

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS
LABORATÓRIO DE MADEIRAS E DE ESTRUTURAS DE MADEIRA**

**ANÁLISE DE VIGAS DE MADEIRA PREGADAS
COM SEÇÃO COMPOSTA I**

Jorge Luís Nunes de Góes

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

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antônio Alves Dias

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Engenharia de Estruturas

São Carlos

2002

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos são dirigidos aos amigos e familiares que prestaram os melhores incentivos para a concretização deste trabalho.

Em especial, ao Professor Dr. Antonio Alves Dias pela excelente orientação e amizade.

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.

À todos os colegas, professores e funcionários do Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeiras, que direta ou indiretamente, participaram na elaboração deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiii
RESUMO	xvii
ABSTRACT	xviii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. VIGAS COMPOSTAS DE MADEIRA	4
2.2. MÉTODOS DE ANÁLISE DE VIGAS COMPOSTAS	7
2.2.1. Métodos de Análise de Vigas Compostas	7
2.2.2. Métodos dos Coeficientes	9
2.2.3. Métodos de Analítico de Cálculo	13
2.3. MODELO TEÓRICO BASEADO NAS EQUAÇÕES DE EQUILÍBRIO	18
2.3.1. Modelo Exato (CHUI & BARCLAY – 1998)	19
2.3.2. Modelo Aproximado (KREUZINGER – 1995)	24
2.4. RIGIDEZ DAS LIGAÇÕES	28
2.4.1. Conceitos Básicos	30
2.4.2. Modelo do Escoamento (Yield Model)	31
2.4.3. Modelos de Viga sob Fundação	35
2.5. REVISÃO DE NORMAS TÉCNICAS	42
2.5.1. NBR 7190 (1997)	43
2.5.2. DIN 1052 (1988)	43
2.5.3. EUROCODE 5 (1993)	47

2.6. CONCLUSÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	50
3. MATERIAIS E MÉTODOS	53
3.1. DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS	54
3.2. PROCEDIMENTOS DE EXPERIMENTAÇÃO	55
3.3. ENSAIOS DE FLEXÃO ESTÁTICA PARA CARACTERIZAÇÃO.....	56
3.4. MONTAGEM DAS VIGAS COMPOSTAS	60
3.5. ENSAIOS DAS VIGAS COMPOSTAS	62
3.6. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA	64
3.7. ENSAIOS DE LIGAÇÕES	64
3.8. ENSAIOS DOS PREGOS	69
4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	70
4.1. ENSAIOS DE FLEXÃO ESTÁTICA PARA CARACTERIZAÇÃO.....	70
4.2. ENSAIOS DAS VIGAS COMPOSTAS	71
4.3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DE MADEIRA	80
4.4. ENSAIOS DE LIGAÇÕES	83
4.5. ENSAIOS DOS PREGOS	85
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	86
5.1. RIGIDEZ EFETIVA	86
5.2. DEFORMAÇÕES E TENSÕES	91
5.3. DESLIZAMENTO ENTRE AS PEÇAS	105
5.4. FORÇA DE RUPTURA	106
5.5. ENSAIOS DE LIGAÇÕES	109
5.6. COMPARAÇÃO ENTRE OS CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO	111
6. CONCLUSÕES FINAIS	118
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	120
ANEXO A	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Tipos de vigas compostas. (a) viga composta de madeira maciça; (b) viga laminada colada; (c) viga com alma esbelta; (d) viga em treliça. Fonte: GEHRI (1988).	5
Figura 2 -	Exemplos de configuração de seções transversais compostas solidarizadas continuamente.	5
Figura 3 -	Deformação de uma barra fletida. (a) seção maciça; (b) barras sobrepostas; (c) seção composta interligada por pinos metálicos; (d) esforços solicitantes. Fonte: ALVIM (2002).	7
Figura 4 -	Comportamento interposto das peças compostas. (a) seção maciça equivalente; (b) seção composta interligada por união deformável; (c) seção com dois elementos sobrepostos. Fonte: GEHRI (1988).	9
Figura 5 -	Influência do tipo de carregamento no coeficiente β . Fonte: GEHRI (1988).	11
Figura 6 -	Eficiência β em função da rigidez da ligação para vigas compostas com 2 e 3 elementos. Fonte: STÜSSI (1947).	11
Figura 7 -	Valores dos coeficientes de redução em função do vão. Fonte: GEHRI (1988).	12
Figura 8 -	Viga composta de três elementos com seção transversal genérica, distribuição de deformações e esforços internos para um elemento diferencial.	20
Figura 9 -	Deslocamento e força cisalhante entre os elementos individuais. Fonte: KREUZINGER (1995).	24
Figura 10 -	Detalhes de uma viga composta e a configuração de equilíbrio de um elemento dx. Fonte: KREUZINGER (1995).	25
Figura 11 -	Deformações. Fonte: KREUZINGER (1995).	25
Figura 12 -	Distribuição de tensões. Fonte: KREUZINGER (1995).	26
Figura 13 -	Típica curva carga-deslocamento. Fonte: VAN DYER (1992).	29
Figura 14 -	Esquema da distribuição de tensões sobre o prego ao longo de seu comprimento em uma ligação tracionada. Fonte: SANTANA (1997).	30
Figura 15 -	(a) Esquema real de distribuição de tensões na parede do furo. (b) Esquema aproximado de distribuição de tensões na parede do furo. Fonte: SANTANA (1997).	31

Figura 16 -	Módulo de Deslizamento secante.	33
Figura 17 -	Analogia de viga de fundação elástica. Fonte: ALVIM (2002).	37
Figura 18 -	Ligação com duas peças. Fonte: ALVIM (2002).	37
Figura 19 -	Curva típica de carga-deslocamento de uma ligação pregada. Fonte: MALHORTA & VAN DYER (1977) <i>apud</i> ALVIM (2002).	39
Figura 20 -	Ligação com duas peças. Fonte: KUENZI (1955) <i>apud</i> ALVIM (2002).	39
Figura 21 -	Diagramas experimentais de carga-deslocamento. Fonte: FOSCHI (1974) <i>apud</i> ALVIM (2002).	42
Figura 22 -	Distância $e'_{1,3}$ conforme arranjo dos conectores para mais de uma linha de pregação.	45
Figura 23 -	Seções transversais e distribuição de tensões da DIN 1052.	47
Figura 24 -	Seções transversais e distribuição de tensões do EUROCODE 5.	49
Figura 25 -	Montagem do ensaio de flexão estática para caracterização das peças.	56
Figura 26 -	Diagrama carga x flecha na flexão. Fonte NBR 7190 (1997).	57
Figura 27 -	Diagrama de carregamento para a determinação da rigidez à flexão. Fonte NBR 7190 (1997).	57
Figura 28 -	Ensaio de flexão em peça de mesa (esquerda) e peça de alma (direita).	58
Figura 29 -	Sistema de aplicação de carga e relógio comparador (esquerda); Sistema de aquisição de dados KYOWA (direita).	58
Figura 30 -	Diagrama força x flecha do ensaio de flexão em uma peça (alma).	60
Figura 31 -	Diagrama força x deformação específica (extensômetros superior e inferior) do ensaio de flexão em uma peça (alma).	60
Figura 32 -	Fixação das peças de madeira.	61
Figura 33 -	Pré-furação e cravação dos pregos.	61
Figura 34 -	Viga após o término da montagem.	61
Figura 35 -	Montagem do ensaio em vigas compostas.	62
Figura 36 -	Viga composta posicionada para ensaio.	63
Figura 37 -	Detalhe de instrumentação das vigas.	63

Figura 38 -	Comportamento de duas vigas compostas próximo à ruptura.	64
Figura 39 -	Dimensões dos corpos-de-prova de ligação tipo 1.	65
Figura 40 -	Dimensão dos corpos-de-prova de ligação tipo 2.	65
Figura 41 -	Configuração do ensaio de ligação para corpo-de-prova tipo 1 e 2.	66
Figura 42 -	Diagrama força x deslocamento do ensaio de ligação – CP3 viga P2.	66
Figura 43 -	Diagrama de carregamento para ensaios em corpos-de-prova de ligação das vigas P3, C1, C2 e C3. Adaptado da NBR 7190 (1997). ..	67
Figura 44 -	Diagrama força x deslocamento do ensaio de ligação – CP3 viga C3.	67
Figura 45 -	Diagrama de carregamento para ensaios em corpos-de-prova de ligação das vigas P1, A1, A2 e A3. Adaptado da NBR 7190 (1997). .	68
Figura 46 -	Diagrama força x deslocamento do ensaio de ligação – CP3 viga A2.	68
Figura 47 -	Diagrama força x deformação específica do ensaio de ligação. Fonte: NBR 7190 (1997).	69
Figura 48 -	Diagramas força x flecha dos ensaios de flexão das vigas de Angelim.	87
Figura 49 -	Diagramas força x flecha dos ensaios de flexão das vigas de Cedrilho.	88
Figura 50 -	Diagramas força x flecha dos ensaios de flexão das vigas de Pinus. ..	89
Figura 51 -	Diagrama de deformação para uma seção I genérica.	91
Figura 52 -	Diagramas força x deformação do ensaio de flexão da viga A1.	92
Figura 53 -	Diagramas força x deformação do ensaio de flexão da viga A2.	93
Figura 54 -	Diagramas força x deformação do ensaio de flexão da viga C1.	94
Figura 55 -	Diagramas força x deformação do ensaio de flexão da viga C2.	95
Figura 56 -	Diagramas força x deformação do ensaio de flexão da viga P1.	96
Figura 57 -	Diagramas força x deformação do ensaio de flexão da viga P2.	97
Figura 58 -	Diagrama de deformações e tensões da viga A1.	99
Figura 59 -	Diagrama de deformações e tensões da viga A2.	100
Figura 60 -	Diagrama de deformações e tensões da viga C1.	101
Figura 61 -	Diagrama de deformações e tensões da viga C2.	102

Figura 62 -	Diagrama de deformações e tensões da viga P1.	103
Figura 63 -	Diagrama de deformações e tensões da viga P2.	104
Figura 64 -	Diagrama de deslizamento entre a mesa e a alma das vigas de Angelim.	105
Figura 65 -	Diagrama de deslizamento entre a mesa e a alma das vigas de Cedrilho.	106
Figura 66 -	Diagrama de deslizamento entre a mesa e a alma das vigas de Pinus.	101
Figura 67 -	Modo de ruptura das vigas compostas.	107
Figura 68 -	Diagrama de força de ruptura das vigas de Angelim.	108
Figura 69 -	Diagrama de força de ruptura das vigas de Cedrilho.	108
Figura 70 -	Diagrama de força de ruptura das vigas de Pinus.	109
Figura 71 -	Coefficiente de eficiência x espaçamento entre pregos – Viga Tipo 1.	113
Figura 72 -	Coefficiente de eficiência x densidade de pregos – Viga Tipo 1.	113
Figura 73 -	Coefficiente de eficiência x espaçamento entre pregos – Viga Tipo 2.	114
Figura 74 -	Coefficiente de eficiência x densidade de pregos – Viga Tipo 2.	114
Figura 75 -	Valor máximo de carregamento permanente distribuído em função da taxa de conectores – Viga Tipo 1.	115
Figura 76 -	Valor máximo de carregamento permanente distribuído em função da taxa de conectores – Viga Tipo 2.	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Valores dos coeficientes de eficiência da Norma Brasileira e Suíça. ...	12
Tabela 2 -	Módulo de deslizamento "K" em N/mm, para as seções transversais de vigas.	44
Tabela 3 -	Dados de projeto das vigas compostas.	54
Tabela 4 -	Módulo de elasticidade das peças individuais das vigas compostas. ..	70
Tabela 5 -	Resultados do ensaio de flexão da viga A1.	72
Tabela 6 -	Resultados do ensaio de flexão da viga A2.	73
Tabela 7 -	Resultados do ensaio de flexão da viga A3.	74
Tabela 8 -	Resultados do ensaio de flexão da viga C1.	75
Tabela 9 -	Resultados do ensaio de flexão da viga C2.	76
Tabela 10 -	Resultados do ensaio de flexão da viga C3.	77
Tabela 11 -	Resultados do ensaio de flexão da viga P1.	78
Tabela 12 -	Resultados do ensaio de flexão da viga P2.	79
Tabela 13 -	Resultados do ensaio de flexão da viga P3.	80
Tabela 14 -	Médias e coeficiente de variação (%) - Angelim Pedra Verdadeiro. ...	81
Tabela 15 -	Médias e coeficiente de variação (%) - Cedrilho.	82
Tabela 16 -	Médias e coeficiente de variação (%) - Pinus Hondurensis.	83
Tabela 17 -	Resultados dos ensaios de ligação de Angelim Pedra Verdadeiro.	84
Tabela 18 -	Resultados dos ensaios de ligação de Cedrilho.	84
Tabela 19 -	Resultados dos ensaios de ligação de Pinus Hondurensis.	85
Tabela 20 -	Resultados dos ensaios de tração dos pregos.	85
Tabela 21 -	Rigidez à flexão e coeficiente de eficiência das vigas compostas.	91
Tabela 22 -	Comparação dos resultados de tensões e deformações teórico e experimental viga A1.	99
Tabela 23 -	Comparação dos resultados de tensões e deformações teórico e experimental Viga A2.	100

Tabela 24 -	Comparação dos resultados de tensões e deformações teórico e experimental Viga C1.	101
Tabela 25 -	Comparação dos resultados de tensões e deformações teórico e experimental Viga C2.	102
Tabela 26 -	Comparação dos resultados de tensões e deformações teórico e experimental Viga P1.	103
Tabela 27 -	Comparação dos resultados de tensões e deformações teórico e experimental Viga P2.	104
Tabela 28 -	Comparação da força de ruptura teórica e experimental.	107
Tabela 29 -	Resultados dos ensaios de ligações.	110
Tabela 30 -	Dados de projeto das vigas compostas.	112

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- CDE - Chapa de Dentes Estampados
- EESC - Escola de Engenharia de São Carlos
- ELE - Engineereing Laboratory Equipment Limited
- LaMEM - Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira
- LVL - Laminated Veneer Lumber
- MLC - Madeira Laminada Colada
- NBR - Norma Brasileira Registrada
- OSB - Oriented Strand Board
- SET - Departamento de Engenharia de Estruturas
- USP - Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras romanas maiúsculas:

- A Área da seção transversal;
- A_i Área da seção transversal do elemento individual i ;
- C Rigidez da ligação, constante de deslizamento;
- D_e Profundidade efetiva da fundação;
- E_{co} Módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras da madeira;
- $E_{co,k}$ Módulo de elasticidade característico à compressão paralela às fibras da madeira;
- E_{c90} Módulo de elasticidade à compressão normal às fibras da madeira;
- $(EI)_{EC5}$ Rigidez da viga composta à flexão calculado pelo EUROCODE 5;
- $(EI)_{ef}$ Rigidez efetiva da viga composta à flexão;
- $(EI)_{exp}$ Rigidez experimental da viga composta à flexão;
- $(EI)_{rig}$ Rigidez efetiva da viga composta à flexão considerando ligação rígida;
- $(EI)_{th}$ Rigidez teórica da viga composta à flexão;
- $E_{M,flecha}$ Módulo de elasticidade à flexão experimental;
- E_{to} Módulo de elasticidade à tração paralela às fibras da madeira;
- F Força concentrada aplicada, força no conector;
- F_{max} Força máxima da ligação;
- F_s Força atuante no conector;
- I Momento de inércia;
- I_{ef} Momento de inércia efetivo;
- I_{th} Momento de inércia teórico;
- I_p Momento de inércia do pino metálico;
- J Parâmetro;
- K Módulo de deslizamento da ligação;
- K_{kuenzi} Módulo de deslizamento pelo modelo de KUENZI;

K_{ser}	Módulo de deslizamento para o estado limite de utilização;
$K_{ser,inst}$	Módulo de deslizamento instantâneo para o estado limite de utilização;
K_u	Módulo de deslizamento para o estado limite último;
L	Parâmetro, vão;
L_0	Base de medida para corpos-de-prova de ligação;
M	Momento fletor;
M_y	Momento de escoamento do pino;
N	Esforço normal;
P_c	Carga de ruptura da viga composta;
P_s	Carga de ruptura da viga maciça;
R	Capacidade máxima da ligação;
$R_{2\%}$	Resistência convencional da ligação;
R_u	Resistência máxima da ligação;
S	Momento estático de área;
U	Teor de umidade da madeira;
V	Esforço cisalhante;
W	Módulo de resistência;
Zul N	Força permissível no conector segundo DIN 1052.

Letras romanas minúsculas:

- a Distância do c.g. de um elemento até o c.g. da seção composta;
- b Largura da peça de madeira;
- d Diâmetro do pino;
- e' Distância média entre conectores;
- f_c Flecha verificada na seção central da peça composta;
- f_{c0,d} Resistência de cálculo à compressão paralela às fibras da madeira;
- f_{c0,k} Resistência característica à compressão paralela às fibras da madeira;
- f_e Resistência da madeira ao embutimento;
- f_s Flecha verificada na seção central da peça maciça;
- f_{t0,d} Resistência de cálculo à tração paralela às fibras da madeira;
- f_{t0,k} Resistência característica à tração paralela às fibras da madeira;
- f_u Resistência máxima do aço à tração;
- f_{v,d} Resistência de cálculo ao cisalhamento da madeira;
- f_{v,k} Resistência característica ao cisalhamento da madeira;
- f_y Resistência ao escoamento do aço;
- g_c Peso próprio da viga composta;
- g_s Peso próprio da viga maciça;
- h Altura da peça de madeira;
- \bar{k} Módulo de deformação elástico da fundação;
- n_i Relação entre os módulos para a seção transformada;
- p Carga uniformemente distribuída;
- p_x Carregamento distribuído;
- q₁ Fluxo de cisalhamento ao longo da viga entre as peças 1 e 2;
- q₂ Fluxo de cisalhamento ao longo da viga entre as peças 2 e 3;
- s Espaçamento entre conectores;

- s_{ef} Espaçamento efetivo entre pregos;
- s_{max} Espaçamento máximo entre pregos;
- s_{min} Espaçamento mínimo entre pregos;
- u Deslocamento da ligação;
- u_{inst} Deslocamento instantâneo;
- y Coeficiente, flecha.

Letras gregas:

α	Coeficiente de redução do momento de inércia;
α_{EC5}	Coeficiente de redução de inércia calculado pelo EUROCODE 5;
α_{exp}	Coeficiente de redução de inércia experimental;
β	Coeficiente de redução do módulo de resistência, relação entre a resistência ao embutimento das peças ligadas;
δ	Deslocamento, flecha;
ΔF	Variação da força;
$\Delta \delta$	Variação da flecha;
$\Delta \varepsilon$	Variação da deformação específica;
ε	Deformação específica;
ε_c	Deformação específica de compressão;
ε_t	Deformação específica de tração;
γ	Fator de redução, coeficiente de redução de inércia do conjunto;
λ	Parâmetro;
$\rho_{ap(12\%)}$	Densidade aparente da madeira à 12% de umidade;
$\rho_{ap, verde}$	Densidade aparente da madeira fora das condições padrão de umidade;
ρ_k	Densidade aparente característica da madeira;
σ_{mi}	Tensão normal na extremidade do elemento “i” devido ao momento;
σ	Tensão normal;
σ_i	Tensão normal no centróide do elemento “i” devido à força normal;
τ_{max}	Tensão máxima de cisalhamento;
v	Fluxo de cisalhamento atuante na superfície de contato entre os elementos.

RESUMO

GÓES, J. L. N. (2002). *Análise de vigas de madeira pregadas com seção composta I* São Carlos, 2002. 123p. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

As vigas compostas pregadas possuem vasta aplicação como material estrutural, desde vigas para instalações residenciais e industriais até longarinas de pontes de pequenos vãos, apresentando como principais vantagens o baixo custo e a facilidade de execução, não exigindo mão-de-obra qualificada. Este trabalho tem como objetivo o estudo teórico e experimental de vigas de madeira com seção composta I formadas por peças de madeira serrada e solidarizadas por pregos. São apresentados os critérios das normas EUROCODE 5, DIN1052 e NBR 7190, bem como a teoria a respeito do assunto. É avaliado o procedimento de cálculo da NBR 7190, em comparação com o EUROCODE 5, sendo realizada verificação experimental dos critérios destas normas, por meio de ensaios de flexão em protótipos de vigas compostas em escala natural. Os resultados obtidos demonstram que o modelo do EUROCODE 5 é o mais indicado para estimar a rigidez efetiva, tensões normais e de cisalhamento como também a força nos conectores.

Palavras-chave: peças compostas; rigidez de ligações; vigas de madeira.

ABSTRACT

GÓES, J. L. N. (2002). *Analysis of nailed timber built-up I beams*. São Carlos, 2002. 123p. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The built-up I beams are widely employed as structural elements, from residential and industrial facilities, to girders for bridges of small span. The fact that they do not demand skilled workmanship, the low cost and easiness of construction are their main advantages. This research aims at the theoretical and experimental analysis of built-up I beams, made of sawn elements nailed jointed. The EUROCODE 5, DIN 1052 and NBR 7190 criteria as well as the basic theory are presented. The design procedure adopted by NBR 7190 is compared to the EUROCODE 5 one. Experimental evaluation of these criteria is made subjecting built-up beam prototype to bending tests. The results should that the EUROCODE criteria is the most recommended for estimate the effective rigidity, normal and shear stresses as well as the load on a fastener.

Keywords: built-up system; fasteners rigidity; wooden beams.