

Vigas pregadas de madeira com seção composta I

Nailed timber beams with I composed section

Jorge Luís Nunes de Góes¹; Antonio Alves Dias²

Resumo

O emprego de peças compostas de madeira, formadas pela união de peças de dimensões comerciais, vem alcançando importância no setor de estruturas de madeira do Brasil, principalmente em virtude da gradativa escassez de peças de grandes dimensões. As peças compostas possuem vasta aplicação, desde vigas para edificações residenciais até longarinas de pontes de pequenos vãos. Este trabalho tem como objetivo o estudo teórico e experimental de vigas pregadas de madeira com seção composta I. São apresentados e avaliados os procedimentos de cálculo das normas EUROCODE 5/93 e NBR 7190/97, bem como a teoria a respeito do assunto. A aferição experimental dos modelos teóricos em estudo foi feita por meio de ensaios de flexão em protótipos de vigas compostas. Os resultados obtidos demonstram que o modelo do EUROCODE 5/93 é o mais indicado para estimar a rigidez efetiva, tensões normais e de cisalhamento, bem como a força nos conectores.

Palavras Chave: vigas compostas; estruturas de madeira, rigidez de ligações.

Abstract

The employment of built-up timber beams, made of commercial dimensions pieces, is becoming increasingly important in timber structures in Brazil, mainly due to the ever-growing scarcity of timber elements in larger sizes. The built-up system has vast application, from beams for residential buildings to girders for small bridges. The objective of this work is the theoretical and experimental study of nailed timber beams with composed cross section I. The design procedure of EUROCODE 5/93 and NBR 7190/97 are shown and evaluated, as well as the theory about the subject matter. The experimental evaluation of the theoretical models was made by means of bending tests in prototypes of built-up timber beams. The obtained results shows that the EUROCODE 5/93 procedure is the most indicated for evaluating effective bending stiffness, normal and shear stresses as well as the load on fasteners.

Key Words: built-up beams; timber structures, connections rigidity.

¹ Mestre em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, E-mail jgoes@sc.usp.br . Av. Trabalhador São-carlense, 400, Centro, CEP 13566-590, LaMEM, São Carlos-SP, Tel. (0xx16) 273-9369

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, E-mail dias@sc.usp.br. Tel/fax. (0xx16) 273-9483.

1 Introdução

O emprego de peças compostas de madeira, formadas pela união de peças de dimensões comerciais, vem alcançando importância no setor de estruturas de madeira do Brasil, principalmente em virtude da gradativa escassez de peças de grandes dimensões.

As seções transversais das vigas compostas de madeira podem ser obtidas pela união de peças de madeira serrada ou de outros materiais, como os derivados de madeira (compensado, OSB – Oriented Strand Board, LVL – Laminated Veneer Lumber). Da mesma forma, existem vários tipos de ligações

que podem ser empregadas para a união das peças. As ligações podem ser divididas em dois grandes grupos: uniões mecânicas (pregos, parafusos, cavilhas, anéis metálicos, etc.) e uniões adesivas (cola).

Assim, ficam evidentes as inúmeras formas de composição das peças de madeira. Dentre as mais utilizadas, podem ser citadas a Madeira Laminada Colada, as peças compostas com alma em compensado ou OSB, e as vigas compostas por peças de madeira serrada ligadas por pregos. As figuras a seguir ilustram exemplos de vigas compostas de madeira e seu emprego no setor residencial.



Figura 1 – Viga composta com alma em chapa de compensado utilizada em cobertura.



Figura 2 – Viga de Madeira Laminada Colada e sua utilização como barrote de piso.



Figura 3 – Viga composta pregada utilizada como viga principal de pavimento.

Este trabalho tem como enfoque o estudo das vigas pregadas de madeira com seção composta I, conforme ilustrado na Figura 3.

Esta forma de composição não permite emendas longitudinais, estando seu comprimento restrito ao tamanho usual das peças de madeira serrada. A facilidade e o baixo custo de produção, fazem com que estas vigas compostas sejam extensamente utilizadas como vigas de uso residencial, para 3 a 6 metros de vão, como também para longarinas de pequenas pontes com até 8 metros de vão.

Os elementos de ligação mais utilizados para a solidarização das peças de madeira são os adesivos e os pinos metálicos. Apesar da indiscutível eficiência dos adesivos, necessitam maiores cuidados para a sua aplicação, o que torna os pinos metálicos

os elementos de ligação mais utilizados no Brasil. Entre os pinos metálicos, utilizam-se especialmente os pregos, devido à facilidade de aplicação e baixo custo.

As ligações por pinos metálicos permitem o deslizamento entre as peças unidas. Esse deslizamento, cuja magnitude depende da rigidez da ligação, causa redução nas propriedades mecânicas da peça composta.

Fica caracterizada, assim, a importância da quantificação da rigidez das ligações para as peças compostas. Sabe-se que a rigidez é influenciada por vários fatores, podendo-se citar o tipo, o espaçamento e a quantidade dos elementos de ligação, além das características físicas (resistência e elasticidade) da madeira utilizada.

Em contradição ao exposto, a norma brasileira NBR 7190/97 “Projeto de Estruturas de Madeira” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997) apresenta uma metodologia simplificada de cálculo para o dimensionamento de peças com seção transversal composta. Recomenda-se a redução da inércia da peça, por meio de coeficientes que consideram a solidarização parcial das peças que compõem a seção transversal e esses coeficientes por sua vez, são apresentados conforme o arranjo da seção transversal, não levando em conta a rigidez da ligação.

O objetivo deste trabalho é fazer a avaliação teórica e experimental de modelos de cálculo para as peças justapostas de seção T, I e Caixão, permitindo um melhor conhecimento do comportamento e resistência de peças compostas, tornando as estruturas de madeira cada vez mais competitivas, divulgadas e aceitas pelos projetistas.

2 Conceitos Básicos

Segundo a hipótese de Navier, uma viga maciça apresenta, numa seção transversal qualquer, distribuição contínua de deformações longitudinais ao longo de sua altura, Figura 4-(a). Por outro lado, numa peça de elementos independentes sobrepostos, isto é, sem nenhum tipo de conector interligando-os, a distribuição das deformações é contínua somente ao longo da altura de cada elemento. Nas superfícies de separação são observadas descontinuidades decorrentes do comportamento individualizado (Figura 4-(b)).

Quando os elementos constituintes de uma viga composta estiverem interligados, os conectores restringem parte dos deslizamentos relativos que ocorrem entre as peças independentes, produzindo uma interação entre eles. A distribuição das deformações nessa viga ainda apresenta as descontinuidades nas interfaces; entretanto, essas deformações são inferiores às verificadas na peça de elementos independentes, Figura 4-(c).

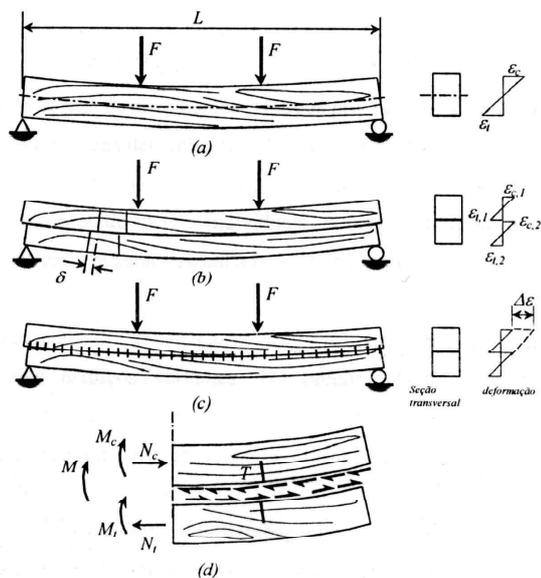


Figura 4 – Deformação de uma barra fletida. (a) seção maciça; (b) barras sobrepostas; (c) seção composta interligada por pinos metálicos; (d) esforços solicitantes. Fonte: ALVIM (2002)

Diante do exposto, fica evidenciada a principal característica das vigas compostas: o comportamento mecânico interposto ao das vigas maciças e ao das peças de elementos independentes.

O comportamento intermediário é influenciado diretamente pela rigidez dos elementos de ligação utilizados para a sua solidarização. Considerando o emprego de uma ligação “perfeitamente rígida”, não surgem deslocamentos relativos entre os pontos da borda que delimitam a zona de contato entre as peças.

Na teoria, tais peças podem ser consideradas como de seção homogênea, supondo uma seção transversal equivalente à soma de todas as outras seções transversais individuais, aplicando-se a teoria clássica da flexão para vigas. Contudo, os dispositivos de ligação usados nos casos correntes de projeto são deformáveis. Com isso, tem-se uma “ligação elástica”, onde após a deformação da peça por flexão ocorrem escorregamentos das porções interligadas, ocasionados pela deformabilidade dos conectores.

O aparecimento desses deslocamentos relativos produzem uma distribuição de esforços internos que difere consideravelmente daquela correspondente às ligações rígidas. Portanto, o momento de inércia e o módulo de resistência das peças compostas, unidas por conectores deformáveis, passam a ser uma fração daqueles correspondentes às peças consideradas maciças. A magnitude dessa fração dependerá de parâmetros geométricos da viga, bem como de uma série de fatores que caracterizam a rigidez da ligação.

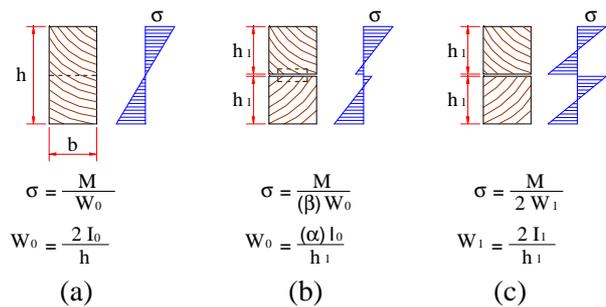
O efeito da composição dessas peças é garantido pela transmissão dos esforços cortantes por meio da ligação. Os conectores devem suportar as tensões de cisalhamento distribuídas na região de contato entre as peças, Figura 4-(d). Desse modo, é estabelecido um certo grau de monolitismo entre as peças justapostas.

Então, fica evidente a necessidade de utilização de critérios especiais para o correto dimensionamento dos elementos estruturais formados de peças compostas. Atualmente são utilizados basicamente dois métodos distintos, adotados pelos principais documentos normativos do mundo, para o dimensionamento de peças compostas: o método dos coeficientes de minoração e o método analítico. Estes métodos estão apresentados nos itens seguintes.

3 Método dos coeficientes de minoração

O método dos coeficientes de minoração consiste na aplicação de coeficientes redutores sobre as propriedades estáticas das peças compostas. Os coeficientes de minoração ou de eficiência têm a função de estabelecer a correspondência entre peças compostas e maciças. Para isso, são necessários dados experimentais adequados para estabelecer essa correspondência.

A Figura 5 ilustra o comportamento das peças compostas e o uso dos coeficientes de minoração, quanto à distribuição das tensões normais devidas à flexão.



Fonte: Gehri (1988)

Figura 5 – Distribuição das tensões normais devidas à flexão: (a) seção com dois elementos sobrepostos; (b) seção composta interligada por união deformável; (c) seção maciça equivalente.

A norma NBR7190/97 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997) apresenta um critério de dimensionamento baseado neste método. A determinação das tensões normais e dos deslocamentos máximos são feitas considerando a redução do momento de inércia. Já a verificação das tensões cisalhantes, bem como da força atuante nos conectores, é feita como se a viga fosse de seção maciça. O momento de inércia efetivo é dado por:

$$I_{ef} = \alpha_r \cdot I_{th} \quad (1)$$

Sendo I_{th} é o momento de inércia da seção total da peça como se ela fosse maciça, sendo

- para seções T: $\alpha_r = 0,95$
- para seções I ou Caixão: $\alpha_r = 0,85$

Apesar de proporcionar agilidade ao cálculo, em método não considera diversos fatores envolvidos na análise. Por este motivo, alguns documentos normativos, que anteriormente adotavam-no, optaram pelo método analítico, após revisão.

4 Método analítico baseado nas equações de equilíbrio

Esse modelo consiste na análise da viga como sendo formada por elementos em equilíbrio, considerando a existência de compatibilidade de deslocamentos entre eles.

Tomando uma viga composta, biapoiada, solicitada por um carregamento transversal qualquer, surgem os esforços internos $M(x)$ e $V(x)$. Esses esforços internos podem ser decompostos para cada elemento componente da seção transversal, e sobre eles atuam forças normais e cisalhantes, além dos momentos. Esses esforços são equilibrados pelo fluxo de cisalhamento atuante na interface entre as mesas e a alma. A partir da distribuição de esforços descrita, é apresentada a configuração do diagrama de deformações normais, devido aos momentos e as forças normais. As deformações devidas aos esforços cisalhantes não são consideradas. A Figura 5 ilustra esse desenvolvimento.

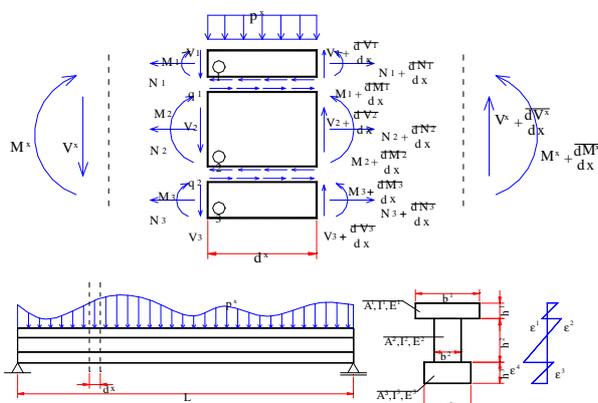


Figura 5 – Viga composta de três elementos com seção transversal genérica, distribuição de deformações e esforços internos para um elemento diferencial.

Todo o desenvolvimento dessa teoria é baseado em hipóteses nas quais a linearidade entre causa e efeito é sempre observada. Admite-se a validade das seguintes hipóteses:

- As uniões entre os elementos são contínuas, distribuídas uniformemente e apresentam as mesmas propriedades mecânicas em todo o comprimento da viga.

- O deslocamento relativo da região correspondente à superfície de contato dos elementos é diretamente proporcional ao esforço atuante na conexão.
- Os deslocamentos verticais dos elementos da viga composta, tomadas em qualquer posição ao longo do comprimento, são sempre as mesmas para todos os elementos.
- A distribuição das deformações ao longo da altura dos elementos da viga composta é linear.
- Os elementos constituintes da viga composta seguem a lei de Hooke.
- Os deslocamentos verticais são pequenos.
- São desprezadas as deformações produzidas pelo esforço cortante, no cálculo dos deslocamentos das seções transversais.

A adoção da primeira hipótese significa o estudo de um caso particular de vigas compostas. O fato de se considerar a superfície fictícia de interligação com propriedades mecânicas invariantes, implica ter-se os conectores aplicados em arranjos regulares por todo o plano de separação dos elementos.

Com a segunda hipótese, fica assumido um comportamento linear para o conector isolado. Tal fato, entretanto, por vezes não é confirmado experimentalmente em ensaios dos conectores isolados. Porém, a determinação da característica de rigidez com base na inclinação de reta secante à curva experimental do conector isolado, e o seu posterior emprego nas expressões teóricas, conduzem a resultados coerentes com os de experimentação de vigas.

A integridade da viga composta é admitida na terceira hipótese. As demais se enquadram no grupo de hipóteses da modelagem de Bernoulli-Navier, para a flexão de vigas ordinárias.

A norma européia, EUROCODE 5/93, (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 1993) apresenta o critério de dimensionamento para vigas compostas unidas por conectores metálicos (uniões flexíveis), baseado no método analítico. Segundo esta norma, o módulo de deslizamento é determinado em

função da densidade da madeira e do diâmetro do pino utilizado. No caso de ligações com pré-furação, os valores de K são dados por:

$$K_u = \frac{2}{3} \cdot K_{ser} \quad (2)$$

$$K_{ser} = \frac{\rho_k^{1,5} \cdot d}{20} \quad (3)$$

onde:

$K = K_u$ para os estados limites últimos (N/mm);

$K = K_{ser}$ para os estados limites de utilização (N/mm);

d é o diâmetro do prego em mm;

ρ_k é a densidade da madeira em kg/m³; se as peças forem de madeiras diferentes deve-se utilizar uma densidade equivalente $\rho_k = \sqrt{\rho_{k1} \cdot \rho_{k2}}$.

A partir deste módulo de deslizamento, é definido o fator de redução de inércia do conjunto, levando em consideração além do tipo de união, a disposição e espaçamento dos elementos de ligação, o tipo de madeira, a forma de montagem e proporção das peças individuais e o vão entre apoios da viga composta.

$$\gamma_2 = 1 \quad \text{e} \quad \gamma_i = \left[1 + \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot A_i \cdot s_i}{K_i \cdot L^2} \right]^{-1} \quad \text{para } i = 1 \text{ e } 3 \quad (4)$$

onde:

E_i = módulo de elasticidade de cada elemento da seção transversal;

A_i = área de cada parte da seção transversal;

s_i = espaçamento dos pregos na interface do elemento i com o elemento 2;

K_i = módulo de deslizamento da ligação do elemento i com o elemento 2;

L = vão efetivo da viga ($L =$ vão, para vigas biapoiadas), ($L = 0,8 \times$ vão, para vigas contínuas) e ($L = 2 \times$ vão, para vigas em balanço).

O espaçamento dos pregos pode ser uniforme ou variar conforme a força de cisalhamento, entre um valor mínimo s_{\min} e s_{\max} , sendo $s_{\max} \leq 4 \times s_{\min}$. Nesse último caso um valor efetivo de espaçamento pode ser usado, dado por:

$$s_{ef} = 0,75 \cdot s_{\min} + 0,25 \cdot s_{\max} \quad (5)$$

A distância entre os centros de gravidade da seção até a linha neutra da peça (ver Figura 6) é dado por:

$$a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot (h_1 + h_2) - \gamma_3 \cdot E_3 \cdot A_3 \cdot (h_2 + h_3)}{2 \cdot \sum_{i=1}^3 \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i}$$

$$a_1 = \left(\frac{h_1 + h_2}{2} \right) - a_2 \quad \text{e} \quad a_3 = \left(\frac{h_2 + h_3}{2} \right) + a_2 \quad (7)$$

onde:

a_i = distância do centróide da área de cada elemento que compõe a seção transversal até a linha neutra y -, desde que a_2 não seja menor que zero e não maior que $h_2/2$;

h_i = altura de cada parte dos elementos componentes da seção transversal com h_3 nulo para seção T;

b_i = largura de cada parte dos elementos componentes da seção transversal;

Assim é possível o cálculo da rigidez efetiva levando em consideração a rigidez da ligação.

$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^3 (E_i \cdot I_i + \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i^2) \quad (8)$$

onde:

I_i = momento de inércia de cada elemento componente da seção transversal ($I_i = b_i \cdot h_i^3 / 12$).

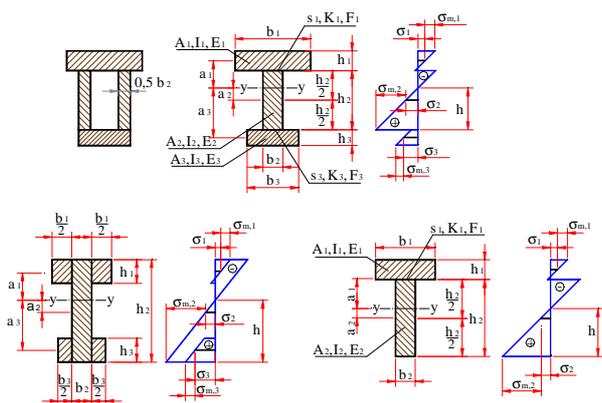


Figura 6 – Seções transversais e distribuição de tensões do EUROCODE 5.

Da mesma forma, são equacionadas as tensões normais e cisalhantes atuantes nas peças, bem como a força aplicada nos elementos de ligação ocasionada pelo deslizamento entre as peças.

Para vigas com geometria de seção transversal (conforme as da Figura 6), as tensões normais devem ser calculadas como mostrado a seguir:

$$\sigma_i = \gamma_i \cdot E_i \cdot a_i \cdot \frac{M}{(EI)_{ef}} \quad (9)$$

$$\sigma_{m,i} = 0,5 \cdot E_i \cdot h_i \cdot \frac{M}{(EI)_{ef}} \quad (10)$$

onde:

M = momento fletor;

s_i e $s_{m,i}$ = respectivamente as tensões no centróide e nas extremidades dos elementos da seção transversal.

A máxima tensão cisalhante ocorre onde a tensão normal é nula. A tensão máxima de cisalhamento na alma da viga pode ser obtida como:

$$\tau_{2,max} = (\gamma_3 \cdot E_3 \cdot A_3 \cdot a_3 + 0,5 \cdot E_2 \cdot b_2 \cdot h^2) \cdot \frac{V}{b_2 \cdot (EI)_{ef}} \quad (11)$$

onde:

V = força máxima de cisalhamento.

E por fim apresenta-se a equação para o cálculo da carga aplicada no conector.

$$F_i = \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i \cdot s_i \cdot \frac{V}{(EI)_{ef}} \quad \text{para } i = 1 \text{ e } 3 \quad (12)$$

5 Ensaios em vigas compostas

Para aferição dos modelos de dimensionamento de vigas compostas, foram conduzidos ensaios experimentais de flexão em 9 protótipos (3 de cada espécie) de seção I simétrica, formadas por peças de seções comerciais, solidarizadas continuamente por pregos. As espécies nativas de madeira utilizadas foram o Angelim Pedra Verdadeiro – *Dinizia excelsa* (alta densidade) e o Cedrilho – *Erismia spp* (média densidade). A espécie de reflorestamento utilizada foi o Pinus Hondurensis – *Pinus caribea var. hondurensis* (baixa densidade).

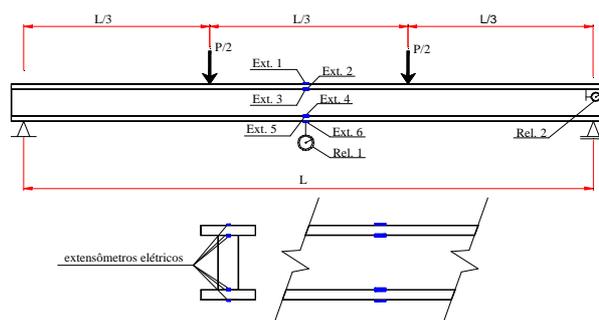
A Tabela 1 apresenta a geometria da seção transversal, o comprimento, vão do ensaio, tipo de ligação e espécie de madeira utilizada para as vigas ensaiadas.

Tabela 1 – Dados de projeto das vigas compostas.

Espécie de Madeira	Viga	Geometria da Seção	Ligação	Comp. (cm)	Vão ensaio (cm)	Instrumentação
Angelim Petra Verdadeira	A1		18 x 30	380	370	Relógios comparadores e extensômetros elétricos
	A2		18 x 30			
	A3		18 x 30			
Pinus Hondurensis	P1		22 x 42 C/5,0 cm	310	300	Relógios comparadores e extensômetros elétricos
	P2		22 x 48 C/5,0 cm			
	P3		22 x 48 C/2,4 cm			
Cedrinho	C1		22 x 48 C/5,0 cm	400	390	Relógios comparadores e extensômetros elétricos
	C2					
	C3					Relógios comparadores

Para possibilitar uma análise adequada dos resultados, todas as peças de madeira que compõem a seção transversal composta foram previamente testadas por meio de ensaios de flexão estática não-destrutivos. Desses ensaios são obtidos o módulo de elasticidade à flexão de cada peça que está sendo empregada na viga, garantindo maior precisão da análise dos resultados.

Após a montagem, as vigas compostas foram testadas por meio de ensaio de flexão com carregamento nos terços do vão, leitura de flechas e deslizamento entre as peças, por meio de relógios comparadores com exatidão de 0,01 mm, e leitura de deformações por meio de extensômetros elétricos



instrumentadas com extensômetros elétricos.

A Figura 11 ilustra a realização dos ensaios de flexão das vigas compostas.



Figura 11 – Ensaios de flexão em protótipo de peças compostas.

Para avaliação da rigidez à flexão foram realizados três ciclos de carregamento, tendo sido registrados os valores observados no último ciclo. Esses carregamentos foram conduzidos até o limite de flecha $L/200$ para todas as vigas, de forma a não exceder o regime elástico do material. Ao final do terceiro ciclo, após a retirada dos relógios comparadores, as vigas foram conduzidas à ruptura.

6 Resultados e Discussões

Neste item são realizadas as avaliações da rigidez efetiva, deformações, tensões e força de ruptura das vigas compostas.

6.1 Rigidez efetiva

A Tabela 2 apresenta os valores de rigidez à flexão e os respectivos valores dos coeficientes de eficiência (a) para as vigas compostas. A coluna (a_{EC5}) indica

os valores do coeficiente de eficiência calculado pela equação 13, segundo a metodologia proposta pelo EUROCODE 5/93. A coluna ($\alpha_{exp.}$) indica os valores do coeficiente de eficiência calculado pela equação 14.

$$\alpha_{EC5} = \frac{(EI)_{EC5}}{(EI)_{ríg}} \quad (13)$$

$$\alpha_{exp} = \frac{(EI)_{exp}}{(EI)_{ríg}} \quad (14)$$

Também é apresentado o valor do erro entre a estimativa do EUROCODE 5/93 e os resultados experimentais (vide equação 15). O sinal (-) indica que o valor de rigidez à flexão, obtido experimentalmente, foi menor que o estimado teoricamente pelo método do EUROCODE 5/93. (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 1993)

$$\frac{(EI)_{exp} - (EI)_{EC5}}{(EI)_{EC5}} \cdot 100 \quad (15)$$

Tabela 2 – Rigidez à flexão e coeficiente de eficiência das vigas compostas.

Viga	$(EI)_{ríg.}$ (kN.cm ²)	$(EI)_{EC5}$ (kN.cm ²)	$(EI)_{exp.}$ (kN.cm ²)	α_{EC5}	$\alpha_{exp.}$	Erro (%)
A1	12389321	10993965	10660463	0,89	0,86	-3,0
A2	12221476	10877689	10355724	0,89	0,85	-4,8
A3	13384421	11837396	11445233	0,88	0,86	-3,3
C1	20779163	15630796	13454931	0,75	0,65	-13,9
C2	21980521	15881122	13743379	0,72	0,66	-13,5
C3	17817781	13465536	12731707	0,76	0,72	-5,5
P1	7733260	5943941	5789292	0,77	0,75	-2,6
P2	28208205	16389020	16527848	0,58	0,59	0,8
P3	20336034	16663170	17017367	0,82	0,84	2,1

Nas Figuras 12, 13 e 14, são apresentados os diagramas de força x flecha para as vigas A3, C3 e P3. Nesses diagramas são indicadas quatro curvas teóricas (denominadas: Rígida, Livre, NBR e EC5), além dos valores experimentais obtidos dos ensaios. A curva “Rígida” considera a ligação entre os elementos como sendo perfeitamente rígida. A curva

“Livre” indica o comportamento da viga supondo não haver ligação entre os elementos. Também são apresentados, nas curvas “NBR” e “EC5”, os comportamentos da viga de acordo com os procedimentos de cálculo indicados pelas normas NBR 7190/97 e EUROCODE 5/93, respectivamente.

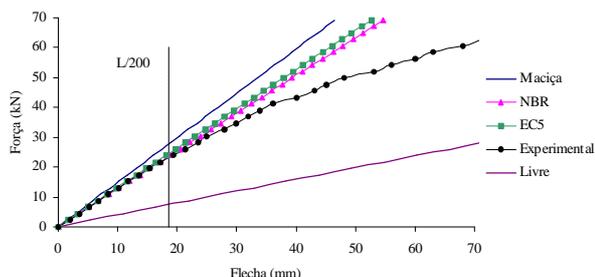


Figura 12 – Diagrama força x flecha do ensaio de flexão da viga de Angelim A3.

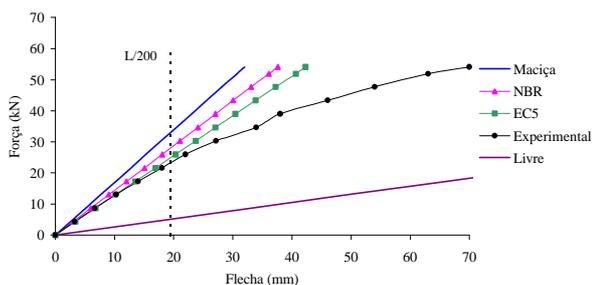


Figura 13 – Diagrama força x flecha do ensaio de flexão da viga de Cedrilho C3.

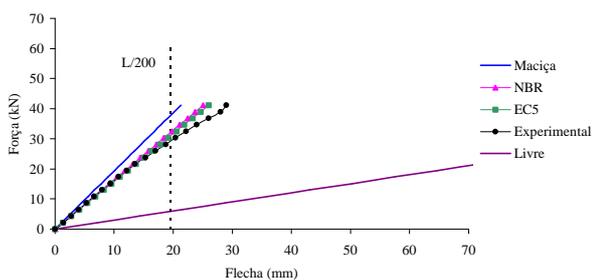


Figura 14 – Diagramas força x flecha do ensaio de flexão da viga de Pinus P3.

Observando os diagramas das Figuras 12, 13, 14 e os valores de erro na tabela 2, pode-se notar a proximidade dos valores teóricos do EUROCODE 5/93 com os valores obtidos nos ensaios, principalmente para valores de deslocamento vertical

inferior a $L/200$. A partir deste valor, nota-se também que o sistema composto começa a perder eficiência e que as teorias lineares do EUROCODE 5/93 e da NBR 7190/97 tornam-se inadequadas para prever os deslocamentos e os esforços atuantes.

6.2 Deformações e tensões

Para a análise de tensões e deformações as vigas foram instrumentadas com seis extensômetros, posicionados na região central das vigas, que registravam os valores $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4, \epsilon_5$ e ϵ_6 a cada novo incremento de força (ver Figura 15).

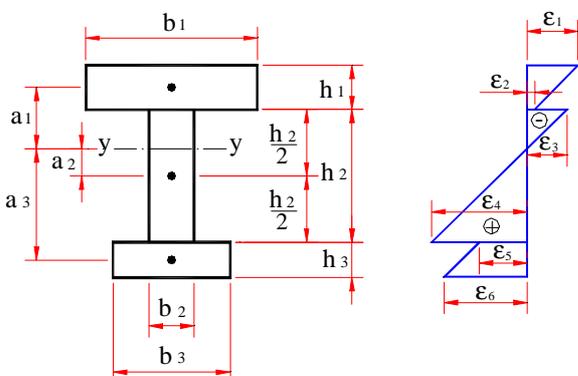


Figura 15. Diagrama de deformação para uma seção I genérica.

A Figura 16 mostra os diagramas de tensões e deformações para a viga C2, indicando os resultados experimentais e comparando-os com os obtidos da formulação do EUROCODE 5/93. As tensões e deformações apresentadas na Figura 16, referem-se aos valores obtidos, para o nível de força aplicada que produzia uma flecha teórica de $L/200$, considerando regime elástico.

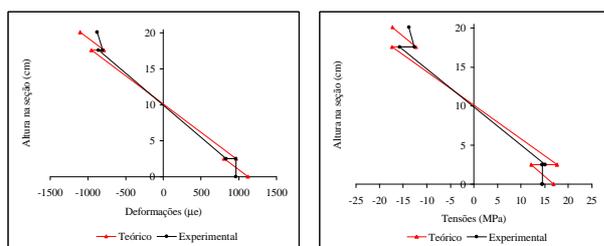


Figura 16 – Diagramas de deformações e tensões da viga A2.

Os resultados indicam boa correspondência entre os valores teóricos calculados pelo método do EUROCODE 5/93 e os valores experimentais obtidos pelos extensômetros elétricos.

6.3 Força de ruptura

Em relação aos estados limites últimos, foram comparados os valores de força máxima calculados teoricamente pelo método do EUROCODE 5/93 e NBR 7190/97, e comparados com os resultados experimentais obtidos. Em todas as vigas, a ruptura foi caracterizada por tração na alma inferior (Figura 17).



Figura 17 – Modo de ruptura das vigas compostas.

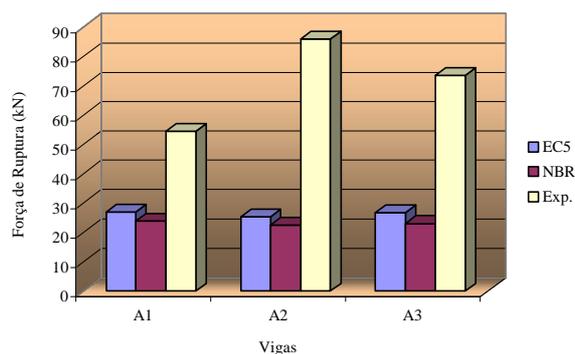


Figura 18 – Diagrama de força de ruptura das vigas de Angelim.

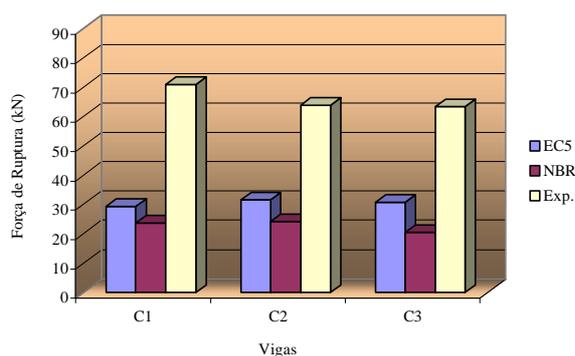


Figura 19 – Diagrama de força de ruptura das vigas de Cedrilho.

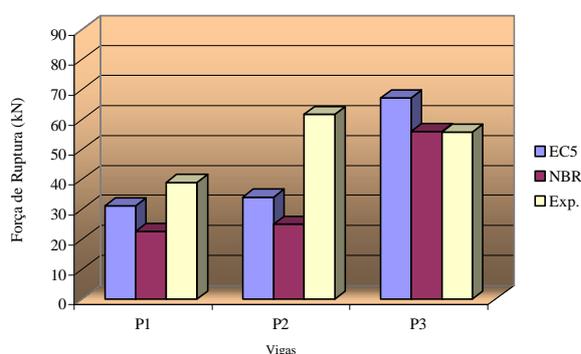


Figura 20 – Diagrama de força de ruptura das vigas de Pinus.

Observando os diagramas das figuras 18, 19, e 20 nota-se que os resultados experimentais de força de ruptura obtidos são muito superiores aos teóricos, para a maioria dos casos.

A grande diferença têm fundamento na consideração do estado de ruptura da viga. Tanto o método do EUROCODE 5/93 quanto o método da NBR 7190/97 consideram, para esses exemplos particulares de vigas, que a viga atingiu o estado limite último, quando a ligação mais solicitada (extremo da viga) atinge sua capacidade máxima. Entretanto, pode ser observado que, após este ponto, ocorre uma redistribuição de esforços, devido a alta flexibilidade dos conectores, garantindo maior capacidade resistente para o elemento estrutural. Por fim, a ruptura das vigas ocorreu na mesa inferior ou na alma, devido as tensões de tração decorrentes da flexão.

Comparando os valores teóricos da capacidade resistente obtidos pelas normas EUROCODE 5/93 e

NBR 7190/97, nota-se que esta conduz a valores inferiores. Isto é devido ao fato de a norma brasileira considerar o fluxo de cisalhamento como se a viga fosse maciça. Já a norma europeia admite uma redução no valor do fluxo de cisalhamento, em função da eficiência da conexão. Em média, essa diferença ficou entre 10 e 14%.

Conclusão

As vigas compostas de madeira pregadas apresentam facilidade de execução e baixo custo de produção, podendo ser largamente empregadas nas construções de madeira principalmente quando é requerido um acréscimo de inércia sem a disponibilidade de peças de seção maciça.

Quanto aos critérios de dimensionamento de peças compostas, o método dos coeficientes, apesar de proporcionar agilidade no cálculo, apresenta grande variabilidade por não considerar a rigidez da ligação. Por esse motivo, alguns documentos normativos, que anteriormente o adotavam, após revisão optaram pelo método analítico. O método analítico proporciona maior precisão no cálculo de peças compostas, considerando a influência do deslizamento relativo entre as peças que compõem a seção em função das propriedades de rigidez de cada elemento, da geometria da seção, do vão, do módulo de deslizamento da ligação e do espaçamento entre conectores.

Quanto a verificação da segurança da peça, o critério de dimensionamento da NBR 7190/97 não conduz, na maioria dos casos usuais, a resultados muito discrepantes dos obtidos pelo EUROCODE 5/93, pois o fator restritivo é a ligação entre os elementos. Entretanto, situações nas quais seja necessário um controle mais rigoroso dos deslocamentos, ou o aumento da capacidade de carga dos elementos das ligações, podem levar a resultados distinto entre os dois documentos normativos.

Assim, sugere-se a adoção do critério do EUROCODE 5/93 para o dimensionamento de vigas

I de seção composta, considerando que o mesmo conduz a resultados mais precisos, confirmados experimentalmente. Este critério também possibilita ao projetista a adoção de soluções com menores densidades de pregos, trabalhando-se com valores da inércia efetiva inferiores a 85% da inércia teórica.

Agradecimentos

Os autores expressam seus agradecimentos à FAPESP – “Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo”, pela concessão da bolsa de estudos e suporte financeiro para o desenvolvimento da pesquisa.

Referências

- ALVIM, R. C. *A Resistência dos Pilares de Madeira Composta*. 206p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7190 - Projeto de Estruturas de Madeira*. Rio de Janeiro, 1997.
- COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. *EUROCODE 5: Design of Timber Structures*. Brussels, 1993.
- GEHRI, E. *Zusammengesetzte Träger*. In: _____. *Autographie Einführung in die Norm 164 (1981)*. [S.l.: s.n], 1988. Cap.10, p.285-298.

