

LIGAÇÕES DE PEROBA-ROSA (*Aspidosperma polyneuron*) COM CAVILHAS DE EUCALIPTO (*Eucalyptus citriodora*) ^{1/}

Cezar Piedade Jr. ^{2/}

Miguel Carlos Stamato ^{3/}

Wesley Jorge Freire ^{2/}

1. INTRODUÇÃO

Esta pesquisa teve como objetivo a obtenção de melhores informações para o projeto das ligações com cavilhas. Em razão disso, teve como base uma série de ensaios experimentais. Para o material da cavilha escolheu-se o eucalipto citriodora, não só pelas suas elevadas características mecânicas, mas também por tratar-se de essência florestal largamente cultivada no Estado de São Paulo. Quanto ao material das peças a serem ligadas, escolheu-se a peroba-rosa, madeira que comumente se emprega em estruturas na Região Sul do Brasil.

Aos ensaios aqui descritos aplicaram-se as técnicas já referidas em trabalhos anteriores, de AGOSTINI *et alii* (1) e LUCHESE e STAMATO (6), nos quais os elementos de ligações eram parafusos (ou pinos) de aço e onde se pesquisou apenas a tensão de compressão na área projetada (b.8) do furo. Evidentemente, o cisalhamento nos parafusos não constitui motivo de maior preocupação; o mesmo já não se pode dizer, «a priori», em relação às cavilhas de madeira dura, conforme já foi observado em alguns ensaios conduzidos no INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (4).

^{1/} Recebido para publicação em 28-05-1980.

^{2/} Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP, «campus» de Botucatu, SP.

^{3/} Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da USP, SP.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para os diversos materiais utilizados, foram realizados alguns ensaios de caracterização, segundo os métodos recomendados por BROTERO (3).

O eucalipto citriodora, empregado nas cavilhas, apresentou uma tensão de ruptura (σ_C) à compressão simples (em pequenos corpos de prova, de $2 \times 2 \times 3$ cm, sem defeitos) que variava de 515 a 775 kgf/cm², com valor médio de 623 kgf/cm². Sua tensão de ruptura (τ_R) ao cisalhamento paralelo às fibras variou de 136 a 202 kgf/cm², com tensão média de 167 kgf/cm². O teor de umidade esteve compreendido entre 15 e 20%.

A peroba-rosa apresentou umidade variável de 18 a 25%. Os corpos de prova tiveram as seguintes tensões médias (σ_C) à compressão simples: 456 kgf/cm² nas peças usadas nas ligações paralelas e 518 kgf/cm² nas peças das ligações cruzadas.

Os corpos de prova, depois de serrados e aparelhados, tiveram suas peças central e lateral (duas) provisoriamente unidas por grampos metálicos, a fim de melhorar a furação do conjunto, para que fosse garantida a boa coincidência dos furos nas três peças. Adotou-se diâmetro de cavilha levemente maior que o do furo (de 0,1 a 0,2 mm), para realizar ajustes sem folgas; nessa operação, a cavilha e as demais peças cedem, principalmente por compressão normal às fibras, sem que ocorra fendilhamento das peças central e lateral.

Os corpos de prova eram simétricos, sendo a espessura b da peça central o dobro da espessura $b/2$ de cada peça lateral, como se vê na Figura 1. Os espaçamentos das cavilhas obedeceram, tanto quanto possível, ao disposto no Art. 42 da NB-11 da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2), para as ligações com parafusos.

Os experimentos foram efetuados numa prensa Universal Amsler, de 25 t, e a velocidade de carregamento foi da ordem de 30 a 40 kgf/cm²/min (referente à área $b \cdot \delta$), exceto nas vizinhanças da ruptura, onde as deformações aumentavam rapidamente quando era pequena a velocidade de carregamento. Numa e noutra face do corpo de prova, paralelas ao eixo da cavilha, instalaram-se defletômetros, que mediam os deslocamentos da peça central em relação às laterais. Tomavam-se as médias dos deslocamentos dos dois defletômetros para corrigir possíveis rotações

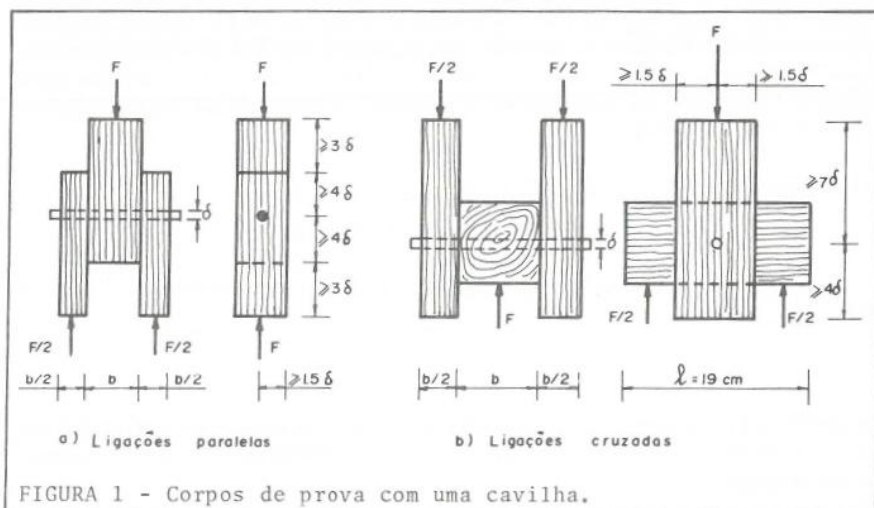


FIGURA 1 - Corpos de prova com uma cavilha.

em torno da cavilha, causadas por excentricidade de carga ou defeito de assimetria dos corpos de prova.

O Art. 66 da NB-11 recomenda que a carga admissível (\bar{F}) numa ligação seja considerada como sendo o menor dentre os valores seguintes:

- I) — 50% do limite de proporcionalidade, F_{prop} ;
- II) — 20% do limite de ruptura, F_{rup} ;
- III) — força $F_{1,5}$, que provoca o deslocamento relativo de 1,5 mm entre as peças ligadas.

Nos ensaios realizados, F_{rup} e $F_{1,5}$ foram medidos por meio dos diagramas esforço x deslocamento relativo. Com relação a F_{prop} , esses mesmos diagramas mostraram, mais uma vez, conforme LEITNER (5), não existir um limite de proporcionalidade de determinação menos discutível, pois a inclinação das curvas variava de modo gradual e contínuo. Por isso, abandonou-se a restrição I) do Art. 66 da NB-11 e \bar{F} foi tomado como sendo o menor dos valores $F_{1,5}$ e $0,2 F_{rup}$. Para o conjunto dos ensaios, verificou-se que o valor preponderante na fixação de \bar{F} foi $0,2 F_{rup}$; tal fato ocorreu em 97% dos casos. Em razão de predominância tão acentuada, decidiu-se adotar, para todos os casos, $\bar{F} = 0,2 F_{rup}$.

A notação adotada, além da já anteriormente definida, foi a seguinte:

σ_P = tensão de compressão, na ruptura, na área projetada ($b \cdot \delta$) do furo, para as ligações paralelas (Figura 1 a).

σ_N = idem, para as ligações cruzadas (Figura 1 b).

τ_P = tensão de cisalhamento, na ruptura, nos dois planos de corte da cavilha (área total = $2 \cdot \pi \delta^2 / 4$), para as ligações paralelas (Figura 1 b).

τ_N = idem, para as ligações cruzadas (Figura 1 b).

Nos ensaios, efetuou-se a determinação experimental dessas tensões, a partir de F_{rup} , para diversos valores de relação de esbeltez (b/δ) da cavilha. Posteriormente, determinaram-se as equações de regressão de σ_P , τ_P , σ_N e τ_N , em função de b/δ , e, por comparação dos σ e τ relativos ao mesmo tipo de ligação, escolheu-se a função (σ ou τ) mais representativa do comportamento das ligações.

A relação b/δ situou-se dentro da faixa dos problemas da prática. Para tanto, variou-se a largura b da peça central e utilizaram-se cavilhas com cinco diferentes diâmetros, mais próximos dos encontrados na prática profissional, isto é: 1,5 – 1,8 – 2,0 – 2,2 – 2,5 cm. De modo geral, a relação b/δ variou de 2 a 8. Apenas em alguns casos, com os menores δ (de 1,5 a 1,8 cm), a relação b/δ foi elevada, respectivamente, até 12 e 10. Note-se, contudo, que os valores $b/\delta > 8$ já têm interesse prático muito reduzido. Nesses corpos de prova, que tinham uma única cavilha, cada exemplar de ligação (mesma madeira e mesmos valores de b e δ) foi executado e ensaiado com 4 repetições.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As tensões τ (isto é, τ_P ou τ_N) foram ajustadas, em função de b/δ , segundo a reta

$$\tau = A + B (b/\delta) \dots\dots\dots (1)$$

tendo em vista a maneira como se dispersaram os pontos representativos dos ensaios, considerando também os ensaios parciais de BROTERO (3), que encontrou τ = constante.

As tensões σ (isto é, σ_P ou σ_N) foram ajustadas, em função de b/δ , segundo a hipérbole

$$\sigma = C \left(\frac{b}{\delta}\right)^{-D} \quad (2)$$

Essa hipótese baseou-se numa série de gráficos preliminares, bem como nos ensaios de ligações com parafusos realizados por TRAYER (9), nos quais se encontrou uma hipérbole equilátera ($D = 1$). Na forma logarítmica, a equação (2) é expressa por

$$\log_N \sigma = \log_N C - D \log_N (b/\delta) \quad (3)$$

que transforma a hipérbole em reta, no papel bilogarítmico.

As equações de regressão foram encontradas por análise estatística, realizada por meio de programa em linguagem FORTRAN. Nessa análise usaram-se as seguintes notações e abreviaturas:

- C.V. = coeficiente de variação, em %.
- r^2 = coeficiente de determinação da regressão.
- «F» = valor do teste «F».
- «t_A» = valor do teste «t» para o parâmetro A (ou $\log_N C$) da regressão (ver equações 1 e 3).
- «t_B» = valor do teste «t» para o parâmetro B (ou D) da regressão (ver equações 1 e 3).
- ** = significativo ao nível de 1%.
- * = significativo ao nível de 5%.
- n.s. = não significativo.

A ajustagem geral forneceu os seguintes resultados:

$$\tau_P = 348,358 + 4,859 (b/\delta) \quad (4)$$

$$\log_N \sigma_P = 6,244 - 0,923 \log_N (b/\delta) \quad (5)$$

$$\tau_N = 326,405 + 20,580 (b/\delta) \quad (6)$$

$$\log_N \sigma_N = 6,086 - 0,731 \log_N (b/\delta) \quad (7)$$

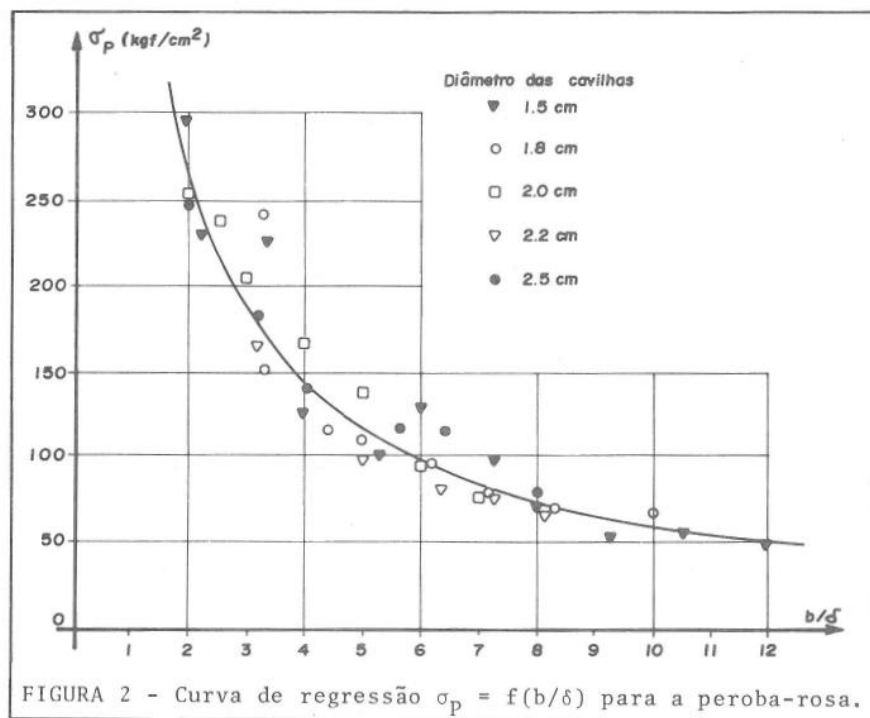
No Quadro 1 vêem-se os parâmetros estatísticos obtidos com as ajustagens.

Os valores obtidos com a função $\sigma = f(b/\delta)$ forneceram valores significativos de «F», ao nível de 1%, baixos coeficientes de variação e altos coeficientes de determinação. Tais considerações indicam que as equações (5) e (7) traduzem melhor que as equações (4) e (6) o comportamento das ligações nos ensaios. Noutras palavras, σ_P e σ_N são funções mais representativas que τ_P e τ_N . As Figuras 2 e 3 mostram as curvas de regressão de σ_P e σ_N para a peroba-rosa, assim como as determinações experimentais, indicadas por pontos, que representam as médias das 4 repetições de cada exemplar.

Definida a função que melhor representava os ensaios, restou uma última correção por fazer. A tensão de ruptura à compressão simples da peroba-rosa, referida na NB-11, é $\sigma_C = 423 \text{ kgf/cm}^2$, ao passo que as amostras ensaiadas apresentaram, conforme foi mencionado anteriormente, valores médios de $\sigma_C = 456 \text{ kgf/cm}^2$ (ligações paralelas) e $\sigma_C = 518 \text{ kgf/cm}^2$ (ligações cruzadas). Na tentativa de transpor os resul-

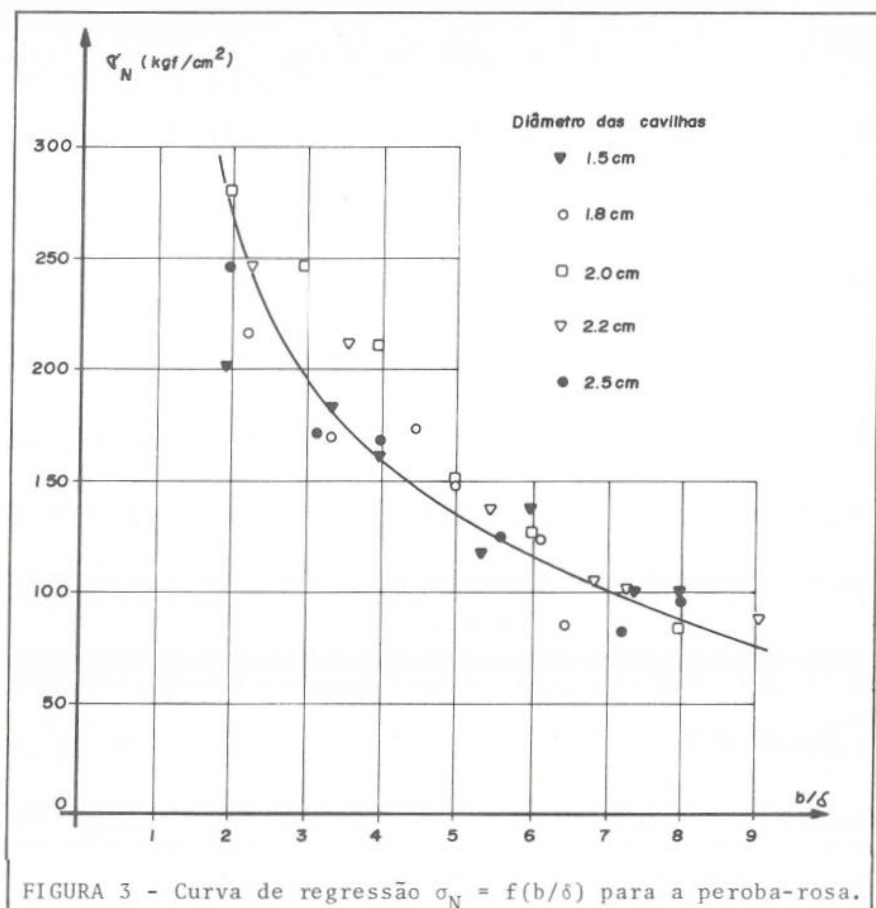
QUADRO 1 - Equações de regressão para $\sigma = f(b/\delta)$ e $\tau = (b/\delta)$

Equação	C.V.	r^2	t_A	t_B	"F"
(4)	14,68	0,048	32,900**	2,832**	8,020**
(5)	3,00	0,911	161,806**	40,346**	1627,836**
(6)	16,88	0,254	18,789**	6,445**	41,539**
(7)	3,31	0,804	117,299**	22,396**	501,571**



tados das amostras ensaiadas para a população (considerada como tendo a média σ_C da NB-11), supôs-se, para as tensões na área projetada do furo, a permanência da mesma proporção existente entre os valores médios de σ_C da amostra e da população. Desse modo, os valores de σ_P e σ_N dados pelas equações (5) e (7) foram multiplicados, respectivamente, pelos coeficientes 423/456 e 423/518. Depois de efetuada tal correção, a expressão da carga admissível na ligação, tendo em vista a equação (2), ficou sendo

$$\bar{F} = 0,2 F_{rup} = 0,2 b \cdot C \left(\frac{b}{\delta} \right)^{-D} \quad \dots\dots\dots (8)$$



que pode ser abreviada para

$$\bar{F} = K \delta^2 \dots\dots\dots (9)$$

em que

$$K = 0,2 C \left(\frac{b}{\delta}\right)^{1-D} \dots\dots\dots (10)$$

Os valores de K (isto é, K_P para as ligações paralelas e K_N para as ligações cruzadas) são homogêneos a uma tensão e dependem de b/δ . Os valores experimentais de K_P e K_N , para a peroba-rosa, encontram-se no Quadro 2.

Não foram feitos ensaios para $b/\delta < 2$. Em ligações com cavilhas de esbelteza tão baixa, a solicitação predominante deve ser a compressão normal às fibras. Para $b/\delta < 2$, convém adotar, a favor da segurança, tensão admissível constante na área projetada ($b \cdot \delta$) do furo; tal tensão seria igual à que ocorre para $b/\delta = 2$ e que vale 50,5 kgf/cm² (ligações paralelas) ou 43,5 kgf/cm² (ligações cruzadas). Observa-se, também, que devem ser encarados com alguma reserva os valores de K_N maiores que os correspondentes K_P , como ocorre para $b/\delta \geq 5$.

QUADRO 2 - Valores de K_P e K_N para a peroba-rosa

b/δ	K_P (kgf/cm ²)	K_N (kgf/cm ²)
2	101	87
3	104	97
4	106	105
5	109	111
6	110	117
7	111	122
8	112	127

4. CONCLUSÕES

Esta pesquisa permitiu, para os ensaios realizados e dentro dos critérios expostos, a determinação da carga admissível para a ligação com uma cavilha, do seguinte modo:

a) para $b/\delta < 2$,

$$\bar{F} = \sigma \cdot b \cdot \delta \dots\dots\dots (11)$$

em que σ vale 50,5 kgf/cm² nas ligações paralelas e 43,5 kgf/cm² nas ligações cruzadas (tais valores, como se pode deduzir facilmente, correspondem, respectivamente, às metades de K_P e de K_N encontradas para $b/\delta = 2$).

b) para $2 \leq b/\delta \leq 8$,

usa-se a equação (9), com o parâmetro K retirado da tabela anterior (em função de b/δ), desde que não se considere K_N maior que K_P .

Conhecida a carga admissível de uma cavilha para a ligação simétrica (com a peça central de espessura tendo o dobro da espessura de cada peça lateral), é possível determinar a carga admissível noutros tipos de ligações, com espessuras em proporções diferentes e até mesmo em ligações excêntricas. Os critérios para tais extrapolações encontram-se nas Normas Americanas (7, 8), parte das quais é reproduzida no Art. 67 da NB-11.

5. RESUMO

Vêem-se neste trabalho os resultados de ensaios realizados em 316 corpos de prova, constituídos por peças de peroba-rosa (*Aspidosperma polyneuron*) ligadas entre si por cavilhas de eucalipto citriodora (*Eucalyptus citriodora*).

Os ensaios visavam à determinação da carga admissível nessas ligações quando as peças ligadas eram paralelas (solicitação paralela às fibras) ou cruzadas a 90° (solicitação normal às fibras).

Pesquisou-se, entre a tensão de compressão na área projetada ($b \cdot \delta$) do furo e a tensão de cisalhamento nos dois planos de corte da cavilha, a que melhor representaria a resistência da ligação de acordo com a esbeltez (b/δ) da cavilha (b = largura da

peça central; δ = diâmetro da cavilha). A análise estatística mostrou ser mais representativa a tensão de compressão na área projetada ($b\delta$) do furo.

6. SUMMARY

The present research was carried out using 316 symmetrical wood testing pieces made of «peroba-rosa» (*Aspidosperma polyneuron*). The pieces were fastened by using wooden pegs made of *Eucalyptus citriodora*. The pegs had the usual dimensions.

The pegs were subject to compression forces perpendicular or parallel to the direction of the fibers of the testing pieces. The tests led to the determination of the function $\sigma = f(b/\delta)$ and $\tau = f(b/\delta)$, where σ is the compression force on the surface area of the hole in the central piece, τ is the shear stress on the two cutting edges of the peg, b is the width of the central piece and δ is the diameter of the peg.

The comparison between the two functions, σ and τ , showed that the function $\sigma = f(b/\delta)$ was a better representative of the behavior of the bond. This observation led to the conclusion that for bonds with only one peg the adequate function is $F = K\delta^2$, where F is the greatest load on the bond, K is a factor obtainable from tables and δ is the diameter of the peg. Although this function was determined for symmetrical testing pieces it is also useful for non-symmetrical bonds.

7. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado graças ao auxílio financeiro recebido da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Processo FAPESP 68/851).

8. LITERATURA CITADA

1. AGOSTINI, L.R.S., CATTO, A.J. & STAMATO, M.C. *Ligações de peças de Pinho do Paraná e de Eucalipto Citriodora com parafusos de aço*. São Carlos, SP, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1971. 18 p. (Publicação n.º 160).
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NB-11. *Cálculo e execução de estruturas de madeira*. Rio de Janeiro, 1960. 26 p.
3. BROTERO, P.A. *Métodos de ensaios adotados no I.P.T., para o estudo de madeiras nacionais*. São Paulo, Inst. Pesq. Tecnol. n.º 31, 1956, 28 p. (Bol. n.º 31).
4. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Ensaio de tração de peças de peroba ligadas com cavilhas de Ipê*. São Paulo, 1951, 8p. (Certificado Oficial, 97.600).
5. LEITNER, R.J. *As ligações em estruturas de madeira e em especial as ligações pregadas de peças estruturais de madeira de pinho*. Curitiba, 1952. 27 p.
6. LUCHESE, J.A. & STAMATO, M.C. *Ligações de peças de peroba-rosa com parafusos de aço*. São Carlos, SP, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1967. 42p. (Publicação n.º 147).
7. NATIONAL LUMBER MANUFACTURERS ASSOCIATION. *National design specification for stress-grade lumber and its fastenings*. Washington, 1955. 65p.
8. TIMBER ENGINEERING COMPANY. *Timber design and construction handbook*. New York, F.W. Dodge Corp, 1956. 524p.
9. TRAYER, G.W. *Strength of wood under bolts*. Washington, U.S. Dep. Agric., 1932. (Tech. Bull. N.º 332).