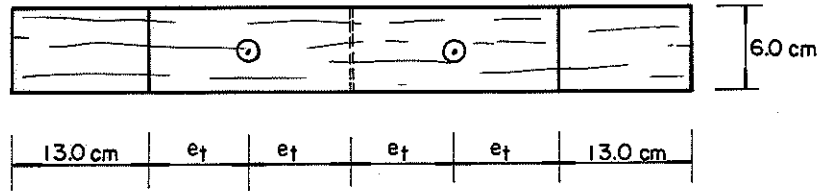
10.2 - Espaçamentos para Ligações Solicitadas por Tração

Conforme foi comentado no capítulo 9, as ligações tracionadas diferenciam-se das comprimidas, somente nos espaçamentos entre a cavilha e a extremidade (e_t), fig. 42.

Ensaio de tração são de difícil execução. Foram executados em máquina universal de ensaios, nas quais existem limitações das dimensões dos corpos de prova. A máxima espessura (b) possível foi de 20 mm.

Inicialmente, ensaiaram-se 9 modelos com apenas uma cavilha, com valores de e_t variados: 5δ , 6δ e 7δ . As dimensões dos modelos são mostrados na figura 36.

Vista lateral



$$e_t = 5\delta, 6\delta \text{ e } 7\delta$$

Vista superior



FIG. 42 - Modelo para tração com uma cavilha -
Determinação de e_t

A madeira empregada foi o Pinho do Paraná. Os resultados obtidos estão mostrados na tabela VIII.

TABELA VIII - Ensaio de Tração com uma Cavilha

$$b = 20 \text{ mm} \quad - \quad \delta = 12,7 \text{ mm}$$

σ_c (MPa)	P_{pp} (N) (esperado)	P_{pp} (obtido) - (N)		
		$e_t = 5\delta$	$e_t = 6\delta$	$e_t = 7\delta$
36,8	5905	2767	2711	2814
40,2	6204	2996	2504	2791
40,4	6328	2849	3094	3288

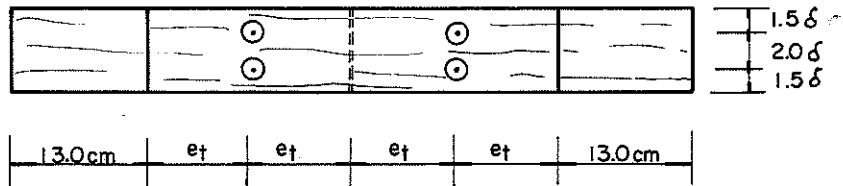
Observa-se uma diferença bastante significativa entre as cargas esperada e obtida, da ordem de 50%, para todos os casos.

Verificou-se durante os ensaios, desprendimento das cobrejuntas, e conseqüentemente, a ruptura da ligação foi antecipada, não correspondendo ao esperado.

Ficou evidente a falta de rigidez das peças ligadas. Como solução, tentou-se o aumento do número de cavilhas.

Testaram-se novos modelos com duas cavilhas, dispostas como indica a fig. 43.

Vista lateral



$$e_t = 5\delta, 6\delta \text{ e } 7\delta$$

Vista superior

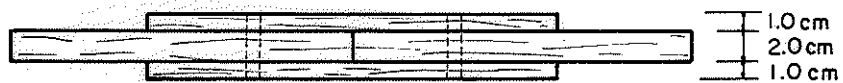


FIG. 43 - Modelo para tração com duas cavilhas - Determinação de e_t

A tabela IX contém os valores encontrados nestes ensaios. A utilização de duas cavilhas proporcionou a rigidez desejada, com um acréscimo de aproximadamente 100% em relação às ligações com uma cavilha.

TABELA IX - Ensaio de Tração com duas Cavilhas

$$b = 20 \text{ mm} \quad - \quad \delta = 12,7 \text{ mm}$$

P_{pp} = Carga de uma cavilha

σ_c (MPa)	P_{pp} (N) (esperado)	P_{pp} (obtido - (N))		
		$e_t = 5\delta$	$e_t = 6\delta$	$e_t = 7\delta$
61,0	8584	6569	-	-
61,0	8584	6430	-	-
35,8	5786	-	5029	-
35,8	5786	-	6302	-
37,5	5988	-	-	6353
37,5	5988	-	-	5839
43,1	6638	-	6536	6733
43,1	6638	-	6930	6634
43,1	6638	-	5966	6634

Pela tabela IX o valor de $e_t = 5 \delta$ não satisfaz as exigências, as cargas obtidas são significativamente menores que as esperadas. Para $e_t = 6 \delta$ há oscilações negativas superiores a 10% tornando-se insegura a adoção deste valor. Para $e_t = 7 \delta$, a variação negativa ocorreu para apenas um dado, e mesmo assim, inferior a 3%, perfeitamente aceitável.

Assim, para as ligações tracionadas, o espaçamento da borda é $e_t = 7 \delta$.

10.3 - Espaçamentos para Ligações Solicitadas por Compressão Normal

Para este tipo de solicitação não foi desenvolvido estudo experimental específico. Os espaçamentos sugeridos baseiam-se nos espaçamentos usados nos modelos ensaiados por compressão com o máximo de quatro cavilhas, fig. 44, Os espaçamentos das ligações solicitadas por tração normal são sugeridos com base nas considerações dos itens anteriores.

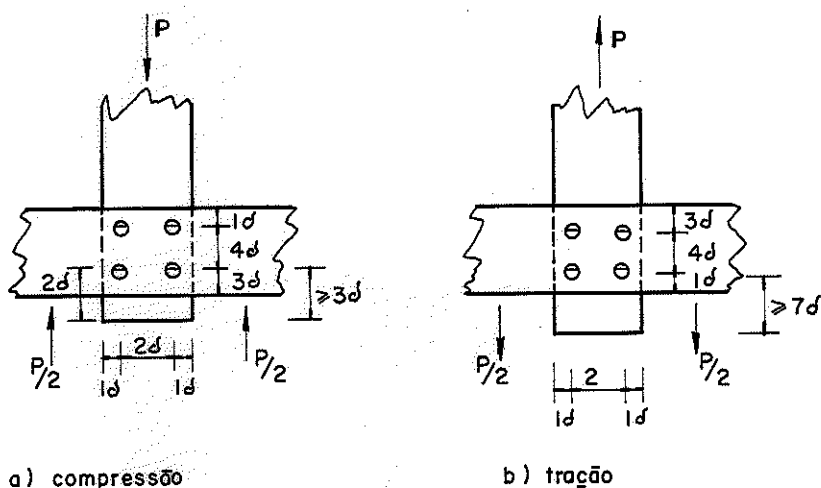


FIG. 44 - Espaçamentos mínimos para ligação de peças com fibras perpendiculares entre si

11. - EMENDAS CAVILHADAS FLETIDAS

11.1 - Considerações Gerais

As ligações mais comuns são submetidas à compressão e tração na direção paralela e normal às fibras. Pode ocorrer, entretanto, a emenda fletida.

O estudo das emendas cavilhadas fletidas tem em vista a aplicação das cavilhas, principalmente, em estruturas como o arco, contendo os três tipos de solicitações: momento fletor, força cortante e força normal, com predominância do último tipo de solicitação.

O exemplo mais interessante de estrutura na forma de arco com emenda fletida cavilhada é ilustrado na fig. 45. Trata-se da composição de um arco de madeira, partindo de pequenas peças submetidas à flexo-compressão, solidarizadas através das cavilhas.

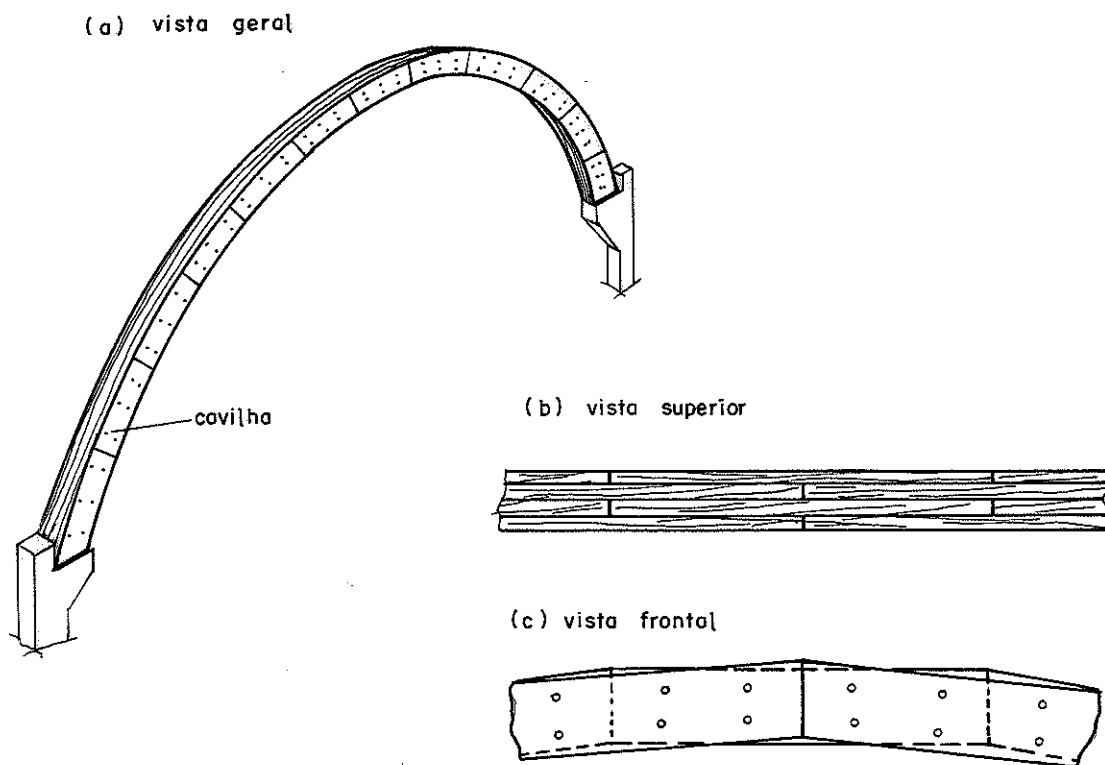


FIG. 45 - Arco com emendas cavilhadas sucessivas

A conformação deste tipo de arco é conseguida por emendas sucessivas entre peças curtas e retas.

As cavilhas nestas emendas transmitem esforços de compressão (N), força cortante (Q) e momento fletor (M), fig. 46.

11.2 - Distribuição de Forças nas Cavilhas

A fig. 46, apresenta em detalhe um trecho genérico do arco citado, contendo uma emenda cavilhada fletida.

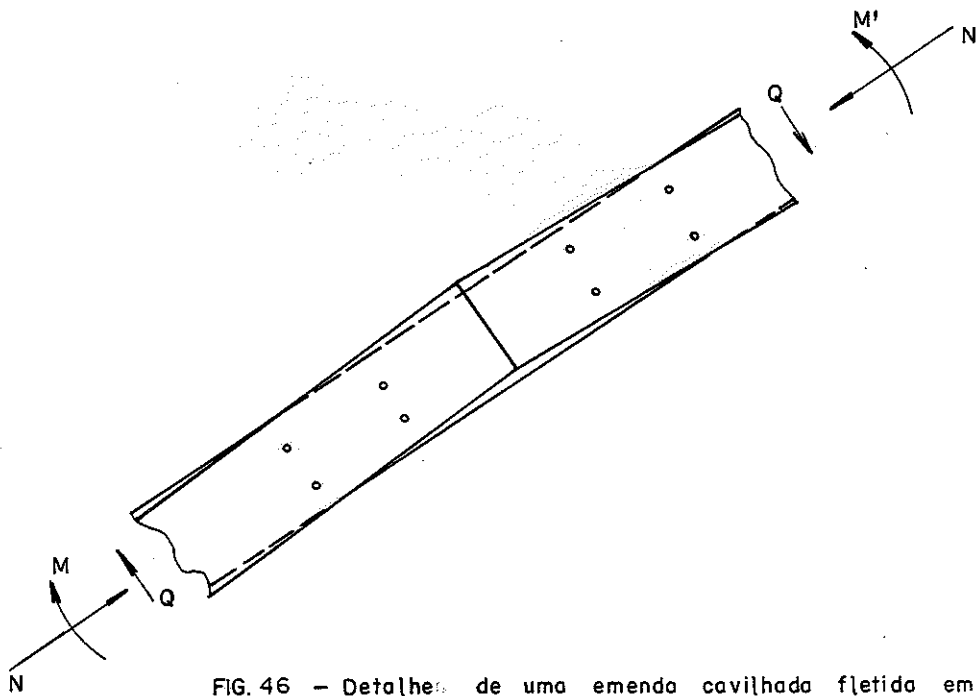


FIG. 46 - Detalhes de uma emenda cavilhada fletida em arco

Considerando a pequena inclinação relativa entre as peças retas da emenda, pode-se confundí-las, facilitando o cálculo da emenda.

Os esforços solicitantes são transmitidos de uma peça à outra, através de forças concentradas nas cavilhas, resultantes do equilíbrio estático do momento fletor, força cortante e força normal, fig. 47. Representa-se na fig. 47, a emenda (parte esquerda) da fig. 46, na posição horizontal, para melhorar seu entendimento.

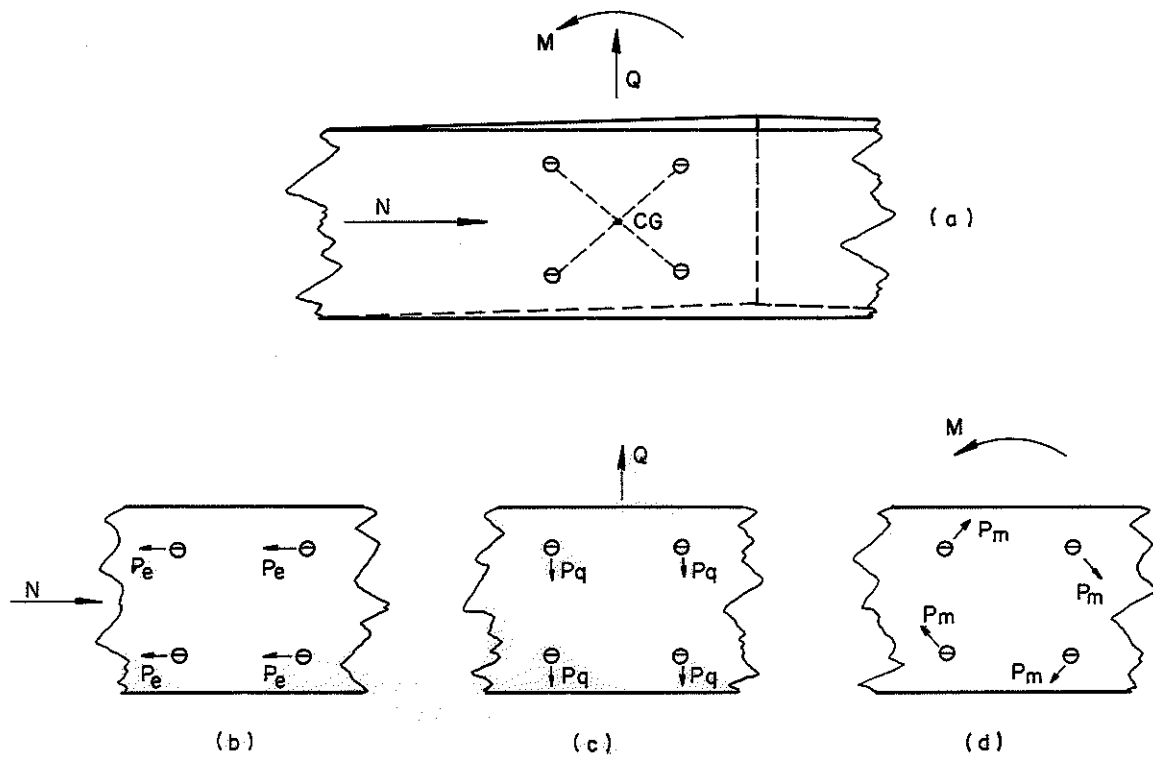


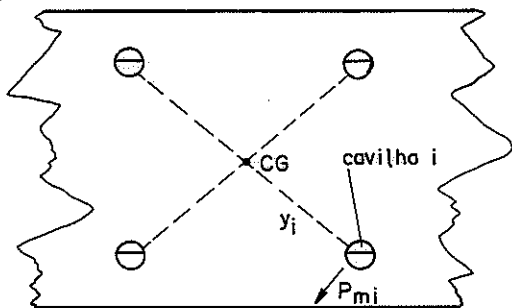
FIG. 47 - Forças sobre cavilhas numa emenda fletida

A fig. 47 (b), (c) e (d) apresentam, independentemente, as forças nas cavilhas (P_e , P_q e P_m) devidas as ações de N, Q, e M.

Estas forças são facilmente calculadas:

$$P_e = \frac{N}{n} ; P_q = \frac{Q}{n} , \text{ sendo } n \text{ o número de cavilhas na ligação.}$$

O cálculo de P_m pode ser generalizado, pela hipótese de que a força P_m na cavilha i, é diretamente proporcional à distância y_i compreendida entre o centro de gravidade da ligação e a posição da cavilha, ²⁴ e ²⁵, resulta a expressão:



$$P_{m_i} = \frac{M}{n \sum_{j=1}^n y_j^2} \cdot y_i$$

A fig. 48, mostra a composição de forças para a cavi-
lha mais crítica (mais solicitada).

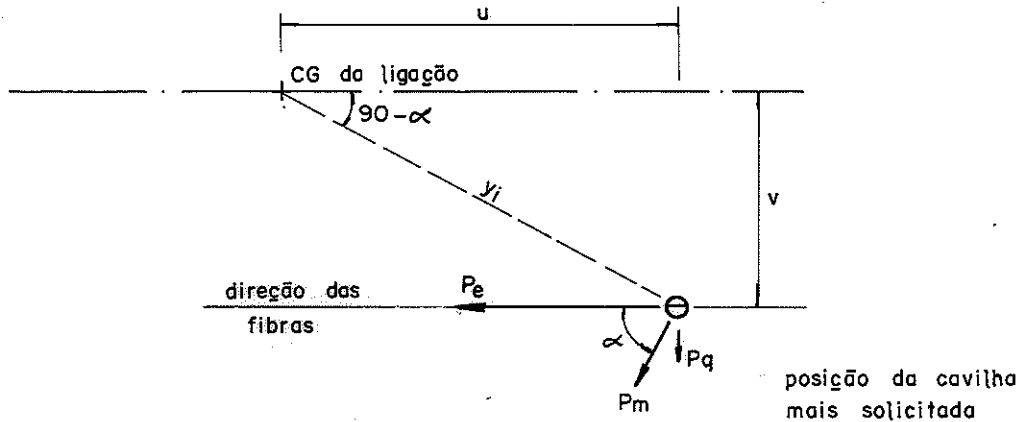


FIG. 48 - Esforços na cavilha em relação ao CG

A fig. 49, mostra a composição de esforços em uma ca-
vilha. P_1 é a componente dos esforços resultante na direção para-
lela às fibras, e portanto va-
le:

$$P_1 = P_e + P_m \cdot \frac{v}{Y_i}$$

P_2 é a componente dos esforços
na direção normal às fibras:

$$P_2 = P_q + P_m \cdot \frac{u}{Y_i}$$

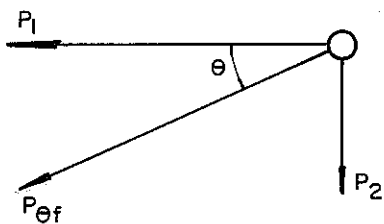


FIG. 49 - Esforços resultantes em uma
cavilha de ligação fletida

Portanto, a resultante final
na direção θ será:

$$P_{\theta_f} = \sqrt{P_1^2 + P_2^2} \leq \bar{P}_\theta$$

Facilmente encontra-se o ângu-
lo θ :

$$\theta = \text{arc tg} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$$

11.3 - Experimentação

Para simular as situações gerais de emendas fletidas ensaiaram-se vigas bi-apoiadas com emendas solicitadas apenas por momento fletor, fig. 50 (a); ou por momento fletor e força cortante, fig. 50 (b).

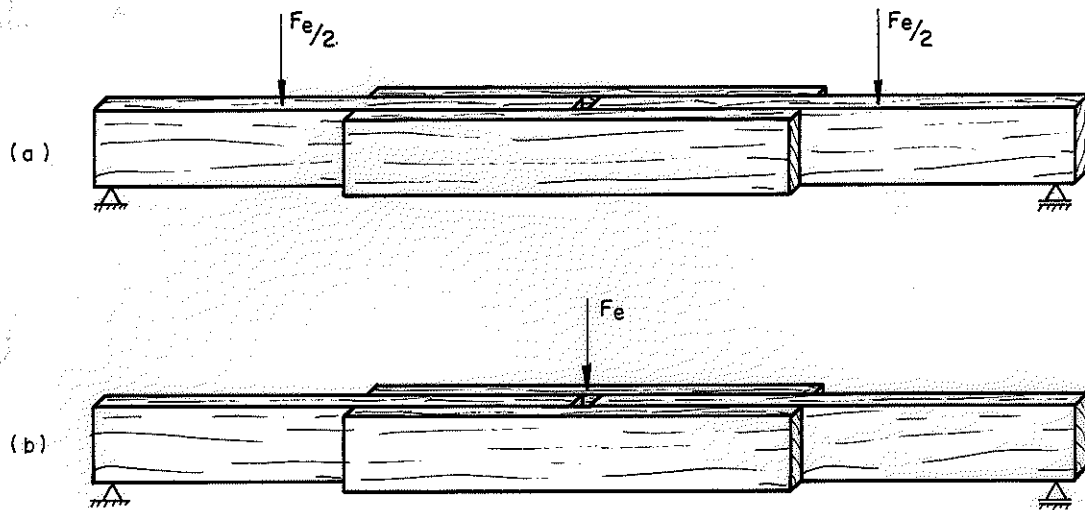


FIG. 50 -- Tipos de carregamentos para as vigas com emendas cavilhas fletidas

Como garantia da distribuição uniforme de esforços em cada cavilha, aplicaram-se quatro cavilhas equidistantes do centro de gravidade da ligação.

A velocidade de carregamento, seguiu recomendações do MB-26², item 11 C: "a aplicação da carga é feita normalmente aos anéis de crescimento, à razão de 100 kg/cm² por minuto" (9,81 MPa por minuto).

Estudos específicos realizados no LaMEM⁵ evidenciam a variabilidade do módulo de elasticidade (E) na flexão, em função da relação L/h (vão livre/altura da viga). Para L/h > 16, aproximadamente, o módulo de elasticidade é constante, diminuindo para valores L/h < 16.

Na tentativa de abranger situações diversas, fizeram-se carregamentos sobre as vigas garantindo-se o seu comportamento elástico para todos os carregamentos. Aplicaram-se dois tipos de carregamentos e variou-se a relação L/h. A fig. 51; esquematiza os carregamentos e vãos aplicados.

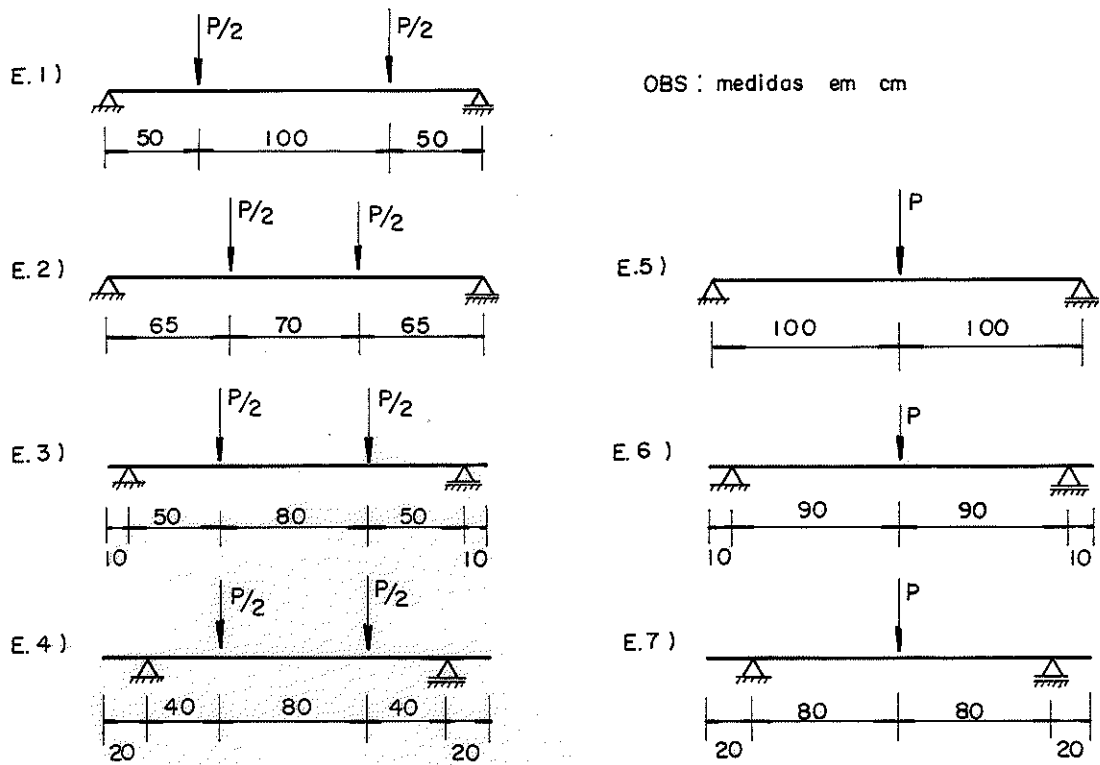


FIG. 51 - Carregamentos e vão das vigas com emendas cavilhadas

As vigas ensaiadas foram de Peroba Rosa com cavilhas de diâmetros 12,7 mm (vigas V_1 e V_2) e 19,0 mm (vigas V_3 e V_4). Suas características estão apresentadas na tabela X.

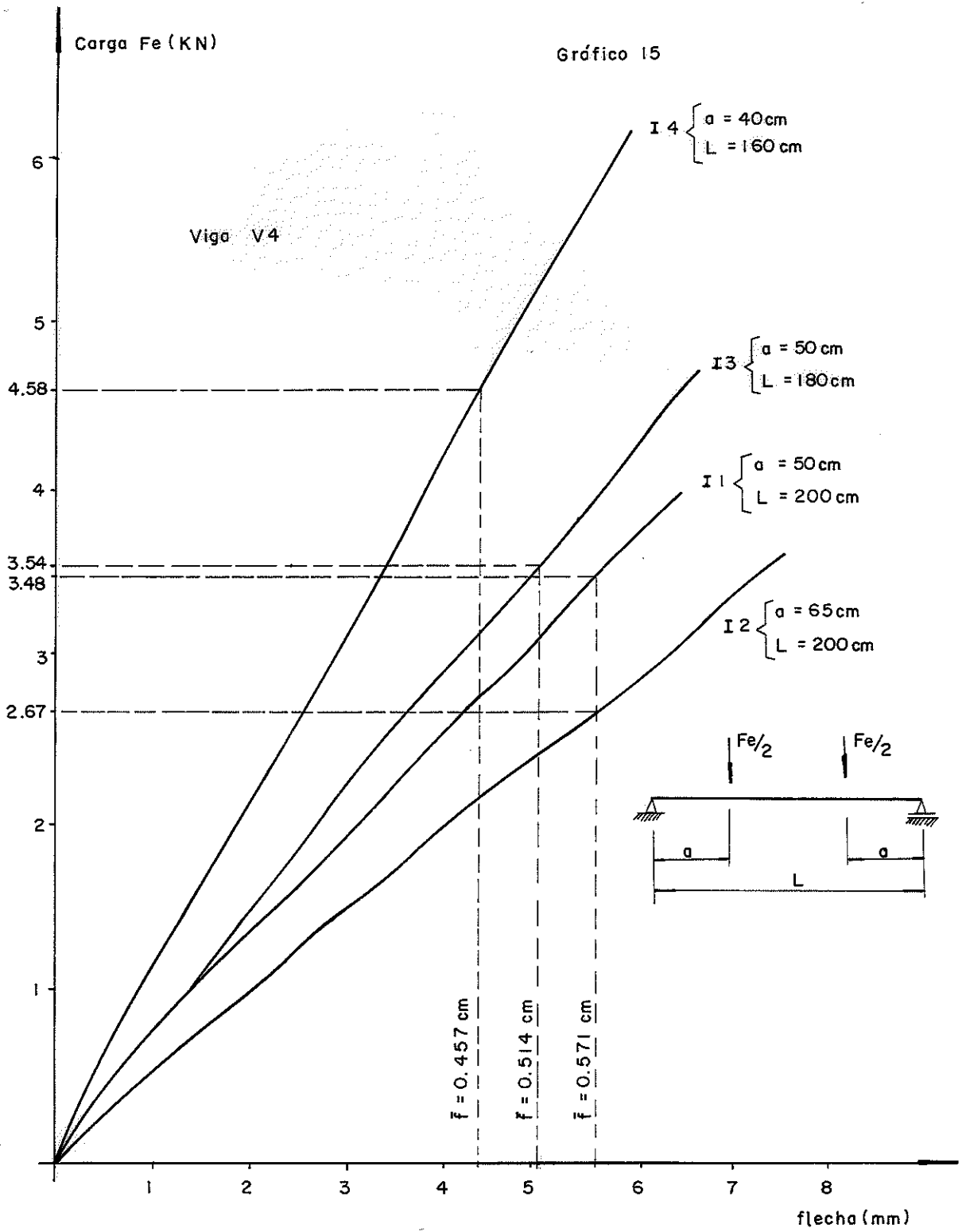
TABELA X

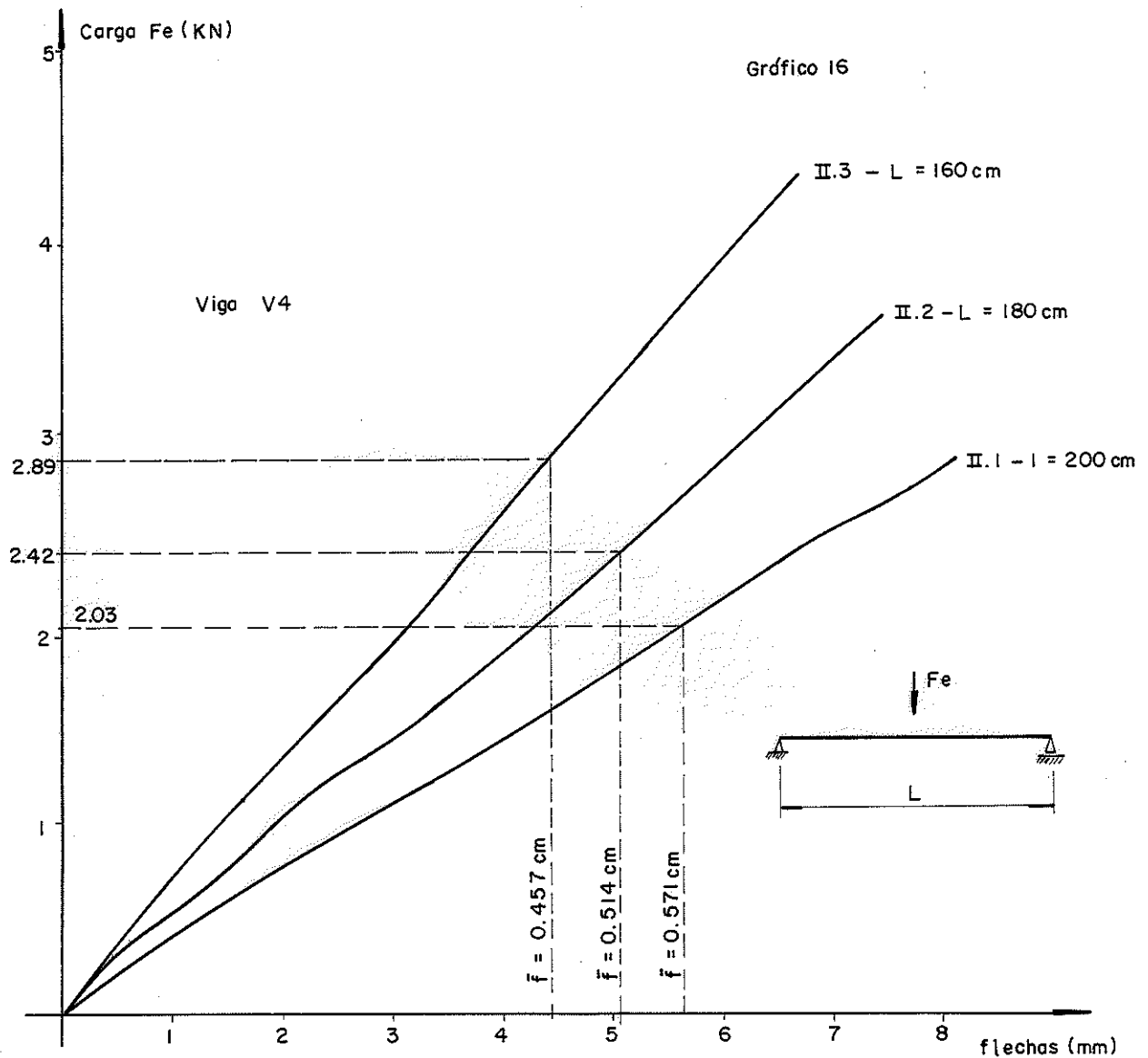
Características das Vigas com Emendas Cavilhadas

VIGA	δ (mm)	Seção Transver- sal (mm^2)	σ_c (MPa)	E (MPa)
V 1	12,7	30 x 110	36,7	13266
V 2	12,7	43 x 150	43,5	9699
V 3	19,0	30 x 150	57,5	12872
V 4	19,0	44 x 151	43,9	10054

11.4 - Análise dos Resultados e Conclusões

Os gráficos 15 e 16 apresentam o comportamento da viga V4 ($b = 44 \text{ mm}$ e $\delta = 19 \text{ mm}$) para os diversos vãos e tipos de carregamentos. Os gráficos 15 e 16, embora específicos para a viga V4 são semelhantes aos das vigas V1, V2 e V3.





Observa-se pelos gráficos 15 e 16 a ocorrência de um ajuste perfeito das cavilhas nos furos, pois a inclinação da reta definida pela relação carga e flecha na viga permanece praticamente constante, desde o princípio do carregamento, sem qualquer acomodação inicial.

Na tabela XI são apresentados os dados para análise dos resultados, obtidos nos ensaios das vigas em questão.

Fez-se a comparação entre as características das vigas considerando-as sem emenda e considerando-as com a emenda cavilhada.

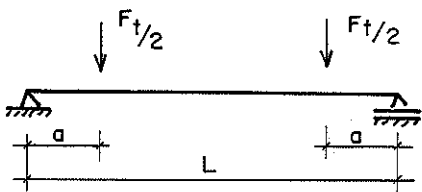
Na coluna 2 é especificado o vão e o tipo de carregamento, de acordo com a fig. 51. Na coluna 3 é apresentada a flecha admissível no meio do vão, para cada carregamento adotando-se:

$$\bar{f} = \frac{\Delta L}{350} \text{ (NB-11, item 69b)}$$

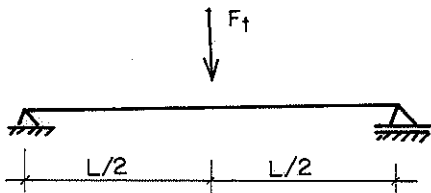
Na coluna 4 é apresentada a carga aplicada sobre a viga, simbolizada por F_e (força obtida na experimentação) correspondente à flecha admissível na viga com emenda cavilhada.



Na coluna 5 é apresentada a carga teórica (F_t), calculada pelas equações da elástica das vigas, correspondente à flecha admissível para a viga sem emenda.



$$F_t = \frac{48 \cdot E \cdot J}{a(3L^2 - 4a^2)} \cdot \bar{f}$$



$$F_t = \frac{48 \cdot E \cdot J}{L^3} \cdot \bar{f}$$

TABELA XI - Emendas Fletidas Cavilhadas

1	2	3	4	5
VIGA	Tipo de Carregamento	\bar{f} (cm)	F_e (N)	F_t (N)
V1	E1	0,571	1452	2040
	E3	0,514	1972	2717
	E4	0,457	2413	3855
	E5	0,571	932	1511
	E6	0,514	1118	1864
	E7	0,457	1354	2364
	V2	E1	0,571	2305
E3		0,514	2845	7210
E4		0,457	3718	10222
E5		0,571	1638	4012
E6		0,514	1952	4964
E7		0,457	2158	6278
V3		E1	0,571	3453
	E2	0,571	2747	7230
	E3	0,514	3502	9996
	E4	0,457	4503	13763
	E5	0,571	1942	6053
	E6	0,514	2296	7475
	E7	0,457	2766	9467
V4	E1	0,571	3483	7259
	E2	0,571	2678	5955
	E3	0,514	3541	8240
	E4	0,457	4581	11350
	E5	0,571	2031	4993
	E6	0,514	2423	6161
	E7	0,457	2894	7799

A comparação entre as colunas 4 e 5 da tabela XI permite avaliar a redução da rigidez da viga sem emenda em relação à viga com emenda cavilhada fletida. Esta redução é da ordem de 55%.

As fig. 52 e 53, ilustram o aspecto de vigas com emendas cavilhadas levadas à ruptura. São vigas com seis cavilhas.



FIG. 52 — Ruptura de uma viga com emenda cavilhada

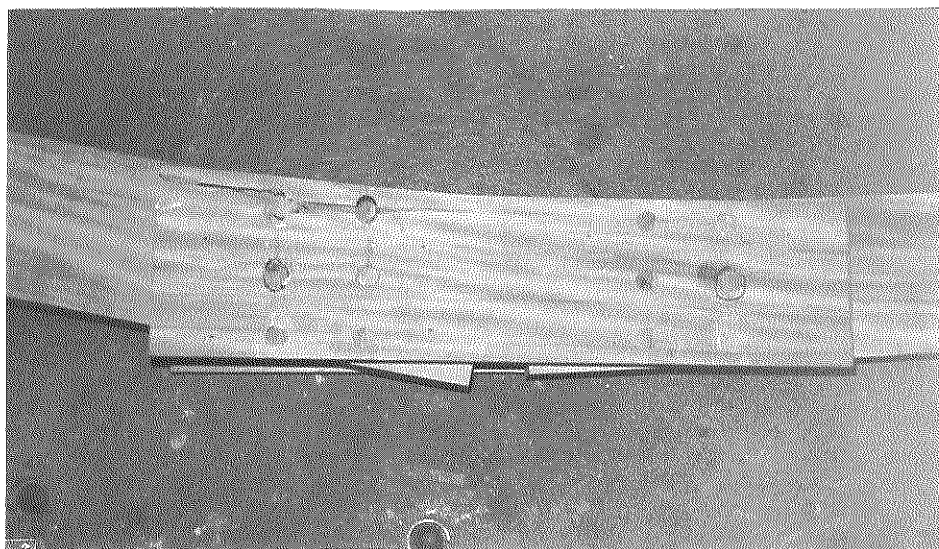


FIG. 53 — Ruptura de uma viga com emenda cavilhada

Observa-se uma flecha acentuada das vigas na ruptura. Entretanto, a ruptura nos dois casos ocorreu por insuficiência da seção transversal útil (descontando-se os furos). Na fig. 52, a ruptura ocorreu na borda inferior (tração) e na fig. 53, a ruptura ocorreu na borda superior (compressão).

Confirmou-se nesta experimentação a boa resistência mecânica das cavilhas, apesar da diminuta rigidez da ligação cavilhada fletida.

O esforço atuante nas cavilhas na ruptura, determinado conforme item 11.2, é aproximadamente igual ao esforço determinado pela equação (6) do capítulo 7.

Como conclusão, as cavilhas quando empregadas em emendas fletidas, embora tenham boa resistência mecânica, não são adequadas pela sua deformabilidade. Entretanto, sua aplicação em arcos do tipo sugerido na fig. 45, torna-se plenamente satisfatória, pois, o efeito dos esforços de flexão nesta estrutura é pouco significante, com predominância dos esforços paralelos ao eixo do arco. Em geral, o dimensionamento destes arcos é limitado pela tensão de flexo-compressão e as flechas são bastantes pequenas.

Assim sendo, o acréscimo de flecha proveniente das emendas através de cavilhas será pouco significativo. As cavilhas nestas emendas, serão responsáveis apenas pela transmissão de pequenos esforços de flexão, pois os esforços axiais de compressão devem ser transmitidos por contato direto entre as peças, fig.54.

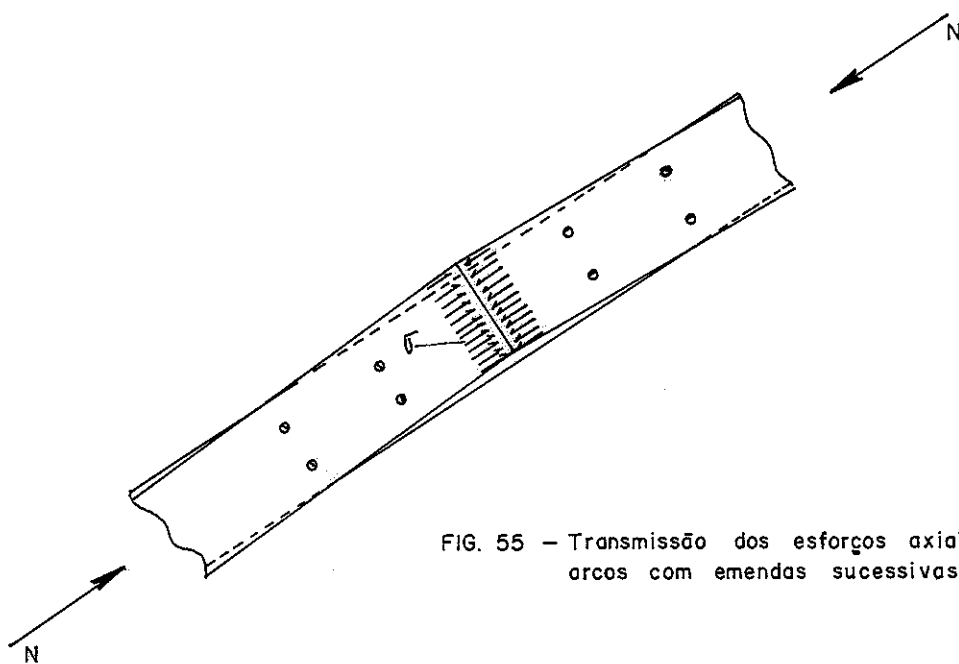


FIG. 55 - Transmissão dos esforços axiais em arcos com emendas sucessivas

Para a determinação dos esforços nas emendas fletidas aplicam-se as considerações do item 11.2. O esforço resultante na cavilha ($P_{\theta f}$) estará aplicado formando um ângulo θ em relação às fibras da madeira, aproximando-se bastante da solicitação paralela.

12. - CONCLUSÃO

Após longa e diversificada experimentação para conhecer as cavilhas partidas e sistematizar o seu cálculo, pode-se concluir:

A capacidade de carga das cavilhas partidas é considerada satisfatória para aplicação das mesmas a vários tipos de estruturas, principalmente quando as mesmas forem construídas em ambientes agressivos de indústrias químicas ou a beira mar.

O elemento responsável pela ruptura de uma ligação cavilhada é a própria cavilha, pela sua deformabilidade. Diminui-se esta deformabilidade com o aumento do diâmetro ou com o emprego de madeiras mais resistentes. Pode-se, portanto, com maior segurança, empregar as equações de cálculo para a carga de uma cavilha, em peças de Peroba Rosa e Pinho do Paraná, quando as cavilhas tiverem resistência igual ou maior que a do Eucalipto Citriodora: como por exemplo, o Ipê, a Cabreuva, o Combaru, a Massaranduba e a Aroeira.

Recomenda-se, a secagem da madeira a ser ligada e das cavilhas antes da execução dos furos e montagem, pois caso ocorra aumento de umidade da madeira após a cravação, a cavilha ficará melhor ajustada, com a diminuição do furo e com o aumento do diâmetro da cavilha.

Não se tem dados experimentais relativos ao comportamento das cavilhas partidas durante longo período de tempo. Espera-se, no entanto, um comportamento uniforme, idêntico ao da madeira na qual a cavilha fica introduzida. Quando sujeita aos ambientes agressivos, terá proteção permanente do próprio meio ácido, contra o ataque de cupins e de outros insetos prejudiciais à madeira.

O emprego de adesivos é facilitado quando se utilizam as cavilhas partidas. É bastante provável que os adesivos aumentem a duração da ligação em perfeitas condições.

Destacam-se algumas vantagens da utilização de cavilhas partidas:

- a) alta resistência à corrosão;
- b) melhor ajuste da cavilha no furo;
- c) boa resistência mecânica;
- d) baixo custo, principalmente quando se emprega madeira dura de baixo valor comercial: Eucalipto Citriodora;

e) facilidade de preparo das cavilhas, executadas com as características desejadas para cada projeto, em marcenarias ou em obras, em processo semi-industrializado;

f) facilidade de cravação em relação à cavilha comum. Quando a soma das espessuras das peças a serem ligadas é grande, os golpes para a cravação da cavilha comum podem provocar a flambagem da cavilha de comprimento mais elevado. A forma de cunhas da cavilha partida deixa a cavilha embutida no furo durante a cravação, evitando sua flambagem.

Espera-se a continuidade das pesquisas no assunto, para complementar e ampliar estes resultados, tornando o emprego das cavilhas partidas mais abrangente, através da utilização de outras espécies de madeira, indicadas para a execução de estruturas.

13 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Cálculo e execução de estruturas de madeira: procedimento - NB-11. Rio de Janeiro, ABNT, 1951. 22p.
- 2) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Ensaio físico e mecânico de madeiras: método brasileiro - MB-26. Rio de Janeiro, ABNT, 1940. 16p.
- 3) BROCHARD, Francois-Xavier- Bois et charpentes en bois: le matériau et son utilisation. Paris, Eyrolles, 1960.256p. (Collection de L'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics).
- 4) CORDOVIL, Fábio A.B. - Projeto e experimentação de pórticos planos de madeira. Orientador Prof. Dr. João Cesar Hell - meister. São Carlos, EESC-USP, 1977. 224p. Dissertação (Mestre - Eng. de Estruturas).
- 5) DAMIANO, Antonio Roque Genovez- Introdução ao estudo do módulo de elasticidade transversal e suas correlações com outras constantes elásticas da madeira. Orientador Prof. Francisco A. Rocco Lahr. São Carlos, EESC-USP, 1981. 59p. (Relatório nº 2 - Iniciação Científica).
- 6) _____ - How to design dowel joints. Lafayett, Indiana , Purdue University; Agricultural Experiment Station, May, 1970. 7p. (Research Progress Report 373).
- 7) ECKELMAN, Carl A.- Withdrawal strength of dowel joints: effect of shear strength. Forest Products Journal, 29(1): 48-52, Jan. 1979.
- 8) GIORDANO, Guglielmo- Il legno e le sue caratteristiche: trasformazioni meccaniche e miglioramenti. Milão, Ulrico Hoepli, 1951. 759p. (Tecnologia del legno).

- 9) _____ - La moderna tecnica delle costruzioni in legno. 3. ed. rev. e amp. Milão, Ulrico Hoepli, 1964.
- 10) HANSEN, Howard J.- Modern timber design. 2. ed. New York, John Wiley & Sons, 1948. 312p.
- 11) HELLMEISTER, João Cesar- Pontes de eucalipto citriodora. São Carlos, EESC-USP, 1978. 85p. Tese (Livre-docente).
- 12) HELLMEISTER, João Cesar- Sobre a determinação das características físicas da madeira. Orientador Prof. Dr. Miguel Carlos Stamato. São Carlos, EESC-USP, 1973. 119 p. - Tese (Doutor - Engenheiro).
- 13) _____ - Estruturas de Madeira. 2. ed. 4. reimp. rev. e corrig. São Carlos, EESC-USP, 1977. 113p. (Notas de aula).
- 14) HODGKINSON, Allan, ed.- Material estrutural: maderá - Estudio técnico maderá. In: Estruturas: manuales AJ. Trad. Antonio Lopera Arazola. Madri, Hermann Blume, 1976. p. 231-288. (Séccion 7).
- 15) IBM APPLICATION PROGRAM- 1130 scientific subroutine package (1130-CM-02X): programmer's manual. 14. ed. White Plains, N.Y., IBM. Sep. 1968. 134p. (H20-0252-3).
- 16) KARLSEN, G.G.- Wooden structures. Moscou, Mir Publishers, 1967. 638p.
- 17) LUCHESE, J.A.- & STAMATO, M.C.- Ligações de peças de peroba rosa com parafusos de aço. São Carlos, EESC-USP, 1967.
- 18) MOLITERNO, Antonio- Caderno de projetos de telhados em estruturas de madeira. São Paulo, Edgard Blücher, 1981. - 419p.
- 19) MATEUS, Tomás J.E.- Bases para o dimensionamento de estruturas de madeira. Lisboa, LNEC, 1962. 306p.

- 20) MATTHIESEN, José Antonio - Ligação de peças estruturais de madeira por anéis metálicos. Orientador Prof. Dr. João Cesar Hellmeister. São Carlos, EESC-USP, 1981. 138p. Dissertação (Mestre - Eng. de Estrutura).
- 21) OZELTON, E.C. & BAIRD, J.A.- Timber designer's manual. Londres, Crosby Lockwood Staples, 1976. 617p.
- 22) PEARSON, R.G. & BOYD, J.D.- Timber engineering design handbook. Melbourne, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, 1958. 248p.
- 23) PIEDADE JR., Cesar- Ligações de peças de peroba rosa e pinho do Paraná com cavilhas de eucalipto citriodora. Orientador Prof. Dr. Miguel Carlos Stamato. Botucatu, FCMBB, 1972. 123p. Tese (Doutor em Ciências).
- 24) SCHIEL, Frederico- Introdução à resistência dos materiais. 7. ed. São Carlos, EESC-USP, 1977. 137p. (Fascículo I)
- 25) SCHULTE, H. & YAGUI, T. - Estruturas de aço: elementos básicos São Carlos, EESC-USP, 1981. 347p.
- 26) SNEDECOR, George W.- Statistical methods. 5 ed. Ames, Iowa State University, 1956. 534p.
- 27) STEEL, Robert G.D. & Torrie, James H.- Principles and procedures of statistics. New York, McGraw-Hill, 1960. 481p.
- 28) SYNDICAT NTIONAL DES CONSTRUCTEURS DE CHARPENTES EM BOIS LAMELLÉ-COLLÉ- Charpentes em bois lamellé-collé. Paris, Eyrolles, 1976. 177p.
- 29) ZANDER, Júlio Ricardo Torres- Cálculo e fabricação de peças de madeira laminada. Orientador Prof. Dr. João Cesar Hellmeister. São Carlos, EESC-USP, 1979. 130p. Dissertação (Mestre - Eng. de Estruturas).

ANEXO 1 - Características gerais e resultados dos ensaios das ligações de peças de Peroba Rosa com cavilhas partidas de Eucalipto Citriodora solicitadas por compressão paralela.

P	Diâmetro	Espessura	Tens.Compr.
(N)	(mm)	das Peças (mm)	Paralela (MPa)
13783.0	12.7	30.8	51.3
11879.9	12.7	30.6	51.3
12723.5	12.7	30.6	51.3
13096.3	12.7	30.4	51.3
12880.5	12.7	30.6	51.3
12615.6	12.7	30.8	51.3
10261.2	12.7	31.0	45.2
9613.8	12.7	31.0	45.2
8721.0	12.7	31.0	45.2
10437.8	12.7	31.0	45.2
10231.8	12.7	31.6	45.2
10231.8	12.7	31.0	45.2
10467.2	12.7	31.0	45.2
9505.8	12.7	30.0	45.2
8652.4	12.7	30.0	45.2
9486.2	12.7	30.0	45.2
9868.8	12.7	31.0	45.2
9653.0	12.7	31.0	45.2
9525.5	12.7	31.0	45.2
10653.6	12.7	30.0	55.3
10634.0	12.7	30.0	55.3
10320.1	12.7	30.0	55.3
9515.7	12.7	30.0	55.3
11722.9	12.7	30.0	52.1
10369.1	12.7	30.0	52.1
10006.2	12.7	30.0	52.1
11467.8	12.7	30.0	52.1
12184.0	12.7	51.2	48.2
12517.5	12.7	51.7	48.2
9957.1	12.7	52.1	48.2
10261.2	12.7	51.7	48.2
11134.3	12.7	51.2	48.2
12909.9	12.7	51.6	51.2

cont.

P (N)	Diâmetro (mm)	Espessura das Peças (mm)	Tens.Compr. Paralela (MPa)
12635.2	12.7	51.0	51.2
12870.7	12.7	51.4	51.2
12635.2	12.7	53.7	51.2
13675.1	12.7	54.5	51.2
12792.2	12.7	54.5	51.2
12909.9	12.7	52.0	46.7
13194.4	12.7	50.4	42.1
12213.4	12.7	52.0	51.9
12272.3	12.7	51.0	40.6
15440.9	12.7	52.0	64.4
12998.2	12.7	52.0	64.4
16304.2	12.7	52.0	64.4
20257.6	19.0	30.0	54.6
16706.4	19.0	30.0	54.6
20571.5	19.0	30.0	54.6
19433.6	19.0	30.0	54.6
16912.4	19.0	30.0	44.4
16637.7	19.0	30.0	44.4
17765.9	19.0	30.0	45.1
18119.0	19.0	30.0	45.1
17422.5	19.0	30.0	59.0
17471.6	19.0	30.0	59.0
16510.2	19.0	30.0	59.0
11291.3	19.0	30.0	35.8
16735.8	19.0	30.0	35.8
18040.5	19.0	30.0	40.0
16794.7	19.0	30.0	40.0
16520.0	19.0	30.0	36.1
16009.9	19.0	30.0	36.1
18854.8	19.0	52.0	36.1
20542.1	19.0	52.0	36.1
23396.8	19.0	52.0	35.8
21130.7	19.0	52.0	35.8
22504.1	19.0	52.0	40.0

cont.

P	Diâmetro	Espessura	Tens.Compr.
(N)	(mm)	das Peças (mm)	Paralela (MPa)
17942.4	19.0	52.0	40.0
22749.3	19.0	52.0	43.6
25241.1	19.0	52.0	43.6
23857.9	19.0	52.0	40.6
22209.8	19.0	52.0	40.6
25074.3	19.0	52.0	55.5
23494.9	19.0	52.0	55.5
24917.4	19.0	52.0	55.5
26624.3	19.0	52.0	55.5
8112.8	12.7	20.0	46.6
22965.2	19.0	40.0	46.6
30538.5	25.4	60.0	46.6
9093.8	12.7	20.0	43.4
21003.2	19.0	40.0	43.4
37699.8	25.4	60.0	43.4
9221.4	12.7	20.0	40.6
21582.0	19.0	40.0	40.6
35904.6	25.4	60.0	40.6
8122.6	12.7	20.0	40.0
21738.9	19.0	40.0	40.0
37454.5	25.4	60.0	40.0
9407.7	12.7	20.0	44.7
23210.4	19.0	40.0	44.7
37454.5	25.4	60.0	44.7
8721.0	12.7	20.0	36.1
22396.2	19.0	40.0	36.1
38190.3	25.4	60.0	36.1
9329.3	12.7	20.0	46.9
23367.4	19.0	40.0	46.9
43801.6	25.4	60.0	46.9
8721.0	12.7	20.0	41.9
23612.6	19.0	40.0	41.9
39897.2	25.4	60.0	41.9
9172.3	12.7	20.0	39.3
21984.2	19.0	40.0	39.3

cont.

P (N)	Diâmetro (mm)	Espessura das Peças (mm)	Tens. Compr. Paralela (MPa)
37130.8	25.4	60.0	39.3
9044.8	12.7	20.0	39.6
21738.9	19.0	40.0	39.6
38347.2	25.4	60.0	39.6
8956.5	12.7	20.0	43.3
22965.2	19.0	40.0	43.3
40309.2	25.4	60.0	43.3
8936.9	12.7	20.0	42.1
24426.9	19.0	40.0	42.1
43477.9	25.4	60.0	42.1

--	--	--	--

--	--	--	--

--	--	--	--

--	--	--	--

--	--	--	--

--	--	--	--

ANEXO 2 - Características gerais e resultados dos ensaios das ligações de peças de Pinho do Paraná com cavilhas partidas de Eucalipto Citriodora solicitadas por compressão paralela.

P	Diâmetro	Espessura	Tens.Compr.
(N)	(mm)	das Peças	Paralela
		(mm)	(MPa)
7818.5	12.7	24.0	45.9
7700.8	12.7	24.0	46.8
6768.9	12.7	24.0	43.6
8495.4	12.7	24.0	54.8
7239.7	12.7	24.0	47.1
7053.3	12.7	24.0	45.5
6523.6	12.7	24.0	42.8
7504.6	12.7	23.0	49.1
8240.4	12.7	23.0	49.2
7553.7	12.7	23.7	45.6
7259.4	12.7	23.7	41.7
6680.6	12.7	23.5	38.2
7004.3	12.7	23.7	40.6
5817.3	12.7	24.0	38.5
6513.8	12.7	23.5	41.3
6925.8	12.7	24.0	37.9
6837.5	12.7	24.0	37.6
6513.8	12.7	22.0	44.3
7102.4	12.7	22.0	47.6
8309.0	12.7	22.0	56.0
7406.5	12.7	23.0	36.8
5601.5	12.7	23.3	33.3
10614.4	12.7	44.0	49.6
9917.9	12.7	44.0	49.6
14626.7	12.7	46.0	62.2
12841.2	12.7	46.0	62.2
9603.9	12.7	40.8	51.0
11232.4	12.7	41.2	51.0
5375.8	12.7	41.2	29.8
6729.6	12.7	41.0	29.8
8956.5	12.7	40.7	56.4
9662.8	12.7	40.5	56.4
11399.2	12.7	44.5	49.2

cont.

P	Diâmetro	Espessura	Tens. Compr.
(N)	(mm)	das Peças	Paralela
		(mm)	(MPa)
10908.7	12.7	44.5	49.2
7848.0	12.7	22.5	49.1
8191.3	12.7	23.0	49.2
7848.0	12.7	24.0	45.6
6199.9	12.7	23.7	41.7
6886.6	12.7	22.0	44.3
7318.2	12.7	22.0	47.6
7848.0	12.7	23.3	56.0
7279.0	12.7	24.1	36.8
5513.2	12.7	23.3	33.3
10074.8	12.7	46.0	49.6
10967.5	12.7	44.0	49.6
9957.1	12.7	45.0	49.6
12429.2	12.7	48.0	62.2
12998.2	12.7	46.0	62.2
12841.2	12.7	47.0	62.2
10938.1	12.7	44.0	62.2
8191.3	12.7	23.0	49.1
8044.2	12.7	23.2	49.1
6670.7	12.7	22.5	49.1
8878.0	12.7	23.0	49.2
8387.5	12.7	23.0	49.2
8583.7	12.7	23.0	49.2
7014.1	12.7	24.0	45.6
8044.2	12.7	23.7	45.6
7602.7	12.7	23.7	45.6
6199.9	12.7	23.7	41.7
6356.8	12.7	22.0	44.3
7073.0	12.7	22.0	44.3
6141.0	12.7	22.0	44.3
6042.9	12.7	22.0	47.6
7180.9	12.7	22.0	47.6
6572.7	12.7	22.0	47.6
8063.8	12.7	22.0	56.0
7406.5	12.7	23.0	36.8

cont.

P (N)	Diâmetro (mm)	Espessura das Peças (mm)	Tens.Compr. Paralela (MPa)
6405.9	12.7	23.2	36.8
7612.5	12.7	24.0	36.8
7210.3	12.7	24.0	36.8
6513.8	12.7	24.0	36.8
6945.4	12.7	24.0	36.8
6945.4	12.7	24.0	36.8
7269.2	12.7	24.0	36.8
5601.5	12.7	24.0	36.8
6121.4	12.7	24.0	36.8
5738.8	12.7	24.0	36.8
6405.9	12.7	24.1	36.8
6278.4	12.7	24.1	36.8
5659.5	12.7	23.5	33.3
5562.2	12.7	23.3	33.3
6003.7	12.7	23.5	33.3
5748.6	12.7	23.5	33.3

--	--	--	--

--	--	--	--

--	--	--	--

--	--	--	--