

LEI DO DIREITO AUTORAL
Todos os direitos reservados e protegidos
Lei nº 9.610/1998
Não é permitido reproduzir ou
transmitir, por qualquer meio,
sem a autorização expressa do
empresário, qualquer parte dos
conteúdos, textos, imagens ou
figuras, sob quaisquer outros
nomes.

**ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DE VIGAS "I" DE
MADEIRA COM ALMA DE COMPENSADO (VCMC)**

Luciana Nunes Magalhães

**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS
ESCOLA DE ENGENHARIA DA UFMG**

N.Cham 624.01 M188e 2005

Autor: Magalhães, Luciana Nunes

Título: Estudo teórico e experimental de



288000709

Ac. 430126

LEI DO DIREITO AUTORAL
Todos os direitos reservados e protegidos
pela Lei 9.610/1998.
Este arquivo não pode ser reproduzido ou
transmitido sejam quais forem os meios
empregados: eletrônicos, mecânicos,
fotográficos ou quaisquer outros.

ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DE VIGAS "I" DE MADEIRA COM ALMA DE COMPENSADO (VCMC)

U.F.M.G. - BIBLIOTECA UNIVERSITÁRIA



288000709

NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA

Luciana Nunes Magalhães

624.01
M 188-2
2005

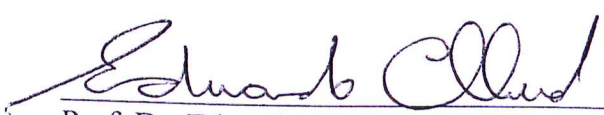
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

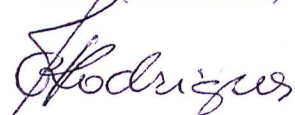
**"ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DE VIGAS "I" DE
MADEIRA COM ALMA DE COMPENSADO (VCMC)"**

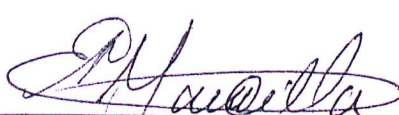
Luciana Nunes Magalhães

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Doutor em Engenharia de Estruturas".

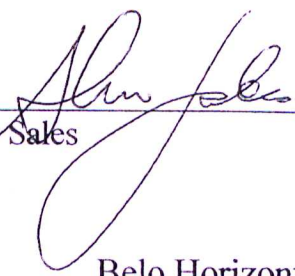
Comissão Examinadora:


Prof. Dr. Eduardo Chahud
DEES-UFMG - (Orientador)


Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues
DEES-UFMG


Prof. Dr. Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco
DEES-UFMG


Prof. Dr. Francisco Antônio Romero Gesualdo
UFU-MG


Prof. Dr. Almir Sales
UFSCar-SP

Belo Horizonte, 28 de abril de 2005

AC-430126

LEIDO DIREITO AUTORAL
Todos os direitos reservados e protegidos
pela Lei 9.610/1998.
Este arquivo não pode ser reproduzido ou
transmitido sejam quais forem os meios
empregados: eletrônicos, mecânicos,
fotográficos ou quaisquer outros.

Às minhas queridas Iara e Vitória que tanto me inspiram...

AGRADECIMENTOS

LEI DO DIREITO AUTORAL
Todos os direitos reservados e protegidos
pela Lei 9.610/1998.
Este arquivo não pode ser reproduzido ou
transmitido sejam quais forem os meios
empregados: eletrônicos, mecânicos,
fotográficos ou quaisquer outros.

À Deus pela oportunidade dada.

Ao meu orientador, Eduardo Chahud, pela confiança, amizade e sabedoria.

À Iara e Vitória pela alegria de tê-las ao meu lado nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais e irmão pela confiança e carinho.

À Universidade FUMEC, pelo apoio e incentivo para realização desse trabalho.

À Universidade Federal de Minas Gerais pela continuidade da minha formação profissional.

À Escola de Engenharia Kennedy pelo apoio dado.

Aos funcionários do Laboratório de Análise Experimental de Estruturas (LAEES) da UFMG pela colaboração na realização dos ensaios.

Aos profissionais Eng^a. Cynara Fiedler Bremer e Eng^o. Antonio Carlos Vieira pela atenção e auxílio dispensados.

À CAPES pela bolsa de estudos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS
LISTA DE TABELAS
LISTA DE QUADROS
LISTA DE SÍMBOLOS
RESUMO
ABSTRACT

LEI DO DIREITO AUTORAL
Todos os direitos reservados e protegidos
pela Lei 9.610/1998.
Este arquivo não pode ser reproduzido ou
transmitido sejam quais forem os meios
empregados: eletrônicos, mecânicos,
fotográficos ou quaisquer outros.

1. INTRODUÇÃO 1
1.1. Objetivos 4
1.2. Justificativas 5
1.3. Etapas de Desenvolvimento do Trabalho 7
2. REVISÃO DA LITERATURA..... 8
2.1. Trabalhos sobre vigas compostas de madeira e seus produtos derivados -
aspectos gerais 9
2.1.1. Considerações sobre estabilidade de vigas compostas 18
2.2. Ligações em vigas de madeira 20
2.2.1. Tipos usuais de ligações para vigas compostas 20
2.2.2. Trabalhos sobre ligações em vigas compostas de madeira 22
2.2.3. Métodos e modelos de dimensionamento de ligações pregadas 27
2.2.3.1. Modelo em fundação elástica 27
2.2.3.2. Modelo de escoamento europeu (Yield Model) 28
2.2.3.3. Modelo proposto por ALMEIDA (1990) 30
2.2.3.4. O método dos estados limites 33
2.2.4. Comentários sobre o comportamento e métodos de
dimensionamento de ligações 34
2.2.5. Rigidez da ligação x Resistência ao embutimento da madeira 36
2.2.6. Resistência dos Pinos 38
2.2.7. Módulo de deslizamento 39
2.3. Normalização 45

2.3.1. Design of Timber Structures- Comité Européen de Normalisation, 1995 (EUROCODE 5).....	45
2.3.2. Plywood Design Standards,1983 (PDS).....	51
2.3.3. Engineering Design in Wood (Limit States Design).....	52
2.3.4. Deutsche Institute Fur Normung. DIN 1052	54
2.3.5. Norma Brasileira para Cálculo e Execução de Estruturas de Madeira (NBR 7190/97)- da Associação de Normas Técnicas, 1997.....	58
2.3.6. Demais normas a serem consideradas	61
2.3.7. Comentários sobre as normas de dimensionamento de ligações em estruturas de madeira.....	62
2.4. Considerações Finais da Literatura.....	64
3. ANÁLISE TEÓRICA DA VIGA COMPOSTA	66
3.1. Hipóteses básicas	66
3.2. Desenvolvimento da equação diferencial.....	67
3.3. Equação para deslocamentos das VCMC considerando o efeito da flexão	75
4. ANÁLISE EXPERIMENTAL	77
4.1. Ensaio preliminares	78
4.1.1. Definição e caracterização do compensado das VCMC	78
4.1.1.1. Determinação da resistência à compressão do compensado	79
4.1.1.2. Determinação da resistência à tração do compensado.....	80
4.1.1.3. Determinação da resistência à flexão do compensado	81
4.1.1.4. Conclusões Preliminares.....	82
4.1.2. Caracterização da madeira	83
4.1.2.1. Determinação da resistência à compressão da madeira.....	83
4.1.2.2. Determinação da resistência à tração da madeira	85
4.1.3. Ligações – Módulo de Deslizamento.....	86
4.2. Planejamento Estatístico	88
4.3. Ante-Projeto da viga composta	90
4.3.1. Determinação da carga máxima P	91
4.3.2. Determinação do espaçamento entre os parafusos na ligação alma/mesa	92
4.4. Ensaio de flexão das VCMC.....	93

4.4.1. Determinação experimental de deslocamentos verticais e de carregamento de ruptura	93
4.4.1.1. Vigas do Tipo "A"	93
4.4.1.1.1. Equipamentos Utilizados	95
4.4.1.1.2. Descrição do Ensaio	96
4.4.1.1.3. Resultados	97
4.4.1.2. Protótipos Tipo "M" e "MA"	102
4.4.1.2.1. Equipamentos Utilizados	104
4.4.1.2.2. Descrição dos ensaios dos protótipos tipo "M" e "MA"	106
4.4.1.2.3. Resultados dos Ensaaios dos Protótipos Tipo "M" e "MA"	106
4.4.1.3. Vigas com emendas parafusadas	114
4.4.1.3.1. Resultados dos ensaios das vigas com emendas parafusadas ...	115
4.4.1.4. Viga MSE	119
4.4.1.4.1. Resultado do ensaio da viga 1MSE	120
4.4.2. Determinação do diagrama de deformações longitudinais das VCMC	120
4.4.2.1. Aparelhos utilizados	121
4.4.2.2 – Descrição dos ensaios	123
4.4.2.3. Resultados	125
4.5. Conclusões Preliminares	126
5. ANÁLISE NUMÉRICA DAS VIGAS COMPOSTAS	127
5.1. Introdução	127
5.2. Considerações sobre o programa ANSYS	128
5.2.1. Modelos Constitutivos	129
5.2.2. Análise numérica	129
5.3. Análise numérica das VCMC	131
5.3.1. Vigas do tipo "A"	132
5.3.1.1. Resultados da análise numérica das vigas do tipo "A"	135
5.3.2. Vigas do tipo "MA"	138
5.3.2.2. Resultados da análise numérica das vigas do tipo "MA"	140
6. ANÁLISE DOS RESULTADOS	144
6.1. Deslocamentos verticais das VCMC	144
6.1.1. Vigas do Tipo A	145

6.1.2. Vigas do Tipo MA	146
6.1.3. Vigas do tipo MP	147
6.1.4. Comparação entre os resultados teóricos e experimentais.....	147
6.2. Tensões normais nas vigas do Tipo MA	148
7. PROPOSTA PARA DIMENSIONAMENTO DAS VCMC.....	154
7.1. Rigidez das VCMC	154
7.2. Tensões normais e de cisalhamento	155
7.3. Deslocamentos verticais das VCMC	157
7.4. Exemplo de dimensionamento das VCMC	157
7.4.1. Características dos Materiais	158
7.4.2. Parâmetros da viga	159
7.4.3. Determinação de P através da Tensão Normal na Flexão	160
7.4.4. Determinação de P através da expressão da flecha	161
7.5. Considerações sobre o dimensionamento	162
8. CONCLUSÕES	163
9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	165
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	166
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	176

LEI DO DIREITO AUTENTAL
 Todos os direitos reservados e protegidos
 pela Lei 9.610/1998
 Este arquivo não pode ser reproduzido ou
 transmitido sem quais forem meios
 eletrônicos, mecânicos,
 fotográficos ou quaisquer outros.

LISTA DE FIGURAS

1.1.Tipos comuns de vigas compostas de madeira e compensado.....	2
2.1.Esquema da distribuição de tensões sobre um pino em uma ligação tracionada Fonte:STAMATO (1998)	24
2.2.Corpo de prova de ensaio de embutimento. Fonte:STAMATO(1998).....	25
2.3.Módulo de deslizamento. Fonte:GOES(2002)	27
2.4.Diagramas representativos do comportamento da madeira e prego. Fonte: AUNE e PATTON-MALLORY (1993).....	28
2.5.Modelo de escoamento - configurações deformadas para ligações em estados limites últimos. Fonte: ELBECH e LARSEN (1992).....	29
2.6.Distribuição de tensões na parede do furo e na seção transversal mais solicitada do prego para estados limites. Fonte: ALMEIDA (1990).....	32
2.7.Esquema de ligações equivalentes.....	41
) 46	
2.8 Seção composta e diagrama de tensões correspondentes. Fonte: EUROCODE (1995).....	47
2.9.Tensões normais na seção trnsversal. Fonte:DIN1052	56
2.10.Pinos em corte simples. Fonte:NBR7190	59
3.1.Seção transversal da viga.....	67
3.2.Diagrama de corpo livre de um elemento infinitesimal da VCMC	68
3.3.Distribuição de tensões normais nas mesas das VCMC	70
3.4.Escorregamento relativo entre a mesa e a alma.....	72
3.5 a)Esquema de carregamento das vigas	75
3.5 b)Diagrama de força cortante	75
3.5 c)Diagrama de momento fletor.....	75
4.1.Esquema de corpo de prova para ensaio de ensaio à compressão do compensado	79
4.2 – Resultados de ensaios de tração em corpos-de-prova de compensado	81
4.3.Esquema do corpo-de-prova para ensaio à compressão da madeira.....	84

4.4. Esquema do corpo-de-prova para ensaio detração da madeira	85
4.5. Esquema de ensaio para a determinação do módulo de deslizamento da ligação	87
4.6 – Diagrama tensão deformação específica de embutimento	87
4.7 – Geometria da seção e esquema de carregamento da VCMC	90
4.8- Vigas do tipo A : a) vista lateral b) detalhe da seção transversal da região do enrijecedor	94
4.9 – Apoio tipo garfo para as extremidades da viga	95
4.10 - Esquema de ensaio das vigas tipo A	97
4.11 - Gráfico da configuração deformada da viga A	99
4.12 - Gráfico da configuração deformada da viga 2A	99
4.13 - Gráfico da configuração deformada da viga 3A	100
4.14 - Gráfico da configuração deformada da viga 4A	100
4.15 - Gráfico da configuração deformada da viga 5A	101
4.16 - Gráfico da configuração deformada da viga 6A	101
4.17. Vigas tipo M e MA	103
4.18 a) Vista Superior do travamento lateral das vigas	104
4.18 b) Esquema do travamento lateral	105
4.19. Esquema de ensaio das vigas dos tipos M e MA	106
4.20. Gráfico da configuração deformada da viga 1M	107
4.21. Gráfico da configuração deformada da viga 2M	107
4.22. Gráfico da configuração deformada da viga 3M	108
4.23. Gráfico da configuração deformada da viga 4M	108
4.24. Gráfico da configuração deformada da viga 5M	109
4.25. Gráfico da configuração deformada da viga 6M	109
4.26. Gráfico da configuração deformada da viga 7MA	110
4.27. Gráfico da configuração deformada da viga 8MA	110
4.28. Gráfico da configuração deformada da viga 9MA	111
4.29. Gráfico da configuração deformada da viga 10MA	111
4.30. Gráfico da configuração deformada da viga 11MA	112
4.31. Gráfico da configuração deformada da viga 12MA	112

4.32.Ruptura característica das vigas tipo "M"	113
4.33.Vista de uma viga tipo "M" ensaiada.....	113
4.34 - Detalhe de ruptura e compensado.....	114
4.35.Emenda na região central da viga do tipo "MP18"	115
4.36.Emenda na região central da viga do tipo "MP12"	115
4.37. Gráfico da configuração deformada da viga 1MP12	116
4.38 Gráfico da configuração deformada da viga 2MP12	117
4.39.Gráfico da configuração deformada da viga 3MP12	117
4.40.Gráfico da configuração deformada da viga 4MP12	118
4.41.Gráfico da configuração deformada da viga 5MP12	118
4.42.Gráfico da configuração deformada da viga 6MP12	119
4.43.Gráfico da configuração deformada da viga 1MSE.....	120
4.44.Transdutor de deslocamentos.....	121
4.45.Esquema de posicionamento dos extensômetros.....	122
4.46.Posicionamento dos extensômetros elétricos	123
4.49.Gráfico de deformação da viga 11MA.....	125
4.50.Gráfico de deformação da viga 12MA.....	125
5.1.. Elemento SOLID 45	131
5.2.Modelo 3D- Perspectiva – viga tipo "A"	133
5.3- Modelo 3D –Vista lateral – viga tipo "A"	134
5.4 – Malha de Elementos Finitos - detalhe	134
5.5. Viga tipo "A" - Diagrama P (kN) x Uy (mm)	135
5.6.Deformada global -P = 36,90 kN.....	136
5.7.Deslocamentos verticais -P = 36,90 kN – Uy (cm).....	137
5.8.Tensões normais - P = 36,90 kN – Sx ($\times 10^{-1}$ kN/cm ²).....	137
5.9 . .Volumes - Vista frontal "MA"	138
5.10..Volumes - Perspectiva - protótipo "MA"	139
5.11. Malha de elementos finitos - Detalhe	139
5.12. Viga tipo "MA" - Diagrama: P(kN) x Uy (mm)	140
5.13. Deformada global para 12,30 kN – viga "MA"	141
5.14 . Deslocamentos verticais (cm) - Uy para 12,30 kN	141

LEI DO DIREITO AUTORAL
 Todos os direitos reservados e protegidos
 pela Lei 9.610/1998.
 Este arquivo não pode ser reproduzido ou
 transmitido sem que sejam tomados os meios
 e entregados: eletrônicos, mecânicos,
 fotográficos ou quaisquer outros.

5.15. Tensões normais para $P= 12,30 \text{ kN-Sx}$ ($\times 10^{-1} \text{ KN/cm}^2$)	142
5.16.Deslocamentos verticais U_y (mm) para 24,6 kN	142
5.17.Tensões normais S_x ($\text{KN.10}^{-1}/\text{mm}^2$) – para 24,6 kN	143
6.1.Gráfico dos deslocamentos verticais:teóricos, experimentais e numéricos para as vigas do tipo “A”	145
6.2.Gráfico dos deslocamentos verticais:teóricos, experimentais e numéricos para as vigas do tipo “AM”	146
6.3.Tensões normais do protótipo 11MA	149
6.4.Tensões normais do protótipo 12MA	150
6.5.Tensões normais numéricas – protótipo M	150
7.1 - Esquema de solicitações e geometria da VCMC	157

LISTA DE TABELAS

2.1. Valores de α_e em função do diâmetro do prego.....	60
4.1. Resultados de ensaios de compressão em cp's de compensado.....	80
4.2. Resultados de ensaios de tração em corpos-de-prova de compensado	81
4.3. Resultados de ensaios de flexão de corpos-de-prova em compensado	82
4.4. Propriedades mecânicas do compensado utilizado na composição das VCMC	83
4.5. Resultados de ensaios de compressão paralela e normal da madeira	84
4.6. Resultados de ensaios de tração paralela e da densidade da madeira	85
4.7. Resultados dos módulos de deslizamento das ligações em corpos-de- prova de madeira e compensado	88
4.8. Resultados de ruptura dos protótipos tipo A	98
5.1. Malha de elementos finitos – Viga tipo “A”	133
5.2. Malha de elementos finitos – Viga tipo “MA”	138
6.1. Deslocamentos verticais e rigidez das Vigas do Tipo “A”	145
6.2. Rigidez experimental das vigas de emendas transpassadas	146
6.4. Deslocamentos verticais experimentais e teóricos para vigas do tipo A para força de 14,76kN	147
6.5. Deslocamentos verticais experimentais e teóricos para vigas do tipo M para força de 14,76 kN	148
6.6. Deslocamentos verticais experimentais e teóricos para vigas do tipo MA para força de 14,76 kN	148
6.7. Tensões normais na flexão	151

LISTA DE QUADROS

2.1. Valores para γ para cálculo da carga crítica de vigas retangulares 19

2.2. Parâmetros para a força limite de uma ligação 33

2.3. Resistência ao embutimento/compressão da madeira. 37

2.4. Resistência das ligações 50

2.5. Valores para γ 51

2.6. Resistência do compensado em função de sua umidade 53

2.7. Recomendações para estabilidade de vigas compostas de madeira e
compensado 55

4.1. Variáveis da análise estatística 89

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras romanas

- a_i = distância entre o centro de gravidade da seção até a LN da peça;
- A_i = área de cada parte da seção transversal;
- A_c = área da mesa inferior ou superior;
- A_m = área da seção da alma;
- A_t = Área transformada;
- A_w = área da seção transversal da madeira;
- bf = largura total da flange;
- b_w = espessura da alma (compensado);
- B = fator de forma;
- d = diâmetro do pino;
- E_b = módulo de elasticidade devido à flexão;
- E_c = módulo de elasticidade do compensado;
- $E_{co,m}$ = módulo de elasticidade médio à compressão paralela às camadas;
- $E_{c90,m}$ = módulo de elasticidade médio devido à compressão normal às fibras;
- E_i = módulo de elasticidade de cada material;
- E_m = módulo de elasticidade da madeira;
- $E_{to,m}$ = módulo de elasticidade devido à tração paralela às fibras;
- $f_{co,m}$ = resistência média à compressão paralela às camadas;
- $f_{co,k}$ = resistência característica à compressão paralela às camadas;
- $f_{c90,m}$ = resistência média à compressão normal às fibras;
- $f_{c90,k}$ = resistência característica à compressão normal às fibras;
- $f_{to,m}$ = resistência média à tração paralela às fibras;
- $f_{to,k}$ = resistência característica à tração paralela às fibras;
- $f_{u,k}$ = resistência característica à tração do aço do pino;
- f_Y = tensão limite do aço;
- $F_{h,1}$ = resistência ao embutimento;
- $F_{co,m}$ = carga de ruptura média à compressão paralela às camadas;

$F_{\text{máx}}$ = carga máxima de ruptura devido à flexão;

$F_{\text{to,m}}$ = carga de ruptura à tração paralela às fibras;

F_s = Força da ligação limitada pelo prego;

F_w = Força da ligação limitada pela madeira;

G = módulo de elasticidade transversal;

I = momento de inércia da seção composta;

I_o = soma dos momentos de inércia de todos os elementos;

I_t = momento de inércia à torção;

I_y = momento de inércia em relação ao eixo y ;

I_i = momento de inércia componente de cada elemento da seção transversal;

I_m = momento de inércia da mesa inferior ou superior;

I^* = momento inércia da seção parcialmente composta;

I_f^* = momento inércia da mesa parcialmente composta;

K = módulo de deslizamento da ligação;

$\bar{K}$ = módulo de deslizamento equivalente;

K_i = módulo de deslizamento da ligação do elemento i com o elemento 2 (Eurocode 5);

K_{SER} = módulo secante da curva de carga x deslocamento (0 a 40%);

K_u = módulo secante da curva de carga x deslocamento (60 a 70%);

L = vão livre da viga;

M = momento fletor da seção inteira;

M_c = momento fletor da alma;

M_m = momento fletor para mesa superior ou inferior;

M_y = momento produzido no conector;

$M_{y,k}$ = momento de plastificação característico;

N_m = resultante das tensões normais na mesa;

P = carga concentrada;

s_i = espaçamento entre os conectores na interface do elemento i com o elemento 2 (Eurocode 5);

S = espaçamento entre os parafusos das VCMC;

t = espessura da peça de madeira;

LEIDO DIREITO AUTORAL
Todos os direitos reservados e protegidos
pela Lei 9.610/1998.
Este arquivo não pode ser reproduzido ou
transmitido sejam quais forem os meios
empregados: eletrônicos, mecânicos,
fotográficos ou quaisquer outros.

t_1 = espessura da alma;

t_2 = altura da mesa;

T = fluxo de cisalhamento atuante na interface entre mesa e alma;

T_r = resistência à flexão;

V = força cisalhante máxima.

Letras gregas

β = coeficiente de redução da rigidez efetiva;

β_{lim} = valor limite para o qual a resistência da ligação é limitada simultaneamente tanto pela madeira como pelo prego;

γ = coeficiente para cálculo de carga crítica de vigas retangulares;

ρ = densidade da madeira;

σ = tensão normal;

$\sigma_{e,0}$ = tensão de embutimento de primeiro limite;

τ = tensão de cisalhamento;

η = coeficiente de eficiência

Siglas

LVL = *Laminated Veneer Lumber*

MEF = método dos elementos finitos

OSB = *Oriented Strand Board*

VCMC = vigas compostas de madeira e compensado;

RESUMO

O presente trabalho aborda o comportamento de vigas compostas de seção transversal "I" com almas de compensado parafusadas a mesas de madeira maciça, a partir de um estudo teórico e experimental. Sob a conceituação do método dos estados limites e, através da revisão bibliográfica apresentada, realizaram-se estudos com as vigas compostas solicitadas à flexão. Aqui, apresentam-se resultados experimentais e numéricos em relação a deslocamentos verticais, tensões e deformações. Para construção de tais vigas, foram escolhidos materiais (madeira, compensado e parafusos) em função da análise de suas características, das propriedades mecânicas averiguadas em ensaios preliminares bem como de sua disponibilidade no mercado. Visando apresentar nova proposta de estruturas de madeira, oferecendo aos engenheiros mais uma opção de sistema construtivo eficiente, fez-se uma abordagem aos aspectos de montagem de vigas de vãos de 4,40m de comprimento, ou seja, com emendas na região central. Foi apresentado o comportamento de vigas, com tipos diferentes dessas emendas. Em seguida, procedeu-se a análises comparativas entre os resultados de tais ensaios, incluindo aí uma simulação numérica pelo Método dos Elementos Finitos da viga cuja respectiva emenda apresentou melhor comportamento. Estes ensaios permitiram o desenvolvimento de metodologia para o cálculo de rigidez das vigas associadas às formulações do EUROCODE 5 contribuindo para a revisão da NBR7190/97 para dimensionamento de estruturas compostas de madeira e compensado.

Palavras chave: estruturas de madeira, emendas, ligações, vigas com alma de compensado

ABSTRACT

LEIDO DIREITO AUTORAL
Todos os direitos reservados e protegidos
pela Lei 9.610/1998.
Este arquivo não pode ser reproduzido ou
transmitido sejam quais forem os meios
empregados: eletrônicos, mecânicos,
fotográficos ou quaisquer outros.

This theoretical and experimental study approaches the behavior of cross-section "I" composite beams with plywood webs screwed to solid wood flanges. According to the concept of Limit States Design Method and revised bibliography we performed studies with composite beams submitted to bending forces. We presented experimental results regarding vertical displacement, stress and strain. The assembly of such beams was made of materials (wood, plywood and screws) selected according to analysis of their characteristics, mechanical properties studied during preliminary tests and market availability. In order to present a new proposal of wood structures, given to civil engineers and constructors one more option to choose a safe, efficient system, we approached the production of beam of span of 440 cm long with junctions in central portion. We presented the behavior of these prototypes by using different junctions. We did a comparative analysis involving these tests and performed a numerical simulation Finite Element Method with the beam that presented the best behavior. Base on tests a methodology to calculate the rigity was proposed with EUROCODE 5 formulations, developing the NBR7190/97 to design criteria composite plywood webbed beams

Keywords: wood structures, junctions, connections, plywood webbed beams

1

INTRODUÇÃO

A idéia da utilização de elementos estruturais compostos em estruturas de madeira surgiu na segunda metade do século XVII. As peças compostas eram fabricadas em pequenas dimensões, ligadas por elementos metálicos ou outros que tivessem a mesma função. Estruturalmente, chapas de compensado podem ser utilizadas em composição com a madeira maciça, formando elementos de seções caixão, T ou I, para painéis de parede, treliças, vigas, entre outros. Dessa composição obtêm-se opções seguras e de custo módico para estruturas destinadas aos mais diversos tipos de edificação, seja de pequeno, médio ou grande porte.

Os registros de estruturas construídas com madeira maciça e compensado não são muito numerosos no Brasil. Mesmo assim, podem ser citadas obras de grande porte realizadas nas décadas de 50 e 60 pela TEKNO S.A., de São Paulo, como: o Ginásio do São Carlos Clube (São Carlos-SP), o Ginásio Municipal de Sorocaba (Sorocaba-SP), e outras obras com vãos livres superiores a 30 metros em diversas cidades do interior de Minas Gerais, São Paulo e Paraná, além de coberturas de pavilhões para feiras e outros eventos, em Porto Alegre, e etc..

Nos sistemas compostos as principais seções transversais de vigas são formadas de alma de chapa de compensado e mesas de madeira. A distância entre as mesas proporciona uma maior rigidez à flexão, permitindo que esses elementos resistam a maior parte do momento fletor. As almas resistem à maior parte da força cortante, já as ligações têm a função de transmitir os esforços entre as mesas e as almas, resistindo ao cisalhamento, principalmente na direção longitudinal. A FIG. 1.1 mostra os tipos mais comuns de vigas compostas de madeira e compensado existentes.

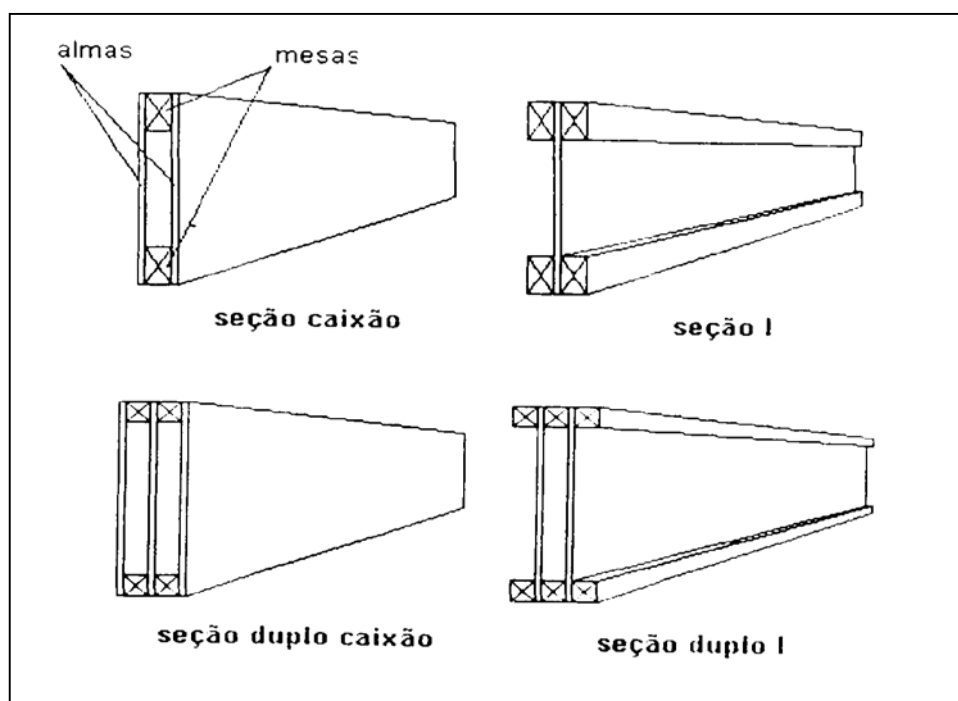


FIGURA 1.1. Tipos comuns de vigas compostas de madeira e compensado

Iniciaram-se no Brasil, por volta da segunda metade do século passado pesquisas voltadas ao estudo de vigas compostas. Diversas informações relevantes foram, desde então, disponibilizadas por diferentes pesquisadores. Entretanto, com a entrada em vigor do texto da NBR 7190/97 - Projeto de Estruturas de Madeira, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), fundamentada no método dos estados limites, sentiu-se a necessidade de se desenvolver trabalhos que definam adequadamente os critérios para o

dimensionamento de vigas compostas de madeira maciça e chapas de compensado.

O uso dos produtos derivados da madeira cada vez mais vem proporcionando soluções estruturais interessantes e práticas, conforme pode ser constatado em diversas referências da bibliografia nacional e internacional. Boa parte de tais soluções se deve ao expressivo desenvolvimento da indústria dos derivados da madeira, que vem permitindo a obtenção de produtos com características físicas e mecânicas altamente satisfatórias.

Em relação à madeira maciça, ainda é grande sua utilização estrutural no país em estruturas provisórias, ou elementos estruturais que carregam estigma de “estruturas caras”, o que, muitas vezes, é motivado pela falta de projeto ou execução por pessoas sem qualificação, levando essa imagem negativa ao material. As pesquisas utilizando madeiras de reflorestamento, como o eucalipto, estão sendo exploradas para construções de interesse social, como projetos habitacionais. Salientando que estimativas divulgadas sobre áreas plantadas de eucalipto no país levam a indicadores significativos, justifica-se ampliar os estudos desse gênero para a produção de componentes de construção para a habitação.

O desenvolvimento dos critérios de projeto e técnicas construtivas encontra-se em fase de significativo avanço em países europeus e norte-americanos. No Brasil, esta temática vem ganhando espaço em diversas instituições de pesquisa, com o objetivo de gerar subsídios para viabilizar a disseminação desta prática entre os profissionais ligados à construção de estruturas de madeira.

1.1 - Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal determinar parâmetros para o estabelecimento de critérios de dimensionamento de vigas compostas de seção “I”, com mesas de madeira maciça e alma em chapa de compensado (VCMC), à luz da NBR-7190/1997 – Projeto de Estruturas de Madeira (ABNT).

Os objetivos específicos são:

- comparação dos resultados teóricos (normativos), numéricos e experimentais de deslocamentos verticais, tensões e deformações de vigas com vãos de 220cm e 440cm;
- elaboração de proposta para o dimensionamento de vigas compostas de alma de chapa de compensado e mesas de madeira maciça, visando gerar subsídios para a revisão da NBR-7190/1997– Projeto de Estruturas de Madeira (ABNT).

1.2 - Justificativas

Os processos convencionais de soluções estruturais vêm se tornando pouco eficientes para resolver todas as questões relacionadas à demanda de diferentes tipos de edificações do Brasil. Isto leva à necessidade do envolvimento de pesquisas que contribuam para reverter tal situação. Dentro deste contexto, é que os processos construtivos industrializados conseguem ganhar espaço ressaltando a relação custo-benefício, e atendendo a demanda de maneira mais rápida.

A escolha da madeira de reflorestamento, para a construção das vigas, justifica-se pelo alto crescimento de sua produção nos últimos anos. A tendência mundial de se produzir madeira serrada à partir de florestas plantadas começou a ser adotada em vários estados da região centro sul brasileira nos últimos 30 anos com o gênero "*Eucalliptus*". Considerando que este gênero apresenta-se em fase de desenvolvimento nos setores de produção e processamento, não se pode deixar de evidenciar a valiosa experiência internacional na sua produção e utilização em países como África do Sul, Argentina e Chile cuja tecnologia já vem sendo desenvolvida.

A importância das VCMC evidencia-se no que diz respeito à rapidez e facilidade de sua execução, e à versatilidade da sua produção, que pode ser industrial ou no próprio canteiro de obras. Além disso, a industrialização, garante a qualidade do produto, em função do controle tecnológico inserido no processo, que racionaliza o emprego de materiais. Desta forma, os obstáculos que se relacionam com a utilização de tais vigas podem ser convenientemente superados.

A utilização das VCMC com vãos superiores a 220cm, requer a confecção de emendas ao longo do comprimento, pois a maior dimensão das chapas industrializadas de madeira não excede, em geral, a esta medida. A deficiência de informações sobre o comportamento de tais emendas, tem levado a adoção de soluções nem sempre adequadas, encarecendo demais o custo dos

elementos ou provocando deslocamentos indesejáveis, o que se constitui num aspecto restritivo ao uso das vigas compostas. O estudo do comportamento das vigas confeccionadas com emendas certamente trará contribuição imprescindível para a disseminação desta alternativa na prática cotidiana de projetos de construção de estruturas de madeira.

Após a realização da revisão bibliográfica a ser apresentada no próximo capítulo, constatou-se que a literatura existente sobre este assunto não é suficiente. Os trabalhos encontrados, ainda são escassos, ficando muitos aspectos a serem analisados. Por outro lado, a NBR 7190/97 não aborda de modo conclusivo este assunto, o que contribui para justificar a realização do presente trabalho.

Além dos argumentos já mencionados, salienta-se que poucos trabalhos foram encontrados na literatura, principalmente, no período de 2000 até a presente data, e ainda assim, a análise dos documentos técnicos citados na revisão bibliográfica evidencia o estado da arte, como também a conveniência e a oportunidade do desenvolvimento desta tese.

1.3 - Etapas de desenvolvimento do trabalho

Para se alcançar o objetivo desse trabalho, o mesmo foi dividido em etapas nas quais foram analisadas vigas de seção transversal simétrica tipo “I” com as mesas de madeira *eucaliptus grandis* e a alma em compensado com vãos de 220cm e 440cm. Abordam-se então os seguintes aspectos:

- análise das diversas normas técnicas que tratem da composição de peças de madeira e compensado, visando a definição do texto normativo que apresente critérios de projetos mais adequados ao dimensionamento desses elementos estruturais;
- análise experimental dos materiais, madeira e compensado, para a determinação das propriedades físicas e mecânicas e conseqüente aproveitamento na composição das vigas compostas de madeira e compensado (VCMC), com a definição do tipo de compensado que apresente melhor comportamento mecânico e custo mais reduzido;
- execução de modelos em escala natural de VCMC de comprimentos de 220cm e 440cm para ensaio à flexão, visando a melhor forma de montagem para a pré-fabricação;
- para as vigas de vãos de 440cm definição e análise do tipo de emenda mecanicamente mais adequada ;
- realização de modelamento numérico pelo Método dos Elementos Finitos através do programa ANSYS, para definição dos elementos que melhor representem as VCMC e seus componentes;
- determinação experimental do diagrama de tensões normais na flexão das VCMC;

2

REVISÃO DA LITERATURA

Os objetivos principais dos trabalhos até então publicados visam a definição de critérios para o dimensionamento de vigas compostas levando em consideração o maior número de variáveis intervenientes no desempenho estrutural. Diante desta constatação, foram realizadas, inicialmente, as revisões das literaturas nacional e internacional, disponíveis em relação ao tema em questão.

Em ordem cronológica, a revisão bibliográfica é apresentada em conjunto, literatura nacional e internacional, inseridas em itens diretamente relacionados com a abordagem do trabalho. Portanto, são apresentados os trabalhos encontrados na literatura sobre: aspectos gerais de vigas compostas de madeira e produtos derivados da madeira, estabilidade e ligações de vigas compostas de madeira, métodos e modelos de dimensionamento de ligações para estruturas de madeira, rigidez e resistência das ligações. Posteriormente aos trabalhos, apresentam-se as recomendações de códigos normativos nacionais e internacionais.

2.1 - Trabalhos sobre vigas compostas de madeira e seus produtos derivados – aspectos gerais

Vigas de seção transversal “I”, compostas de madeira, têm sido utilizadas por muitos anos. De acordo com LEICHTI et al (1989), os pioneiros da indústria aeroespacial discutiam o valor estrutural deste tipo de elemento desde 1920, e ainda são utilizados em plataformas e outros fins. Por volta de 1930, empregaram-se vigas “I” em construções européias como componentes estruturais de coberturas e pisos.

HANSEN (1946) apresentou formulações e métodos de cálculo para vigas de seção “I” e caixão de várias dimensões, contribuindo significativamente para o início dos estudos de tal tipo de estrutura. Para a definição de valores de projeto de vigas “I”, ele apresentou, a seguir, o fator-de-forma (B) para determinar tensões na flexão, este concebido em função da geometria da seção cuja finalidade é reduzir o valor de tensão na flexão por motivos de sua má distribuição.

$$B = 0,58 + 0,42[U_d (1 - b_w / b_f) + b_w / b_f] \quad (2.1.)$$

Sendo:

B = Fator de forma;

U_d = depende da razão d_f / d

d_f = altura da flange de madeira;

d = altura total da viga;

b_w = espessura da alma (compensado);

b_f = largura total da flange.

O autor supracitado fez também importantes considerações sobre estabilidade. Definiu que para vigas de seções “I” compostas não apoiadas lateralmente, “a razão máxima de momento de inércia sobre o eixo x para a inércia do eixo y é de 25”. Ou seja, para vigas com flange de largura b_f igual a 5 b_w e altura d_f igual a 10 b_w , o valor d_w não pode exceder a 9 b_w

Posteriormente, o autor definiu o método de cálculo para espaçamento de enrijecedores, bem como a determinação de equação de flecha.

O método baseado em equações de equilíbrio foi desenvolvido por MOHLER (1956, apud SANTANA 1997), estudo no qual se substanciou a norma DIN 1052. Consiste este método em analisar a estrutura em equilíbrio, através de equações de compatibilidade de deslocamentos. Trata-se de um método simples, com soluções analíticas muito aproximadas, limitadas apenas as simplificações impostas pelas hipóteses básicas da Teoria da Flexão. Existe a separação da seção composta em elementos trabalhando independentes e considera-se que os esforços internos sejam equivalentes ao seu conjunto atuante em cada elemento. Existe uma distribuição de esforços onde o momento fletor é equivalente a momentos fletores atuantes nas mesas e na alma além de um binário formado por forças atuantes no centro de gravidade das mesas. A influência da ligação é considerada, e a partir de uma equação diferencial que considera o deslocamento relativo entre elementos, obtêm-se uma expressão para o fluxo de cisalhamento na ligação proporcionando o dimensionamento da mesma.

NEWLIN e TRAYER (1956) apresentaram estudos sobre deslocamentos em vigas, “I”, caixão e de seção retangular levando em consideração a deformação sofrida pela alma ao cisalhamento. Concluíram que, devido a magnitude das distorções de resultados de flechas apresentados por essa deformação, torna-se essencial a consideração da parcela do cisalhamento nos deslocamentos ou flechas da viga composta. Especialmente para vigas “I” ou caixão onde esta deformação é proporcional ao momento fletor e pode ser expressa por KPL/G , sendo P o carregamento na viga de vão L , sendo G o módulo de deformação transversal e K um coeficiente de forma da referida seção transversal, a flecha pode ser determinada pela expressão:

$$Y = \frac{PL^3}{48EI} + \frac{KPL}{G} \quad (2.2)$$

$$\text{onde } K = \left[\frac{1 + 3/2(K_2^2 - K_1^2)K_1(t_2/t_1 - 1)}{K_2^2} \right] \frac{K_2^2}{10L}$$

Sendo:

K_1 = distancia do eixo neutro ao ponto médio da mesa;

K_2 = distancia do eixo neutro à fibra mais externa;

t_1 = espessura da alma;

t_2 = altura da mesa.

Dando continuidade a esse estudo, STIEDA (1967) continuou a explorar as expressões que determinam a flecha devido ao cisalhamento. Usou para tanto a aproximação de métodos de energia de deformação para calcular os fatores de rigidez ao cisalhamento, usando como exemplo em seu estudo seções “I”, caixão, além de outras simétricas. O propósito desse trabalho foi ampliar as formulações apresentadas por NEWLIN e TRAYER (1956). Resumiu em tabelas o coeficiente de forma K para várias dimensões de vigas e apresentou apenas, os resultados para vigas de seção caixão.

Procedimentos para o projeto de uma viga composta com alma em compensado foram detalhados por HOYLE (1973) a partir de cargas, vãos e deslocamentos. O procedimento de cálculo apresentado consistiu em:

- estimar parâmetros geométricos, como as dimensões da viga, a partir de uma tabela de pré-dimensionamento baseada nas seções comerciais americanas, vãos e em carregamentos. A partir daí, estabelecer os momentos de flexão, os momentos de inércia e o módulo de elasticidade necessários para resistir a esta flexão;
- determinar o cisalhamento horizontal e vertical na superfície de contato entre a mesa e a alma de compensado, escolhendo as dimensões delas para que o conjunto resista a esse cisalhamento;

- em função das propriedades determinadas para a seção, deve-se calcular o deslocamento e compará-lo ao critério de dimensionamento, alterando, se necessário, as propriedades da mesma;
- determinar as dimensões dos enrijecedores e seus espaçamentos, bem como os detalhes das emendas para as almas e as mesas.

Tendo em vista a não existência, neste procedimento, do dimensionamento das ligações, HOYLE (1973) apresentou um exemplo para este tipo de estrutura com ligações coladas, considerando a seção monolítica. Em função destes procedimentos, no primeiro item, onde é feito um pré-dimensionamento da seção, ele utilizou uma tabela que mostra que a partir das relações entre vão e carregamento linear na viga, encontra-se uma seção inicial a ser considerada nos cálculos. Em se tratando de espécies de madeira e compensado com características de rigidez muito diferentes, como é o caso dos compensados encontrados no Brasil, a referida tabela certamente não é um bom parâmetro, pois requer estudos para aferir resultados para a sua utilização.

O material “*hardboard*”, produto alternativo derivado da madeira, foi analisado como alma de viga composta por SUPERFESKY e RAMARKER (1976). Apresentaram pesquisas com vigas I relacionando-as com vigas compostas de madeira e compensado no que diz respeito à semelhança de comportamento dos dois materiais em ensaios de flexão ao longo de 2 anos. Incluíram em seus estudos, além da capacidade de carregamento das vigas, uma análise em função de variação de temperatura.

Outros que também apresentaram semelhanças em relação ao comportamento de vigas com alma de compensado e de “*hardboard*” foram RODD e HILSON (1979). Utilizaram esse material para alma de vigas compostas de seção “I”, por constatarem que o mesmo possui resistência ao cisalhamento semelhante ao compensado. Evidenciaram a capacidade de resistência ao cisalhamento utilizando análise dimensional de tais elementos funcionando como almas de vigas. Utilizaram protótipos de 60cm de altura,

variando as demais dimensões, bem como o número de vãos de -2 a 8- entre os enrijecedores da alma. Apresentaram a relação d/t , ou seja, altura/espessura da viga com o tipo de ruptura e tensão máxima de cisalhamento obtidos nos ensaios.

Posteriormente, outros trabalhos sobre vigas “I” compostas de madeira e “*hardboard*” como o de MCNATT (1980), deram continuidade à ampliação de conhecimentos nesta área. Entretanto, não existindo ainda o referido material no mercado brasileiro, dar-se-á ênfase aos trabalhos voltados para o uso do compensado nas almas das vigas.

Outro produto alternativo derivado da madeira “*waferboard*” foi analisado por SAMSON (1983). Foram ensaiados 100 modelos de vigas de seção transversal duplo “I”, em relação ao tipo de madeira utilizada para a fabricação das mesas e sua respectiva resistência à flexão, através de ensaios destrutivos. Empregaram-se 5 classes diferentes de madeira sem a interferência de fatores como ligações. As vigas foram coladas e consideradas rígidas e com o mesmo intuito, as almas possuíam pequena altura, aproximadamente 21 cm, sendo fabricadas com chapas duplas.

Neste trabalho, constatou-se uma variação do módulo de elasticidade dessas vigas em torno de até 50%. Concluiu-se que a qualidade da madeira, em função de sua classe e, conseqüentemente, de seu módulo de elasticidade, influencia consideravelmente na capacidade de resistência à flexão. Verificou-se que o uso mais eficiente deste material é obtido quando a resistência à tração na mesa é aproximadamente de 1,25x a resistência à sua compressão.

Poucas publicações, no Brasil, tratam do dimensionamento de seções compostas por chapas de madeira compensada. Entre essas, pode-se citar PERILLO (1985) apud SANTANA (1997). O primeiro, apresentou os critérios de dimensionamento desenvolvidos baseados em normas estrangeiras da época (década de 40). Não considerando as deformações por cisalhamento e a deformabilidade das ligações, apresentou a teoria de flexão para o

dimensionamento das seções. Entretanto, o segundo autor apresentou em seu trabalho os mesmos critérios de dimensionamento da norma DIN1052.

Vigas compostas com alma em madeira maciça e mesas em derivados de madeira como o compensado e o OSB de seção transversal “I” e “T” foram investigadas por MCCUTCHEON (1986) apud ALVIM (2002). O autor, adotando o método da seção transformada, apresenta uma metodologia simplificada para cálculo de estruturas compostas, baseado na teoria da fundação elástica desenvolvida por KUENZI (1956).

Ao analisar o estado da arte para modelos estruturais leves, FALK e WOLFE (1989), apresentaram uma revisão bibliográfica abordando o comportamento de vários modelos em produtos derivados da madeira. Demonstraram comparações das variações das propriedades dos materiais estruturais leves quando aplicadas em elementos do tipo treliça, painéis e outros.

LAUFENBERG (1993) realizou um estudo sobre o desenvolvimento de produtos derivados da madeira como LVL, OSB, MDF e outros. Apresentou comparações entre propriedades de resistência destes materiais, aborda as vantagens da substituição da madeira maciça por estes produtos, tratando-os como elementos componentes de estruturas leves. Enfatizou os avanços no desenvolvimento tecnológico e de mercado, adquiridos nas últimas décadas, sendo as responsáveis, as pesquisas que vem sendo realizadas. Segundo o autor, os fatores mais importantes a considerar na substituição da madeira são: economia, tecnologia e criatividade.

CALIXTO e WHEAT (1994) propuseram um método de análise de vigas compostas mediante a utilização do princípio da energia através de cálculo variacional, com as seguintes considerações:

- energia de deformação associada às deformações, devida a forças normais e suas respectivas deformações devido a momentos flettores;
- energia de deformação relacionada com a deformação dos conectores;

- energia potencial de cargas externas aplicadas.

Para cada uma dessas considerações, foram montadas equações diferenciais, chegando-se a um sistema de energia potencial total em que as funções incógnitas são: o deslocamento longitudinal de duas camadas e o deslocamento transversal. A solução envolveu procedimento numérico e o método baseado nos princípios de energia que permite a inclusão de uma relação não linear para a ligação, tornando-se assim um método mais abrangente. Apesar disso, pode ser considerada analiticamente difícil a resolução do sistema de equações diferenciais resultante, sendo necessário o auxílio de métodos numéricos.

RAMARKER e DAVISTER (1997) publicaram estudo sobre a análise de três vigas “I” com alma de compensado (6 mm e $h = 40$ cm) e flanges de madeira maciça serrada ($b = 2,5$ cm e $h = 10$ cm). Os ensaios foram realizados com modelos de 1000cm de comprimento, 26 enrijecedores unidos por cola adesiva a base de resorcinol.

O trabalho desses autores apresentou critérios fundamentais de projeto para aplicação do compensado em estruturas. Considerando que “seções planas permanecem planas” consideraram que as tensões variam diretamente com a distância ao eixo neutro. O método das seções transformadas foi empregado, fazendo com que a área de madeira maciça da seção fosse equivalente em compensado. Então a seguinte expressão foi considerada:

$$A_t = (E_w / E_h) \cdot A_w \quad (2.3.)$$

Sendo:

A_t = Área transformada

E_w = módulo de elasticidade da madeira

E_h = módulo de elasticidade do compensado

A_w = área da seção transversal da madeira

Os seguintes parâmetros foram determinados: força cortante entre as lâminas do compensado, tensões de tração, compressão e módulo de elasticidade. Foram medidas as flechas e as deformações, o módulo de elasticidade encontrado foi menor que os citados nas normas americanas. As três vigas ensaiadas romperam por tração nas flanges.

Em seu estudo sobre vigas compostas com seção caixão, SANTANA (1997) realizou análise experimental em vigas de madeira e compensado com o objetivo de caracterizar a rigidez da composição. Descreveu o comportamento de modelos reduzidos no que diz respeito a deslocamentos e deformações fazendo comparações com modelos teóricos. Utilizou ligações pregadas variando o espaçamento dos pregos. Conclui que a emenda das peças de madeira, em vigas maiores que 220cm é um problema a ser investigado. A mesma autora: SANTANA (2000), posteriormente, inseriu uma abordagem numérica aos seus estudos.

FERREIRA (1999) apud STAMATO (2000) realizou estudo para o dimensionamento de vigas com seções “I” compostas de madeira para pontes. Avaliou os critérios de dimensionamento do EUROCODE 5 e da NBR7190/97, comparando resultados de ensaios experimentais para determinação de rigidez com valores teóricos. De acordo com sua avaliação, o autor verificou que o método de dimensionamento do EUROCODE 5 leva a valores de rigidez próximos dos valores experimentais, concluindo que no dimensionamento de ligações pregadas para seções compostas, para obtenção do momento de inércia e tensões, devem ser utilizadas as expressões recomendadas pelo EUROCODE 5.

SZÜCS e PRADA (2000) apresentaram trabalho sobre pré-fabricação de viga composta com seção “I”. O estudo enfocou a determinação de solução estrutural para obtenção de vigas com alta resistência e de baixo peso próprio, destinadas à habitação residencial em sistema construtivo industrializado e convencional.

Os autores realizaram ensaios de caracterização e de vigas compostas dos materiais: *Pinnus taeda* e composto multilaminado de 11 camadas de 3,2 mm de espessura. As vigas foram analisadas em função de seu comportamento mecânico e elástico apresentando um bom comportamento na flexão e alta rigidez.

Os elementos de ligação utilizados por SZÜCS e PRADA (2000) nas vigas foram entalhes múltiplos com dentes de espessura de 4mm. Verificou-se equilíbrio da geometria dos mesmos, pois a ocorrência da ruptura mais freqüente foi por cisalhamento na linha neutra ou na interface da mesa com a alma. O baixo peso próprio representou apenas 0,33% da carga de serviço da viga e 0,24% da carga de ruptura e isso possibilita fácil manuseio na obra. Concluem ainda que, o composto multilaminado utilizado pode ser melhorado em função de suas características.

STAMATO E CALIL (2000), para aferir modelos de dimensionamento, montaram duas vigas de seção composta de perfil I, sendo uma com ligação alma/mesa colada e outra com pregos de 5,4mm de diâmetro.

Para a viga colada utilizou-se o método das seções transformadas, pois o módulo de elasticidade das almas é inferior ao módulo das mesas de madeira. Encontraram valores teóricos bem próximos aos experimentais confirmando que a formulação adotada foi adequada para o dimensionamento de vigas compostas coladas.

$$t_{TRANSF} = (E_{ALMA} / E_{MESA}) \cdot t_{REAL} \quad (2.4)$$

Sendo:

t_{TRANSF} . = espessura transformada

E_{MESA} = módulo de elasticidade da madeira

E_{ALMA} = módulo de elasticidade do compensado

t_{REAL} = espessura real

Após realizar ensaios de flexão e comparar com análise teórica, os autores concluíram para vigas compostas pregadas, que no EUROCODE 5 existe uma

diferença de aproximadamente 30% em relação aos valores encontrados nos ensaios para flecha. Foi feita uma variação de espaçamento entre os pregos utilizados e observou-se o ganho de rigidez com a redução dos mesmos. O modo de ruptura dessas vigas foi caracterizado por cisalhamento da alma de compensado.

ALVIM (2002) analisando seções compostas de madeira para pilares, propôs um modelo de rigidez efetiva, com o uso das expressões do EUROCODE 5. Realizou ensaios com pilares de madeira e, em sua análise experimental, obteve resultados satisfatórios, quando comparados com o modelo teórico proposto.

BISGEIER (2003) apresentou estudos sobre vigas de seção “I” compostas com mesas em madeira maciça e alma em OSB com o objetivo de industrialização. Apresentou o processo de montagem das vigas utilizando cola para a união da alma com as mesas. Neste estudo foi apresentado também uma comparação de custos, evidenciando as vantagens mediante as principais características do sistema composto, a leveza.

2.1.1 – Considerações sobre estabilidade de vigas compostas

As vigas compostas de madeira e compensado podem apresentar-se esbeltas devido a grande relação entre altura e largura. A perda de estabilidade em vigas é estudada em TIMOSHENKO e GERE (1961), que apresentam conhecimentos básicos sobre o assunto analisando vigas de seção retangular e propondo correspondências à vigas compostas.

SANTANA (1997), ao realizar trabalho sobre vigas caixão de madeira e compensado, para o estudo da estabilidade, utilizou a expressão sugerida por TIMOSHENKO e GERE (1961) para vigas retangulares para o cálculo de carga crítica de sua viga composta:

$$P_{cr} = \gamma \cdot \sqrt{E I_y G I_t / L^2} \quad (2.5)$$

Sendo:

E = módulo de elasticidade

G = módulo de elasticidade transversal

I_t = momento de inércia à torção

I_y = momento de inércia em relação ao eixo y

L = distância entre os pontos de contraventamento lateral

Os valores de γ utilizados estão no QUAD. 2.1:

QUADRO 2.1. Valores de γ para cálculo da carga crítica de vigas retangulares

Carga uniformemente distribuída	$\gamma = 28,3$
Carga concentrada a cada terço do vão	$\gamma = 19,68$
Carga concentrada no meio do vão	$\gamma = 16,94$

Fonte: TIMOSHENKO e GERE (1961)

A estabilidade de vigas caixão de compensado foi analisada por HUNT, BRYANT et al (2000). Analisaram vigas caixão montadas por estudantes de engenharia da Universidade de Auckland com o objetivo de verificar a facilidade de montagem e a alta rigidez alcançada por este tipo de estrutura. O trabalho descreveu as propriedades dos compensados bem como sua constituição. Estudaram protótipos de viga pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) que, segundo os autores, oferece muitas vantagens como fácil variação de parâmetros.

Citaram ainda, que as normas de madeira são insuficientes sobre o assunto de estabilidade, entre elas: UBC “Uniform Building Code” (1997) e NZS 3603 “Standarts New Zeland” (1993), fazendo comparações entre valores experimentais sobre rigidez, tensões de cisalhamento, cargas de ruptura e valores de resistência característica. O trabalho informa também que a posição do compensado influencia na eficiência de seu uso: na posição vertical o compensado é vantajoso na presença predominante de tensão de

cisalhamento e, na posição horizontal, esse trabalha melhor quando há predominância de momento fletor.

2.2–Ligações em vigas de madeira

Para a compreensão do comportamento de um sistema estrutural é necessário o entendimento das ligações entre os elementos que compõe este sistema. Os tipos usuais de ligações para vigas compostas de madeira dependem da forma da seção transversal e das condições do uso das mesmas.

2.2.1– Tipos usuais de ligações para vigas compostas

As seções retangulares utilizam os mais variados tipos de conectores além da cola, já as seções “I” ou caixão utilizam, normalmente, os pinos metálicos ou parafusos. Em estruturas de madeira, os tipos básicos de ligação entre elementos estruturais são: por contato, mecânicas, coladas ou a combinação dessas.

- Contato

Para as vigas compostas, ligações por contato não são utilizadas isoladamente. Existem esforços de tração que não podem ser absorvidos por esse tipo de ligação que consiste apenas em contato entre as superfícies das peças. As ligações podem ser feitas por entalhes associadas à colagem ou conexão metálica.

- Coladas

As ligações, constituintes da união entre peças por meio de poderosos adesivos, são muito utilizadas em estruturas compostas de madeira, principalmente, nos Estados Unidos, onde essas estruturas são industrializadas e catalogadas. As vantagens apresentadas são a alta resistência e rigidez, e as desvantagens são a susceptibilidade à rupturas frágeis. SMITH e FOLIENTE (2002) admitem a fragilidade das ligações coladas em função do controle de qualidade em sua execução.

- Mecânicas

Quando o elemento de ligação penetra nas peças de madeira, caracteriza-se a ligação mecânica, tipo mais comum em estruturas compostas. Os elementos para tais ligações se dividem em pinos e conectores. Os pinos, segundo MALLORY, PELLICANE e SMITH (1997 apud SOLTIS, 1997) são resistentes a cargas axiais e de cisalhamento podendo constituir-se de pregos, parafusos ou cavilhas. Entre os diversos tipos de pinos existentes, os pregos apresentam-se como um sistema de fácil instalação e alta resistência.

Os pregos utilizados, em estruturas de madeira, podem ser de seção circular ou quadrada (prego de marinho), com hastes aneladas ou helicoidais. Entretanto, suas dimensões comerciais são limitadas ao padrão de 165mm de comprimento e 7,6mm de diâmetro, o que dificulta o uso para estruturas de grandes dimensões.

Existem dois tipos comuns de parafusos: os passantes com porca e arruela e os auto-atarraxantes. Os parafusos comuns podem ter formas variadas: cabeça sextavada, quadrada, oval ou chata. Os parafusos de aço sextavados com rosca podem ser encontrados com bitolas de diâmetro até 12,7mm, e com resistência característica de escoamento de 240MPa, no mínimo. Nas ligações estruturais, segundo SOLTIS (1997), são mais utilizados, para peças metálicas, os parafusos cilíndricos, lisos, de cabeça sextavada ou quadrada, e para peças de madeira, os de cabeça oval com rosca e porca na extremidade. Segundo este autor, devem ser instalados com folga máxima de 1 a 2mm e apertados com a porca, para reduzir a pressão de apoio na superfície da madeira utilizam-se arruelas metálicas. A NBR 7190/97, recomenda que a pré-furação seja igual à soma do diâmetro do parafuso acrescido de máximo 0,5mm, para que a ligação seja considerada rígida.

Os parafusos auto-atarraxantes são produzidos nos mesmos diâmetros que os comuns com porca, diferenciando-se apenas na forma de fixação que se faz pela parte rosqueada ancorada na madeira ao longo do fuste do parafuso.

Ligações por conectores ou elementos de superfície, como as chapas dentadas de metal, anéis rachados e/ou placas de cisalhamento, são soluções de grande praticidade. Entretanto, muitas vezes não é opção que o sistema fique exposto, devido a sua proteção e fator estético. Nada se encontra na literatura em relação a vigas compostas de madeira e compensado utilizando este tipo de conexão.

SMITH e FOLIENTE (2002) utilizaram ligações mecânicas entre peças de madeira para transmitir esforços de momento fletor. Obtiveram resultados que demonstraram o grande potencial das ligações mecânicas, que, por não apresentarem comportamento elástico linear, representam um ponto frágil.

2.2.2 – Trabalhos sobre ligações em vigas compostas de madeira

RACHER (1996) apresentou um desenvolvimento de equações para o dimensionamento de ligações rígidas recomendadas pelo EUROCODE 5. Neste estudo, baseou-se no comportamento de uma ligação entre peças de seção maciça retangular, aplicável para estruturas de madeira e para madeira laminada colada. Segundo MILNER e WOODARD (1995) apud ALVIM (2002), os estudos de RACHER (1996) são utilizados para cálculos estruturais em peças compostas de compensado. Entretanto, este autor considera esta forma de utilização das equações desenvolvidas por RARCHER (1996) questionável, em função da diferente natureza dos elementos que compõe uma seção composta e do mecanismo de transferência de tensões entre esses elementos.

Ao analisar vigas caixão de compensado e madeira, SANTANA (1997) afirmou existir a influência da deformação das ligações nos deslocamentos da viga composta, pelo que esta deve ser investigada por uma análise de soluções de equações diferenciais da viga parcialmente composta. A autora descreveu, assim, as equações constituídas de duas parcelas: sendo a primeira a solução dada pela teoria da flexão e a segunda a consideração do efeito da composição parcial devido a deformação da ligação. Após essa análise

criteriosa observou a influência dos valores de dimensões e comprimento do vão, concluindo que a sensibilidade à variação de qualquer parâmetro da viga é sempre maior para menores valores do módulo de deslizamento da ligação.

Quanto à rigidez, sua determinação depende das características da ligação, pode ser determinada através de ensaios. Observa-se que as recomendações para a determinação do módulo de deslizamento diferem muito de uma norma para outra. Conforme já citado anteriormente, MOHLER (1956), apud SANTANA (1997) realizou trabalho descrevendo a deformação das ligações sob esforços de cisalhamento. Utilizou para isso equações de equilíbrio e equações de compatibilidade de deslocamentos.

Segundo STAMATO (1998), quando duas peças de madeira solicitadas por uma força longitudinal são ligadas uma à outra, ocorre uma transmissão de esforços entre elas, de forma que a ligação sofre um cisalhamento. Sob a ação de tal força, devido à deformação do pino e da madeira na região em torno do furo, as peças passam a deslizar entre si.

De acordo com a FIG. 2.1, o autor considerou um pino individualmente, admitindo que o seu comportamento seja o mesmo em todos os demais. Se a ligação é tracionada, em cada peça a força de cisalhamento é transmitida à madeira, gerando uma distribuição de tensões de compressão sobre a parede do furo. A mesma distribuição age sobre o pino, o que leva a um esmagamento da madeira na parede do furo e uma conseqüente flexão do pino. As hipóteses básicas consideradas por ele foram:

- o efeito do atrito entre as peças pode ser desprezado no comportamento da ligação;
- as componentes de tração surgidas na direção do eixo do pino, em razão de sua configuração deformada, podem ser desprezadas;
- a distribuição da carga de cisalhamento entre os pinos é uniforme, hipótese que contribui para o estudo individual de cada um;
- a distribuição de tensões na parede do furo pode ser aproximada por uma distribuição de tensões no plano da ligação, sendo considerada uniforme.

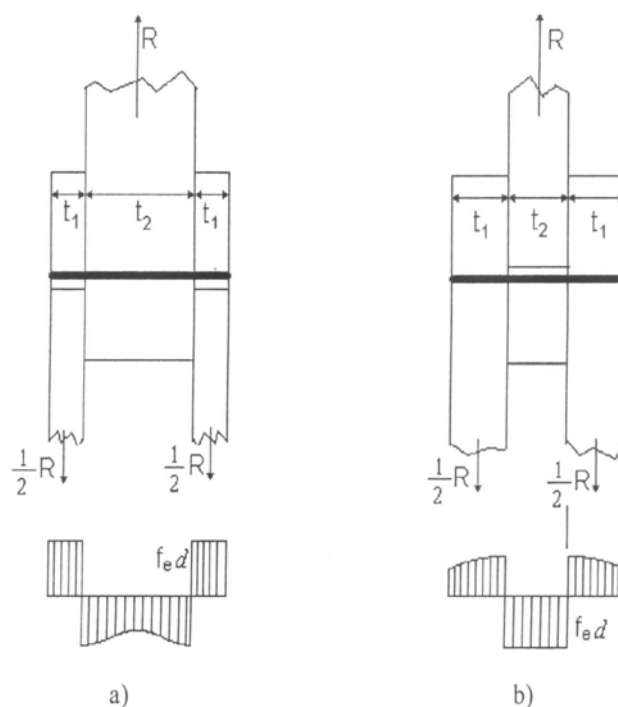


FIGURA 2.1- Esquema da distribuição de tensões sobre um pino em uma ligação tracionada. Fonte: STAMATO (1998)

Acrescente-se ainda que o autor analisou cuidadosamente o comportamento das ligações em função de modelos teóricos: Modelo de JOHANSEN (1949 apud SANTANA, 1997) e NBR 7190/97. Realizou ensaios experimentais após analisar vários métodos de ensaio. Paralelamente à investigação experimental, efetuou modelação numérica por elementos finitos, com o software ANSYS 5.2. Para tanto, testou vários tipos de elementos discretos apresentados pelo programa, considerando o problema plano e espacial. O compensado foi considerado como material de comportamento puramente elástico e elasto-plástico. A resistência das ligações depende da resistência da madeira ao embutimento e à sua flexão. Tanto o embutimento, quanto a flexão do pino, apresentam comportamento plástico. Portanto, a capacidade de carga de um pino metálico pode ser formulada com base nesse comportamento.

O autor, para analisar vigas “I” de madeira e compensado, descreveu a metodologia para ensaios de embutimento de pinos em compensados. Baseou-se na Norma Brasileira NBR 7190/97 que em seu anexo B especifica os procedimentos para a determinação de diversas propriedades físicas e

mecânicas para a madeira maciça. Apesar desta norma não possuir metodologia diretamente aplicável para compensados, STAMATO (1998) fez algumas adaptações (FIG 2.2).

Para a implantação de métodos mais objetivos de cálculos estruturais, é essencial entender o comportamento das ligações. Caso contrário, a aplicação dos estados-limites pode ser distorcida, afastando os resultados teóricos do comportamento real. Conclui o autor que a resistência ao embutimento de uma ligação é fortemente afetada pela espessura da peça de madeira, bem como pelos espaçamentos dos pinos entre si e dos pinos e sua extremidade; e também pela pré-furação e as características da madeira.

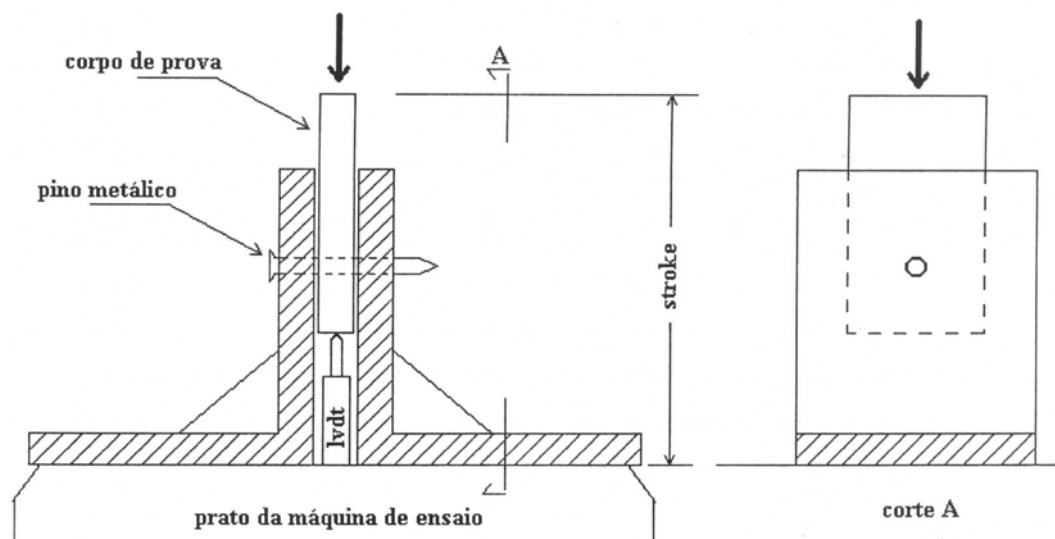


FIGURA 2.2 – Corpo de prova de ensaio de embutimento
Fonte: STAMATO (1998)p.89

SUCZS e PRADA (2000) realizaram trabalho com vigas compostas de madeira e multilaminado, utilizando Entalhes Múltiplos (*Finger-Joints*), cuja geometria seguiu critérios estabelecidos pela norma DIN 68140 (Ensaio de Vigas coladas), DIN 1052 (Cálculo de Estruturas Coladas). Tal composto multilaminado apresentou, em seu processo de colagem, o adesivo fenol-formaldeído a prova d'água, atendendo à norma britânica BS 1455. Na união das peças de madeira maciça componentes da mesa foi realizada a usinagem dos entalhes múltiplos, utilizando-se no processo de colagem, o adesivo

estrutural resorcinol-formaldeído (*Cascophen RS- 216M*) e também o adesivo polímero isocianato (*Koyo-Bond*). A cura de tal adesivo se dá sob uma ampla variação de temperatura, possuindo grande resistência a água, calor e solventes.

INOUE et al (2000) apresentaram inovação em termos de conexão em trabalho sobre vigas compostas utilizando compensado de 12mm e madeira nativa do Japão (*Sugi*). Montaram duas vigas: uma tipo caixão e outra treliça. As vigas possuíam 720cm de comprimento e 60cm de altura e esforços foram aplicados em dois pontos eqüidistantes de um terço do vão. Ambas foram analisadas com e sem os conectores especiais. Após uma série de ensaios experimentais com variação de temperatura e umidade, os autores constataram muitas vantagens no uso desses conectores, como: fácil controle de resistência, fatores estéticos, resistência ao fogo, resistência à corrosão e um aumento de resistência nas vigas devido ao uso desses conectores.

Utilizando corpos de prova compostos de compensado e madeira laminada colada, HWANG et al (2002) analisaram o efeito da força cortante nas ligações. Com o objetivo de verificar o comportamento mecânico da composição em relação às propriedades de resistência ao cisalhamento, efetuaram medições de deslocamentos e definiram o módulo de deslizamento para a composição.

GÓES (2002) analisou as considerações do EUROCODE 5, EHLBECK e LARSEN (1991) em relação ao módulo de deslizamento em ligações de peças de madeira. Considerou os valores de K_{ser} e K_u como módulos secantes da curva de “carga x deslocamento” para os níveis respectivamente de 0 a 40% e 60 a 70% em relação à carga máxima da ligação, (FIG 2.3).

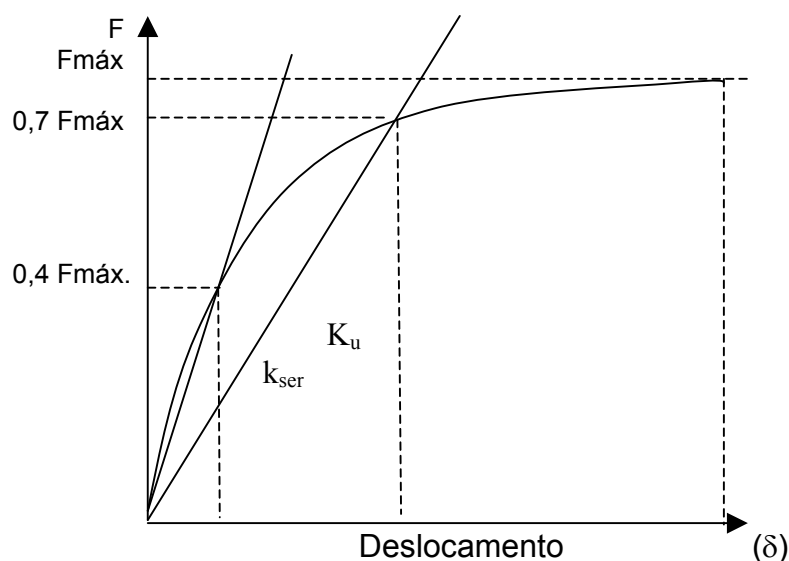


FIGURA 2.3– Módulo de deslizamento
Fonte: GÓES (2002) Pág.96

2.2.3 - Métodos e modelos de dimensionamento de ligações pregadas

Usualmente, quando uma seção composta é colada, seu dimensionamento é feito pela teoria da flexão. Entretanto, ao se tratar de uma ligação pregada, a deformação deve ser considerada, e sendo assim, o comportamento da viga composta é mais complexo exigindo um estudo mais detalhado. Neste item, apresenta-se uma revisão entre métodos e modelos de dimensionamento de ligações pregadas encontradas na literatura.

2.2.3.1 – Modelo em fundação elástica

A abordagem do problema das ligações pode ser a utilização de um modelo de viga sob fundação elástica. KUENZI (1953) apud SANTANA (1997) propôs um modelo de dimensionamento para ligações, considerando o pino semelhante a uma viga apoiada em fundação elástica. Considerando a equação de uma viga em fundação elástica, submetida a uma distribuição de força representada pela função $q(x)$, apresentou a expressão de rigidez da mesma igual a:

$$EIv^{iv}(x) = q(x) - q_r(x) \quad (2.6)$$

Sendo:

EI = rigidez da viga;

$q_r(x) = kv(x)$ e k = módulo de fundação

Desenvolvendo esta expressão (2.6) e definindo os demais parâmetros envolvidos, é possível determinar as expressões de flecha. Em seu trabalho, este autor ainda apresentou a possibilidade de determinação do deslizamento de uma ligação em função da força de cisalhamento atuante.

2.2.3.2 - Modelo de escoamento europeu (Yield Model)

O modelo em questão, proposto inicialmente por JOHANSEN (1949 apud SANTANA, 1997), foi baseado na hipótese de comportamento perfeitamente plástico para a madeira e prego. Observando a FIG. 2.4, verifica-se que o comportamento da madeira não é perfeitamente plástico, e, a partir de um determinado valor de solicitação em que se caracteriza a resistência de embutimento, a madeira convencional sofre uma plastificação excessiva.

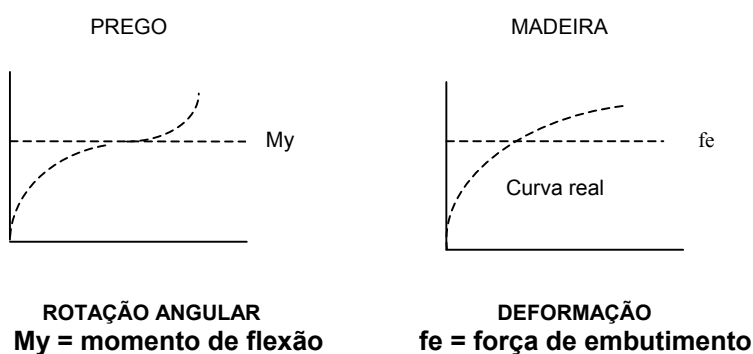


FIGURA 2.4– Diagramas representativos do comportamento da madeira e prego, Fonte:AUNE e PATTON- MALLORY, 1986, p.3.

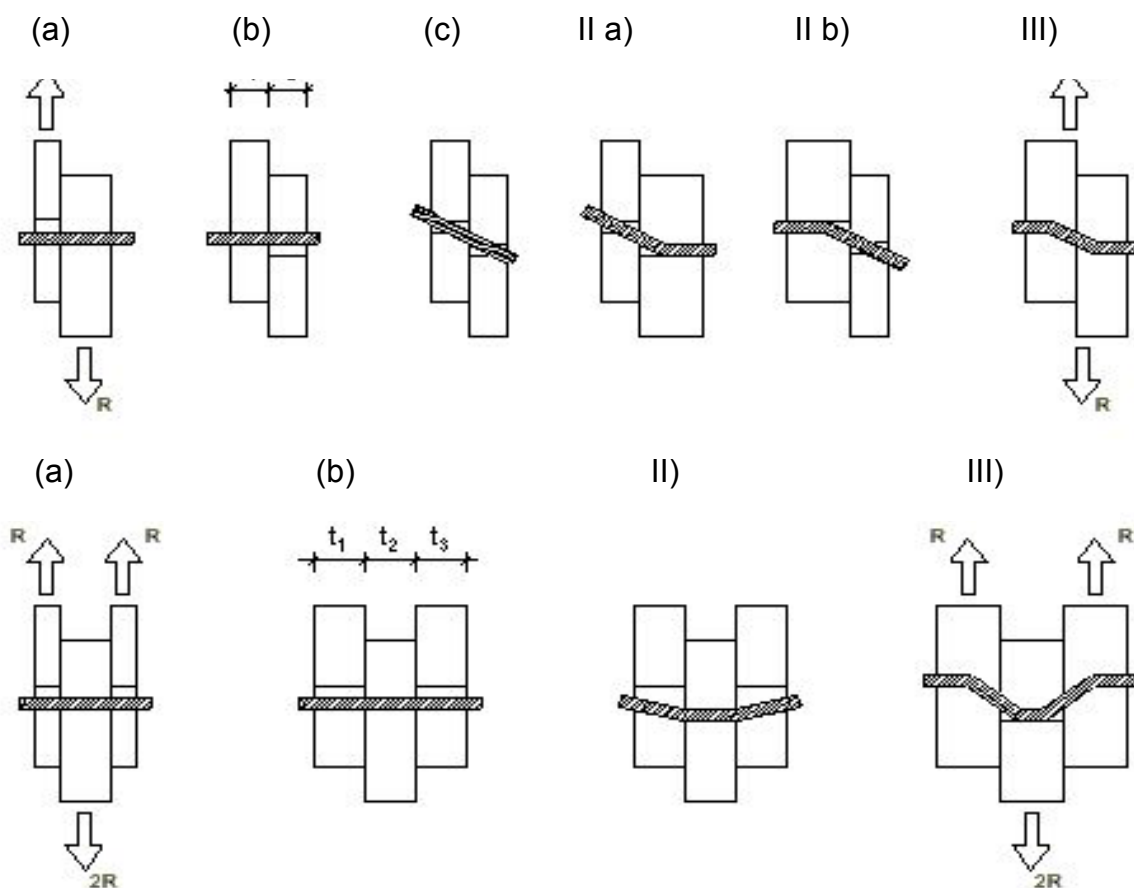


FIGURA 2.5 –Modelo de Escoamento - Configurações deformadas para ligações em estados limites últimos.

Fonte: EHLBECK e LARSEN,1992, p.10/ EUROCODE 5 PAG. 75

Com base nos comportamentos da madeira e do prego, as configurações admitidas para as ligações deformadas, considerando a peça 1 aquela que o prego atravessa totalmente e a peça 2 a que contém a ponta do mesmo são as seguintes (FIG. 2.5):

- a madeira sofre esmagamento na peça 1, e o prego permanece rígido;
- a madeira sofre esmagamento na peça 2, e o prego permanece rígido;
- a madeira sofre esmagamento nas duas peças, e o prego permanece rígido;
- a madeira sofre esmagamento e prego sofre plastificação em um ponto apenas na peça 1;
- a madeira sofre esmagamento e prego sofre plastificação em um ponto apenas da peça 2;

- a madeira sofre esmagamento e ocorre plastificação do prego em dois pontos, um na peça 1 e outro na peça 2.

O modelo do escoamento apenas define a resistência ao embutimento, desprezando os efeitos da força de tração na direção do eixo do prego e da força de atrito entre as peças. Todavia, não determina o valor para a deformação plástica máxima. A resistência ao embutimento é obtida através de resultados de ensaios realizados de acordo com as recomendações de norma de cada país. Tem sido utilizado como base para métodos de dimensionamento de ligações de muitos códigos, inclusive do EUROCODE 5.

2.2.3.3 - Modelo proposto por ALMEIDA (1990)

Baseado nos estados-limites, ALMEIDA (1990) apresentou um modelo, em que o prego aparece submetido à flexão simples, em ligações entre duas peças, apresentando uma configuração deformada com dois pontos de inflexão, e, através de ensaios demonstrou a confirmação de suas hipóteses. Esse trabalho mostrou um comportamento bi-linear para ligações com dois limites para a introdução do método dos estados limites. Definiu-se o primeiro limite quando a ligação passou a sofrer deslizamentos plásticos ainda controlados, ou seja, no fim da fase elástica do material. Quando perdeu-se o controle deste deslizamento, o segundo limite foi definido, correspondendo ao fim do regime elástico. À partir daí, a ligação passou a sofrer deslizamentos plásticos cada vez maiores com carga constante.

O trabalho mostrou ainda, o comportamento da madeira e do prego no tocante a ligação. Para o aço, foi admitido um comportamento perfeitamente plástico, e, para a madeira, um comportamento elasto-plástico, sendo o segundo definido por dois limites:

- a tensão de embutimento de primeiro limite;
- tensão de embutimento de segundo limite ou “resistência de embutimento”.

Através de ensaios de resistência ao embutimento o autor constatou que a tensão de primeiro limite correspondeu a um deslocamento de 0,02mm entre as peças; já a tensão de segundo limite, ou resistência de embutimento, correspondeu a um deslocamento de 0,1mm.

Outra contribuição para o conhecimento do assunto foi apresentada por ALMEIDA, CALIL JR. e FUSCO (1996). Trata-se de ensaios que visaram mostrar os deslocamentos entre as peças provocados unicamente pela deformação da madeira.

Baseados no comportamento adotado para a madeira e para o aço, estabeleceram situações que podem existir numa ligação e que levam ao primeiro e ao segundo limites, situações essas relacionadas a seguir. A FIG. 2.6 mostra as distribuições de tensão na madeira e no prego correspondentes a cada situação. Dependendo das propriedades da madeira e do aço o primeiro estado-limite da ligação pode ocorrer em qualquer uma destas três situações. A que ocorre primeiro determina o primeiro estado limite:

- início da plastificação da madeira por esmagamento na fibra mais solicitada, estando o prego ainda em regime elástico (FIG. 2.6a);
- início, por flexão, da plastificação do prego. Com a madeira submetida a tensões inferiores ao início de sua plastificação. Não é garantido que a madeira esteja em regime elástico porque a mesma não possui limite de escoamento. O início da plastificação é determinado como correspondente a um deslizamento da ligação convencional. (FIG. 2.6b);
- início da plastificação do prego, e simultaneamente, da madeira na fibra mais solicitada. (FIG. 2.6.c).

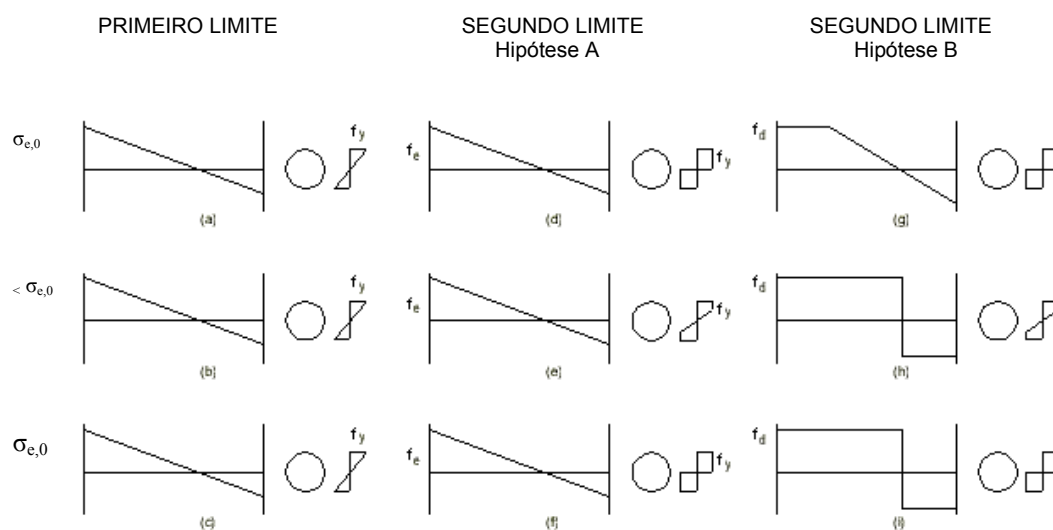


FIGURA 2.6 – Distribuição de tensões na parede do furo e na seção transversal mais solicitada do prego para estados limites
Fonte: ALMEIDA (1990)

Seguindo a hipótese de que a ligação atinge o segundo estado limite com a plastificação da madeira apenas na fibra mais solicitada (hipótese A), o segundo limite pode ocorrer devido a:

- plastificação completa do prego (FIG2.6.d);
- plastificação da madeira na fibra mais solicitada (FIG 2.6.e);
- plastificação completa do prego e da madeira na fibra mais solicitada simultaneamente (FIG 2.6.f),

Ou então, seguindo a hipótese de que a ligação atinge o estado limite com a plastificação da madeira em mais de uma fibra (hipótese B), o segundo limite pode ocorrer devido a:

- plastificação completa do prego (FIG. 2.6.g);
- plastificação completa da madeira (FIG. 2.6.h);
- plastificação completa da madeira e do prego simultaneamente (FIG. 2.6.i).

Partindo de cada uma das situações descritas acima e de suas correspondentes distribuições de tensões na madeira e no prego, ALMEIDA (1990) obteve as forças atuantes na ligação que provocariam cada uma dessas situações.

2.2.3.4 - O método dos estados limites

Com base no comportamento da ligação descrito anteriormente, no item 2.2.3.3, No QUAD. 2.2 estão apresentadas as expressões resumidas e desenvolvidas por ALMEIDA (1990) para a determinação da resistência de uma ligação.

O autor observou que a ocorrência de uma ou outra situação, dependia da relação entre a espessura das peças de madeira (t) e o diâmetro do prego utilizado (d). Esta relação foi representada pelo parâmetro β utilizado nas expressões para a obtenção da força limite.

O autor também fez uma correspondência entre as expressões da resistência na ligação limitada pela madeira à da resistência da ligação limitada pelo prego, obtendo o valor de β para o qual a esta resistência seria limitada simultaneamente, tanto pela madeira quanto pelo prego.

QUADRO 2.2. Parâmetros para força limite de uma ligação

PARÂMETROS	PRIMEIRO LIMITE	SEGUNDO LIMITE	
		HIPÓTESE A	HIPÓTESE B
β_{lim}	$0,86 \sqrt{f_y/\sigma_{e,0}}$	$0,77 \sqrt{f_y/f_{e,0}}$	$0,89 \sqrt{f_y/f_{e,0}}$
Fw	$0,28(t^2/\beta)\sigma_{e,0}$	$0,28(t^2/\beta)f_{e,0}$	$0,46(t^2/\beta)f_{e,0}$
Fs	$0,96(t^2/\beta^3) f_y$	$0,64(t^2/\beta^3) f_y$	$0,64(t^2/\beta^3) f_y$
η	$\sigma_{e,0} / f_y$	$f_{e,0} / f_y$	$f_{e,0} / f_y$

Fonte: ALMEIDA (1990) p.165

Sendo:

$$\beta = \frac{t}{d}$$

t = espessura da peça de madeira

d = diâmetro do prego

β_{lim} = valor limite para o qual a resistência da ligação é limitada simultaneamente tanto pela madeira como pelo prego

F_w = Força da ligação limitada pela madeira

F_s = Força da ligação limitada pelo prego

η = coeficiente de eficiência

$\sigma_{e,0}$ = tensão de embutimento de primeiro limite

$f_{e,0}$ = tensão de embutimento de segundo limite ou resistência de embutimento

f_Y = tensão limite do aço

2.2.4 - Comentários sobre o comportamento e métodos de dimensionamento de ligações

Segundo SANTANA (1997), o modelo proposto por KUENZI (1953), baseado na teoria de viga em fundação elástica, foi o que melhor descreveu o comportamento da ligação em regime elástico-linear. Este modelo considera, na distribuição das tensões, a deformação da madeira. Entretanto, fora do regime elástico-linear, o mesmo deixa de ser válido. Atualmente, tende-se a dimensionar as ligações tomando como princípio os estados limites.

Nos Estados Unidos, muitas pesquisas foram realizadas para adaptar o modelo de escoamento (Yield Model) aos códigos americanos após a sua introdução. Na Europa, o mesmo foi amplamente aceito e desde então é utilizado como base para métodos de dimensionamento de ligações.

O modelo de escoamento supõe que o prego permanece rígido até atingir o seu momento de escoamento em uma ou duas seções, onde se formam rótulas plásticas, entretanto, com os trechos restantes do prego ainda rígidos. Nos trechos onde o prego se desloca, a madeira sofre um esmagamento, ou segundo o modelo, um “escoamento”. Este modelo não considera nenhuma situação em que a madeira esteja submetida a uma tensão diferente da tensão convencionada, como resistência de embutimento. Desconsidera a deformação devida ao cisalhamento e considera a madeira homogênea ao

longo de sua espessura. Para dimensionamento também apresenta algumas limitações.

Segundo RAMSKILL (2002) apesar do modelo possuir um formato explicativo de expressões adota muitas simplificações, representando assim, limitações. Na determinação da resistência das ligações vários parâmetros são desconsiderados. O modelo além de tratar os pinos com ajuste perfeito entre as peças, desconsidera a ruptura da ligação por cisalhamento ou por tração nos pinos, bem como a não fixação da extremidade do pino no desenvolvimento de suas equações.

O modelo desenvolvido por ALMEIDA (1990), de forma semelhante ao modelo do escoamento, define estados limites para as ligações. Neste modelo a configuração deformada admitida é apenas uma, ao contrário do modelo de escoamento. Entretanto, os estados limites não foram definidos em função da configuração deformada, ao contrário do EUROCODE 5.

Para a filosofia do dimensionamento pelos estados limites, os autores WHALE & SMITH (1986, apud STAMATO,1998) propõem que para a mesma ser implementada corretamente é necessário conhecimento das características de “força x deformação” e das resistências de vários tipos de ligações mecânicas.

ALMEIDA (1987) afirma que a ligação pregada apresenta excessivas deformações após a fase elástica e, sendo assim, a existência de deslizamentos com plastificação exagerada, causa a ruína da emenda. O autor realizou ensaios cíclicos mostrando o comportamento das ligações e definindo o estado-último de resistência para uniões. Para carregamentos constantes averiguou que os deslizamentos crescem progressivamente, acarretando grandes deformações que, com o tempo, comprometem a segurança da estrutura.

Estes ensaios mostraram então que além do segundo limite de resistência o comportamento da ligação é inadequado para o seu uso, apesar de não

acarretar o colapso da estrutura. Sendo assim, para o dimensionamento das uniões, as forças teóricas de primeiro e segundo limites devem ser influenciadas por coeficientes de minoração de resistências.

O desenvolvimento das expressões de resistência da ligação, feito por ALMEIDA (1990), teve com base equações de equilíbrio considerando cada peça individualmente. Já as expressões do EUROCODE 5 foram desenvolvidas através de equações de equilíbrio considerando as duas peças da ligação.

Em termos de dimensionamento da ligação, o método dos estados limites proposto por ALMEIDA (1990) tem um bom fundamento teórico e experimental, e assume para a ligação uma configuração deformada mais próxima da real. Além disso, através da relação entre a espessura da peça de madeira e o diâmetro do prego é possível saber se a ligação é limitada pela madeira ou pelo aço do prego. Este modelo trouxe a atualização do método de dimensionamento de ligações no Brasil.

Segundo CHUI & BARCLAY (1998, apud ALVIM 2002) o princípio do estudo de vigas compostas consiste em analisar a viga como sendo formada por elementos de equilíbrio, solidarizadas por uma equação de compatibilidade de deslocamentos. Estes autores propuseram um método exato para dimensionamento de vigas compostas bi-apoiadas baseado em equações de equilíbrio, entretanto, as deformações devido aos esforços cisalhantes não são consideradas.

2.2.5- Rigidez da ligação X resistência ao embutimento da madeira

Entre os fatores que influenciam a rigidez e resistência de uma ligação pode-se citar as propriedades da madeira, as propriedades do pino e a geometria da ligação.

Apesar de não ser um fator limitante, os pinos inseridos em peças de madeira de alta densidade apresentam maiores resistências ao arrancamento do que os inseridos em peças de baixa densidade de acordo com o Forest Products Laboratory (1965).

Conforme citado, anteriormente, por STAMATO (1998) e segundo RAMMER e WINISTORFER (2001) a resistência de embutimento (f_e) é uma propriedade da madeira associada aos esforços de compressão localizados. Estes esforços caracterizam-se como esmagamento em torno do pino da ligação devido a um carregamento aplicado perpendicular ao seu eixo e é determinado pela relação entre carregamento aplicado e área de contato entre o pino e a madeira.

A resistência de embutimento é relacionada com a resistência à compressão da madeira. O QUAD. 2.3 mostra equações desenvolvidas e recomendadas pela literatura bem como a norma brasileira.

QUADRO 2.3 – Resistência ao embutimento / compressão da madeira

AUTOR	EQUAÇÃO	PARÂMETROS
Trayer (1932)	$f_e = 0,64 f_c$	f_e = resistência ao embutimento paralelo às fibras f_c = resistência à compressão paralela às fibras
Kuipers e Vermeyden (1965)	$f_e = 0,6 f_c + 6$	f_e = resistência ao embutimento em N/mm ²
Larsen e Sorensen (1973)	$f_e = 0,7 f_c$	f_e = resistência ao embutimento
NBR 7190 (1997)	$f_{e90} = f_c$; $f_e^+ = f_c^+ \alpha_e$	f_c^+ = resistência à compressão na direção perpendicular às fibras α_e = função do diâmetro do pino
Rammer e Winistorfer (2001)	$f_e = 0,438 f_c + 11,897$	Função da resistência à compressão última f_e , f_c em N/mm ² e na direção paralela às fibras

Os autores, acima citados, concluíram que a umidade da madeira deve estar abaixo de 19% para que as expressões de resistência de embutimento sejam adequadas, realizando outros estudos relacionando o teor de umidade com esta resistência.

Outros autores apresentaram uma equação para a determinação da resistência de embutimento da madeira em função da densidade da mesma, como WILKINSON (1991). Já autores como RAMMER e WINISTORFER (2001), analisaram e apresentaram essas equações em função do teor de umidade da madeira.

GEHRI (2001) revelou através de estudos experimentais, que a resistência axial de pinos em peças de madeira apresenta-se maior em função da diminuição da temperatura e teor de umidade. O parâmetro representativo da madeira no estudo da rigidez da ligação é a resistência de embutimento.

Outro fator a ser considerado na madeira é a ocorrência de falhas. Esta possibilidade segundo os autores BLASS e SCHMID (2000) tem sido desconsiderada. Através de estudos realizados com a teoria da mecânica da fratura, os autores solucionam esta questão, pois consideram comum a existência de fissuras nas peças de madeira.

2.2.6 – Resistência dos pinos

Características como diâmetro, comprimento e resistência à flexão de um pino são fatores que influenciam na rigidez das ligações. Ligações feitas com pinos de pequeno diâmetro só alcançam um alto desempenho se for grande o número de pinos e a ligação não sofrer diminuição significativa de sua resistência de carga, segundo MISCHLER, PRION e LAM (2000). Estes autores consideram a existência de uma esbeltez limite calculada à partir das expressões provenientes do modelo de escoamento (Yield Model).

EHLBECK e WERNER (1995) discutiram a proposta do Eurocode 5 e apresentaram a equação seguinte com a intenção de inserir o efeito de encruamento na resistência de escoamento do aço e assim, aumentando-a.

$$M_{yk} = \frac{(f_{uk} + f_{yk})}{2} \cdot \frac{d^3}{6} \quad (2.7)$$

Considerando:

$M_{y,k}$ = Momento de plastificação característico;

$f_{u,k}$ = resistência característica à tração do aço do pino;

d = diâmetro do pino.

$f_{y,k}$ = resistência característica de escoamento do aço do pino à flexão;

BLASS, BIENHAUS e KRAMER (2000) desenvolveram também uma equação para o momento de plastificação em função do diâmetro e da resistência à tração do pino inserindo implicitamente uma alteração no ângulo de flexão em função da alteração do diâmetro do mesmo. Considerando os parâmetros acima tem-se:

$$M_{yk} = (0,27 \cdot f_{u,k}) \cdot d^{2.6} \quad (2.8)$$

O espaçamento entre os pinos também é um dos parâmetros que deve ser levado em consideração na rigidez de uma ligação. Estes são determinados em função da distância entre seus eixos na direção da reta que os une. Não podem ser muito pequenos pois a ligação, pode romper por fendilhamento antes que sua resistência seja alcançada. Os autores MISCHLER, PRION e LAM (2000) concluíram que a influência dos espaçamentos é maior nas ligações com pinos mais rígidos.

2.2.7 -Módulo de deslizamento

A rigidez da ligação pode ser expressa pelo módulo de deslizamento que é definido pela relação entre a força de cisalhamento e o deslizamento da ligação, de forma que:

$$P = K\delta \quad (2.9)$$

Sendo:

P = força de cisalhamento atuante na ligação;

K = módulo de deslizamento da ligação;

δ = deslocamento relativo longitudinal entre as peças da ligação.

Se duas ligações sofrem o mesmo deslizamento sob a ação da mesma força, pode-se dizer que essas duas ligações são equivalentes em termos de rigidez, independentemente do número de pregos em cada uma. Considera-se agora uma ligação fictícia equivalente à primeira, FIG. 2.7(a) e (b), com pregos uniformemente distribuídos.

Considere-se agora a segunda ligação formada por ligações de comprimento unitário. Isso pode ser feito desde que o deslizamento permaneça o mesmo e em cada uma dessas ligações vale a relação:

$$T = \frac{K}{s} \delta \quad (2.10)$$

$$\bar{K} = \frac{K}{s} \quad (2.11)$$

e essa equação pode ser escrita como:

$$T = \bar{K} \delta \quad (2.12)$$

Considerando:

T = fluxo de cisalhamento;

s = espaçamento entre os pinos;

$\bar{K}$ = módulo de deslizamento equivalente

δ = deslocamento.

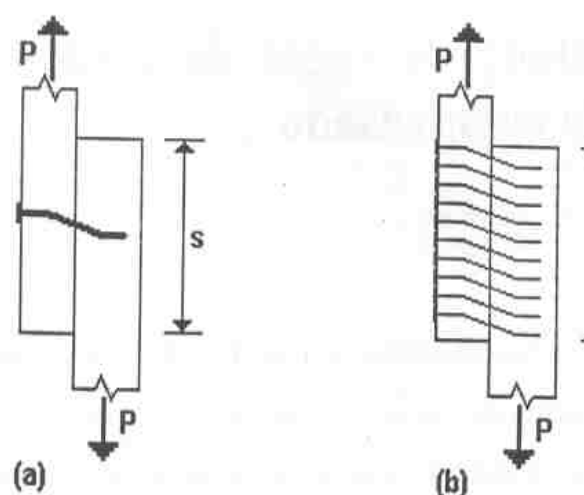


FIGURA 2.7 – Esquema de ligações equivalentes

(a) ligação com um único pino

(b) ligação fictícia equivalente à primeira, com pregos uniformemente distribuídos

O módulo de deslizamento equivalente expressa o módulo de deslizamento de uma ligação de comprimento unitário onde os pinos são uniformemente distribuídos. Sua unidade é de força por unidade de área, isto é, unidade de módulo de deslizamento por unidade de comprimento de ligação e pode ser determinado experimentalmente, através de ensaio.

Quanto à determinação teórica deste, em função das características da ligação, diferem muito de uma norma para outra, dificultando uma comparação.

O modelo desenvolvido por KUENZI (1953) apresentado no item 2.2.3.1 é o único entre os modelos consultados que fornece meios para a determinação teórica do módulo de deslizamento. KUENZI (1953) determinou uma relação entre a força de cisalhamento e o deslizamento da ligação; mostrou que o módulo de fundação K (constante elástica da madeira) consiste na rigidez axial da área compreendida pela fixação da ligação, com largura igual ao diâmetro do prego utilizado e comprimento unitário.

Numa ligação, a profundidade da fixação de um prego é ilimitada ao ser comparada ao diâmetro do mesmo. KUENZI (1953) supôs esta profundidade igual a 1 polegada, porém não foram encontradas referências sobre a verificação experimental desse valor, o que torna essa determinação objeto de estudos posteriores.

WILKINSON (1971) baseando-se no trabalho de KUENZI (1953) fez uma revisão da aplicação do modelo da viga em fundação elástica, enfatizou o módulo de deslizamento, além de um amplo programa experimental e propôs a seguinte expressão para sua determinação:

$$k = k_0 d \quad (2.13)$$

onde:

k = módulo de deslizamento

k_0 = constante de capacidade elástica;

d = diâmetro do prego

A constante de capacidade elástica foi definida por WILKINSON (1971), como uma propriedade da madeira. Através de resultados de ensaios procurou uma relação entre esta e outras propriedades da madeira encontrando uma relação com o peso específico.

WILKINSON (1972), dando continuidade em seus estudos, propôs fórmulas empíricas relacionando a constante de capacidade elástica e o peso específico da madeira. Fez uma nova série de ensaios de ligação e uma comparação dos resultados experimentais com os teóricos. Utilizando suas próprias fórmulas empíricas, dentro do modelo proposto por KUENZI (1953), encontrou uma boa concordância entre os resultados. Entretanto, as fórmulas empíricas de WILKINSON (1972) não servem para espécies brasileiras, pois, segundo ALMEIDA (1990), para espécies brasileiras, não existe relação entre o peso específico e a resistência de embutimento.

A bibliografia disponível de acordo com ALMEIDA (1987) sugere que a resistência das ligações seja determinada por ensaios ou por meio de

equações formuladas a partir de diagramas de força x deslocamento. Ainda assim, estes valores apresentam discrepância e geram incertezas para os usuários. Segundo ALMEIDA (1987) os critérios de dimensionamento, recomendados pela antiga NB11 inviabilizam a utilização de seções compostas por considerar as uniões com grande deformabilidade resultantes em super dimensionamentos.

A solução para a determinação da profundidade da fixação da ligação pode ser buscada na teoria da elasticidade. Segundo esta teoria, a tensão aplicada em uma superfície de um corpo propaga-se através desse, e seu valor é inversamente proporcional à distância da superfície segundo GREEN e ZERNA (1968, apud ALMEIDA, 1987). Para se determinar a profundidade da fundação, pode-se utilizar o conceito de bulbo de tensões utilizado na mecânica dos solos.

Com base em GREEN e ZERNA (1968, apud ALMEIDA, 1987), a profundidade em que a tensão propagada atinge 1% da tensão aplicada na superfície é 16 vezes maior que o diâmetro do prego. Por outro lado, a profundidade em que a tensão propagada atinge 5% da tensão aplicada na superfície é cerca de 4 vezes o diâmetro do prego. Tendo em vista que essa determinação teórica seria arbitrária, o mais conveniente é utilizar o valor indicado por KUENZI: 1 polegada.

Experimentalmente, o módulo de fundação pode ser obtido a partir do ensaio de embutimento. Se a força aplicada no ensaio for dividida pela espessura da peça central de madeira, será obtida a força distribuída ao longo do eixo do prego. A partir dos resultados, pode-se construir uma curva relacionando a força distribuída ao longo do eixo do prego e o deslizamento entre as peças da ligação. O coeficiente angular da reta ajustada no trecho inicial da curva fornece o módulo de fundação.

Se o módulo de fundação for dividido pelo diâmetro do prego, obtem-se a constante de capacidade elástica para esta espécie de madeira, uma propriedade independente do diâmetro do prego.

SANTANA (1997) adotou um modelo de corpo-de-prova para determinação do módulo de deslizamento para vigas caixão com mesas de madeira e almas de compensado. A seção transversal tinha as mesmas dimensões da viga e um comprimento de 30 cm. Os elementos conectores foram pregos espaçados a cada 5 cm.

2.3 - Normalização

No emprego de vigas “I” compostas são aproveitadas as propriedades mais favoráveis dos materiais utilizados: as mesas são projetadas para resistir aos momentos fletores, e, a alma, ao cisalhamento. Parâmetros como flecha, estabilidade lateral e força de ruptura, são analisados para a produção industrial destas vigas que, normalmente, são padronizadas em catálogos de produtos, em função de aplicações específicas.

Para a utilização destas estruturas, ainda são necessários estudos a respeito do dimensionamento das mesmas, visto que a NBR 7190/97 não fornece subsídios suficientes para esse dimensionamento. Alguns códigos normativos internacionais, porém, apresentam critérios específicos para o dimensionamento de vigas de seção composta com almas em compensado.

2.3.1 - Design of Timber Structures- Comité Européen de Normalisation, 2000 (EUROCODE 5)

Segundo o EUROCODE 5, para o dimensionamento de vigas compostas de madeira e compensado deve-se levar em consideração o efeito da deformabilidade da ligação entre as peças. As estruturas compostas, unidas por ligações mecânicas, seja parafusos, pregos, cavilhas e outros, tendem a deslocar-se pela absorção de esforços de cisalhamento ao serem solicitadas.

Nesta norma são apresentados critérios de dimensionamento específicos para vigas compostas de seção “I”, “T” e caixão, compostas por compensado nas almas e madeira nas mesas.

No item 4.2 da norma, o módulo de deslizamento é dado para ligações com pré furação em função das densidades da madeira e compensado e, em função do diâmetros do conector:

$$K_{ser} = p_k^{1,5} \cdot d / 20 = \text{estados limites de utilização (N/mm)} \quad (2.14)$$

Sendo:

$$\rho_k = \sqrt{\rho_{k1} \cdot \rho_{k2}} = \text{densidade das peças em kg/m}^3 \quad (2.15)$$

d = diâmetro do conector

Já no item 6.1 faz-se a consideração do módulo de deslizamento para o dimensionamento segundo os estados limites últimos.

$$K_u = 2/3 \cdot K_{ser} = \text{estados limites últimos (N/mm)} \quad (2.16)$$

Com a definição do módulo de deslizamento, ao conjunto estrutural é imposto a redução de rigidez. Esta redução é feita em função da disposição e dimensão das peças de madeira e compensado, espaçamento dos conectores, dimensão do vão livre do elemento estrutural além do módulo de deslizamento citado.

Assim sendo, no anexo B da norma a rigidez reduzida ou efetiva é dada por:

$$(EI)_{ef} = \sum (E_i \cdot I_i + \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i^2) \quad (2.17)$$

Onde:

I_i = momento de inércia componente de cada elemento da seção transversal:

$$I_i = bh^3/12$$

E_i = módulo de elasticidade de cada material

A_i = área de cada parte da seção transversal

a_i = distância entre o centro de gravidade da seção até a LN da peça.

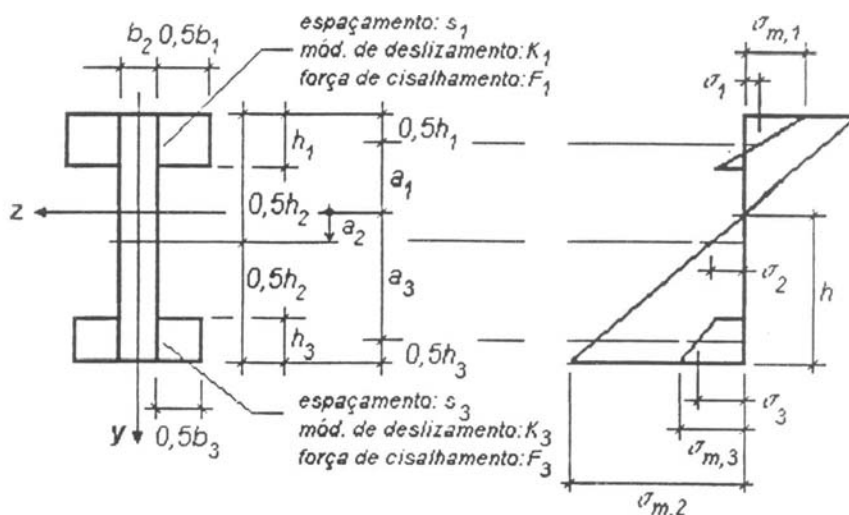


FIGURA 2.8 - Seção composta e diagrama de tensões correspondente
Fonte: EUROCODE 5 (1995) pág..96

$$\gamma_i = 1$$

para $i = 2$

$$\gamma_i = [1 + (\pi^2 E_i \cdot A \cdot s_i / K_i \cdot I^2)]^{-1}$$

para $i = 1$ e $i = 3$

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.

$$a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 (h_1 + h_2) - \gamma_3 \cdot E_3 \cdot A_3 (h_2 + h_3)}{2 \sum (\gamma_i \cdot E_i \cdot A_i)} \quad (2.18)$$

para seções T, $h_3 = 0$

Tensões Normais e de Cisalhamento

Com estes parâmetros, a norma recomenda em seu apêndice B (B2 a B4) que as tensões normais e de cisalhamento máxima sejam determinadas pelas expressões :

$$\sigma_1 = \gamma_i \cdot E_i \cdot a_i \cdot M / (EI)_{ef} \quad (2.19)$$

- tensão normal no centro de gravidade das mesas

$$\sigma_{m,i} = 0,5 \cdot E_i \cdot h_i \cdot M / (EI)_{ef} \quad (2.20)$$

- tensão normal nas bordas da viga

$$\tau_{2,\max} = \left(\gamma_3 \cdot E_3 \cdot A_3 \cdot a_3 + 0,5 \cdot E_2 \cdot b_2 \cdot h^2 \right) \frac{V}{(b_2 (EI)_{ef})} \quad (2.21)$$

- tensão de cisalhamento máxima

Sendo:

M = momento fletor

V = força cisalhante máxima

Ainda apresenta em B5 a expressão para a força aplicada em cada conector (Fi):

$$F_i = \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i \cdot s_i \cdot V / (EI)_{ef} \quad (2.22)$$

Com i = 1 e 3, onde $s_i = s_i(x)$ é o espaçamento dos pinos definido no item B1.3 da Norma.

Dimensionamento das Ligações

Os itens 6.2 e 6.3 da norma tratam do dimensionamento de ligações pregadas. As expressões sugeridas correspondem às configurações deformadas admitidas para cada tipo de ligação, conforme já citado na FIG. 2.5, a resistência da ligação é considerada o menor dos valores encontrados pelas expressões adotadas pela norma.

Sendo t_1 e t_2 = espessura das peças;

$F_{h,1}$ = resistência ao embutimento;

$$\beta = f_{h,2,d} / f_{h,1,d}$$

d = diâmetro do conector;

M_y = momento produzido no conector.

$$M_{y,d} = M_{y,k} / \gamma_M$$

Os valores de resistência ao embutimento devem ser calculados como:

$$f_{h,1,d} = k_{mod,1} \cdot f_{h,1,dk} / \gamma_M \quad (2.23)$$

$$f_{h,2,d} = k_{mod,2} \cdot f_{h,2,dk} / \gamma_M \quad (2.24)$$

Sendo a base desse método de cálculo o modelo de escoamento (Yield Model), o item 6.3, que trata de ligações pregadas, recomenda expressões para a resistência da ligação correspondentes a cada uma das configurações deformadas mostradas na FIG. 2.5. As expressões correspondentes são reproduzidas no QUADRO 2.4 deste item, onde a resistência da ligação é a menor das resistências calculadas.

Os valores dos fatores de modificação para classes de serviço duração de solicitação (k_{mod}) e o valor do coeficiente parcial para propriedade de materiais (γ_M), são dados no EUROCODE 5.

QUADRO 2.4. Resistência das ligações.

RESISTENCIA PARA CORTE SIMPLES	MODO DE RUPTURA
$R = f_{e,1}t_1d$	Modo I.a
$R = f_{e,1}t_2d\beta$	Modo I.b
$R = \frac{f_{e,1}t_1d}{1+\beta} \left\{ \sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right\}$	Modo I.c
$R = \frac{f_{e,1}t_1d}{2+\beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_y}{f_{e,1}dt_1^2}} - \beta \right]$	Modo II.a
$R = \frac{f_{e,1}t_2d}{1+2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1+\beta) + \frac{4\beta(1+2\beta)M_y}{f_{e,1}dt_2^2}} - \beta \right]$	Modo II.b
$R = \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_y f_{e,1}d}$	Modo III
RESISTENCIA PARA CORTE DUPLO	MODO DE RUPTURA
$R = f_{e,1}t_1d$	Modo I.a
$R = \frac{1}{2}f_{e,1}t_2d\beta$	Modo I.b
$R = \frac{f_{e,1}t_1d}{2+\beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_y}{f_{e,1}dt_1^2}} - \beta \right]$	Modo II
$R = \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_y f_{e,1}d}$	Modo III

Fonte: EUROCODE 5

QUADRO 2.5. Valores para γ

ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS	γ_M
- Combinações fundamentais madeira/compensado	1,3
- Ligações em aço	1,1
- Combinações acidentais	1,0
ESTADOS LIMITES DE UTILIZAÇÃO	$\gamma_M = 1$

Fonte: EUROCODE 5

Segundo o EUROCODE 5 o que caracteriza a resistência à flexão de um pino é o seu momento de plastificação. A equação adotada para obtenção deste momento é:

$$M_{y,k} = (0,8 f_{u,k}) \cdot \frac{d^3}{6} \quad (2.25)$$

Sendo :

$M_{y,k}$ = Momento de plastificação característico;

$f_{u,k}$ = resistência característica à tração do aço do pino;

d = diâmetro do pino.

A resistência ao embutimento deve ser determinada através de ensaio normalizado porém, nos itens 6.3.1.2 e 6.3.1.3, a norma indica expressões para o cálculo desta resistência para o caso de ligações pregadas de madeira/madeira ou madeira/compensado, respectivamente, em função da densidade.

Estabilidade

Em relação à estabilidade o EUROCODE 5 compara a tensão atuante no centro de gravidade da mesa comprimida com a resistência à compressão simples diminuída por um fator. Este fator depende da esbeltez da mesa comprimida. O comprimento de flambagem é dado pela distância entre os pontos de contraventamento lateral.

Em seu anexo C, o uso de enrijecedores nas extremidades e meio do vão é sugerido quando se refere à perda de estabilidade local da alma.

2.3.2- Plywood Design Standards,1983 (PDS)

A norma utilizada nos Estados Unidos para dimensionamento de estruturas compostas com alma em compensado é o PDS, suplemento 2 e suplemento 5, publicados pela American Plywood Association (APA). Mais direcionado para o dimensionamento de peças coladas, já que a grande maioria das estruturas nesse sistema nos EUA é industrializada. O PDS ressalta que a flecha resultante do cisalhamento é significativa nessas estruturas, devendo ser considerada no cálculo da flecha total da estrutura.

Esta norma apresenta a formulação completa para o cálculo do coeficiente K (módulo de deslizamento), que pode ser avaliada para a possível elaboração de ábaco semelhante para as condições brasileiras.

Para a confecção do ábaco, a norma considera o módulo de elasticidade transversal das almas de mesmo valor ao das mesas, $G_{\text{almas}} = G_{\text{mesas}}$. No caso das madeiras brasileiras, para as quais existe uma grande variedade de classes de resistência, a utilização deste ábaco pode levar à resultados insatisfatórios. Não existem estudos sobre a deformação por cisalhamento em vigas compostas utilizando peças maciças e compensados brasileiros, sendo necessária a avaliação da aplicabilidade do ábaco e das formulações apresentadas para o dimensionamento de vigas utilizando os produtos nacionais.

Dimensionamento das ligações

Segundo o PDS as ligações são padronizadas para vigas compostas tipo caixão, sendo feitas com pregos de diâmetro aproximado de 3,75 mm e espaçamento de 3,75 cm, sendo que na região central da viga este

espaçamento pode ser duplicado. Estes valores estão em função das dimensões pré-determinadas pela mesma norma.

2.3.3 - Engineering Design in Wood (Limit States Design)

Esta norma canadense apresenta, em seu item 8, critérios de projeto e dimensionamento para vigas I e caixão de compensado e madeira serrada ou madeira laminada colada. Embora seja também direcionada ao dimensionamento de peças coladas para sistemas industrializados, os seguintes parâmetros e equacionamentos são apresentados:

Rigidez Efetiva:

$$EI = (\sum B_a) K_s [(C_t^3 + C_c^3) / 3] + (EI)_t \cdot K_{se} \quad (2.26)$$

Sendo:

$\sum B_a$ = somatório da rigidez axial das almas de compensado (N/mm);

$(EI)_t$ = rigidez das flanges em relação ao eixo neutro da seção composta;

K_s = fator de condições de serviço do compensado;

K_{SE} = fator de condições de serviço para módulo de elasticidade das flanges.

QUADRO 2.6. Resistência do compensado em função de sua umidade

Propriedades modificadas	Compensado	
	seco	úmido
Capacidade de resistência	0,80	1,0

Fonte: Engineering Design in Wood-Item 7.4.2

Momento de Resistência:

a) Compressão nas flanges:

$$M_r = \phi F_c K_{IC} (EI)e / E K_{se} C_c \quad (2.27)$$

Onde:

$\phi = 0,8$ para madeira serrada;

$F_c = f_c (K_D K_{SC} K_T K_H)$ sendo os fatores K, fatores de sistema, condições de serviço e geometria da seção respectivamente, todos tabelados;

C_c = Distância da face comprimida ao eixo neutro;

F_c = resistência específica na flange na compressão.

b) Tração nas flanges;

$$M_r = \phi F_t K_{zt} (EI)_e / E K_{se} C_t \quad (2.28)$$

Onde:

$\phi = 0,9$ para madeira serrada;

$F_c = f_t (K_D K_{tC} K_T K_H)$ sendo K, fatores de sistema, condições de serviço e geometria da seção respectivamente, todos tabelados;

C_c = distância da face comprimida ao eixo neutro;

f_t = resistência específica da flange na tração..

Força máxima de cisalhamento:

$$V_r = \phi V_p X_i (EI)_e / E K_{se} \cdot Q_f + 0,5 (\sum B_a) K_s C_w^2 \quad (2.29)$$

Onde:

$\phi = 0,95$

$V_p = \sum V_p (K_D K_{tC} K_T) C_c$ = Distância da face comprimida ao eixo neutro;

$\sum V_p$ = somatório das deformações específicas do compensado (tabelado);

X_i = fator de tensão na ligação;

E = módulo de elasticidade da flange;

Q_i = momento estático da flange sobre o eixo neutro;

$\sum B_a$ = somatório da resistência axial específica para almas de compensado;

C_w = maior distância do eixo neutro a face da alma.

A flecha deve ser calculada com a somatória das deflexões devidas a momento, usando a rigidez efetiva $(EI)_e$ determinada anteriormente pela expressão:

$$\Delta_s = B_a M_h^2 \cdot X_s / B_v \cdot (EI)_e \quad (2.30)$$

Onde:

B_a = Resistência axial específica (tabelado);

B_v = Rigidez à cortante;

M = momento máximo devido à carga específica;

X_s = coeficiente de cisalhamento da seção;

h = altura total da viga.

Estabilidade

Segundo esta Norma, sobre a estabilidade lateral de uma viga composta, deve-se utilizar a relação entre os momentos de inércia em torno dos eixos perpendicular e paralelo ao plano de flexão. Sendo que, quanto maior esta relação, menor é a possibilidade da viga sofrer instabilidade lateral.

QUADRO 2.7– Recomendações para estabilidade de vigas compostas de madeira e compensado.

RELAÇÃO I_z / I_y	RECOMENDAÇÃO
Se $I_z / I_y < 5$:	Não há problema de instabilidade lateral;
Se $5 < I_z / I_y < 10$:	Deve-se contraventar lateralmente a mesa tracionada sobre os apoios;
Se $10 < I_z / I_y < 20$:	Deve-se contraventar lateralmente a mesa comprimida e tracionada sobre os apoios
Se $20 < I_z / I_y < 30$:	Uma das mesas deve ser mantida alinhada;
Se $30 < I_z / I_y < 40$:	Deve-se colocar travessas de contraventamento, com espaçamento não maior que 2,4 m;
Se $40 < I_z / I_y$:	A mesa comprimida deve ter contraventamento

Fonte: "Enginnering Design in Wood" (1994)

I_y = momento de inércia em torno do eixo y

I_z = momento de inércia em torno do eixo z

2.3.4 – Deutsche Institute Fur Normung. DIN 1052

A norma alemã, DIN 1052, apresenta critérios de dimensionamento semelhantes aos do EUROCODE 5, com algumas equações trabalhadas de

outra maneira. Porém, em linhas gerais, seu desenvolvimento ainda é o mesmo. Como diferenças podem-se citar que a norma DIN apresenta no seu equacionamento considerações sobre a área e a inércia da seção total descontando os furos dos pregos.

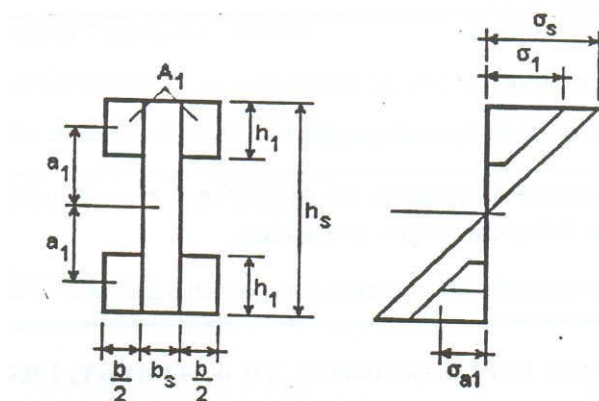


FIGURA 2.9 – Tensões Normais na seção transversal. Fonte: DIN 1052

Tensões Normais e de Cisalhamento:

Em seu item 5.4.1 recomenda as seguintes expressões para cálculo de tensões normais para vigas compostas de alma contínua:

$$\sigma_s = \frac{M}{I_{ef}} \cdot \frac{h_s}{2} \cdot \frac{I_s}{I_{sn}} \quad (2.31)$$

$$\sigma_1 = \frac{M}{I_{ef}} \cdot Y_{a1} \cdot \frac{A_1}{A_{1n}} + \frac{h_1}{2} \cdot \frac{I_1}{I_{1n}} \quad (2.32)$$

$$\sigma_{a1} = \frac{M}{I_{ef}} \cdot y_{a1} \cdot \frac{A_1}{A_{1n}} \quad (2.33)$$

Considerando:

σ_s = Tensão normal na borda das almas;

σ_1 = Tensão normal na borda das mesas;

σ_{a1} = tensão normal no centro de gravidade da mesa tracionada;

M = momento fletor máximo;

h_s = altura das almas;

h_1 = altura das mesas;

a_1 = distância entre os centros de gravidade da mesa e da seção;

I_s, I_{sn} = momento de inércia da alma sem descontar os furos dos pregos e descontando o furo dos pregos, respectivamente;

I_1, I_{1n} = momento de inércia da mesa sem descontar os furos dos pregos e descontando o furo dos pregos, respectivamente;

A_1, A_{1n} = área da mesa da viga sem descontar os furos dos pregos e descontando o furo dos pregos, respectivamente;

Em seu item 5.4.3 recomenda expressões para fluxo de cisalhamento e tensões máximas de cisalhamento para o dimensionamento de ligações, recomenda as seguintes expressões:

$$T = \frac{V}{I_{ef}} \cdot \gamma S_1 \quad (2.34)$$

$$\tau_{\max} = \frac{V}{b_s I_{ef}} \cdot (\gamma \cdot 2S_1 + S_s) \quad (2.35)$$

T = fluxo de cisalhamento na interface entre mesa e alma;

$\tau_{\max}$ = tensão de cisalhamento máxima;

S_1 = momento estático de cada mesa;

S_s = momento estático da metade superior da alma;

b_s = espessura da alma;

I_{ef} = momento de inércia efetivo da seção transversal definido em seu item 5.4.4;

V = força cortante máxima.

Sugere ainda que a rigidez das ligações sejam influenciadas pela direção do eixo do prego em relação à do eixo em torno do qual ocorre a flexão da viga. A situação é favorável e o módulo de deslizamento é maior quando estas direções coincidem.

Estabilidade

A instabilidade lateral para vigas compostas é considerada pela DIN 1052 como um problema de instabilidade das mesas das vigas. As mesas de madeira são peças uniformemente comprimidas que tendem a defletir lateralmente quando submetidas a flexão. Esta norma compara a tensão atuante no centro de gravidade da mesa comprimida com a resistência à compressão simples diminuída pelo fator da esbeltez da mesa. O comprimento de flambagem é tomado como a distância entre os pontos de contraventamento lateral.

2.3.5 – Norma Brasileira para Cálculo e Execução de Estruturas de Madeira (NBR 7190/97)- da Associação de Normas Técnicas, 1997.

A NBR 7190/97 não apresenta muitos detalhes para o dimensionamento de estruturas compostas com chapas de compensado. A respeito delas afirma apenas que na flexão, devem ser dimensionadas considerando apenas a contribuição das mesas tracionadas e comprimidas no cálculo das tensões normais, sem redução das suas áreas, e as almas e ligações devem ser dimensionadas em função do cisalhamento, considerando-se a viga como plenamente composta.

Ligações

De acordo com esta norma, a resistência de um pino (FIG.2.10), corresponde a uma seção de corte entre duas peças de madeira. Daí toma-se as resistências de embutimento (f_e), das duas madeiras interligadas, a tensão limite de escoamento (f_y) e o diâmetro do pino utilizado, considerando a espessura t como a menor entre t_1 e t_2 de penetração do pino em cada um dos elementos ligados.

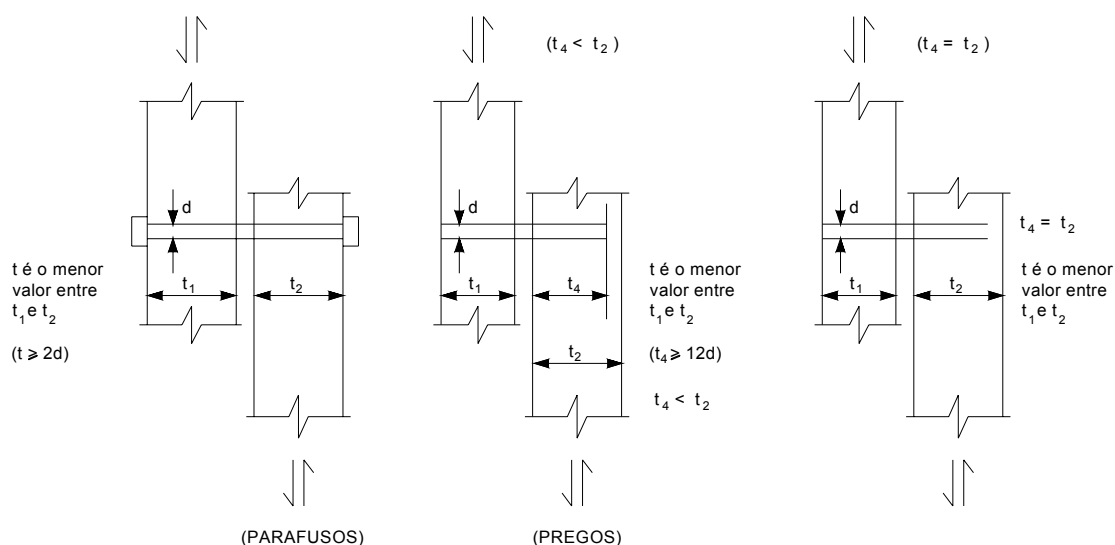


FIGURA 2.10 – Pinos em corte simples
Fonte: NBR 7190/97

A resistência de ligações com pinos metálicos é definida a partir dos parâmetros:

$$\beta = \frac{t}{d} \quad (2.36)$$

onde:

t = menor entre as espessuras das peças de madeira;

d = diâmetro do pino

$$\beta_{\text{lim}} = 1,25 \sqrt{\frac{f_{yd}}{f_{ed}}} \quad (2.37)$$

onde:

f_{yd} = resistência ao escoamento de cálculo do aço do pino;

f_{ed} = resistência ao embutimento de cálculo da madeira.

O valor de cálculo da resistência de um prego, correspondente a uma seção de corte, é dado por:

$$R_{vd,1} = 0,40 \frac{t^2}{\beta} f_{ed}, \text{ para } \beta \leq \beta_{\text{lim}} \quad (2.38)$$

$$R_{vd,1} = 0,625 \frac{d^2}{\beta_{\text{lim}}} f_{yd} (\text{com } \beta = \beta_{\text{lim}}), \text{ para } \beta > \beta_{\text{lim}} \quad (2.39)$$

$$\text{com: } f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$$

$$\text{e: } \gamma_s = 1,1$$

Neste mesmo item, a norma NBR 7190/97 recomenda que os pinos devem ser feitos com aço cuja resistência característica de escoamento seja pelo menos igual a 600MPa, e devem ter diâmetro de 3mm no mínimo. No item 7.2, recomenda que a resistência de embutimento da madeira seja determinada através de ensaio padronizado, entretanto, na falta de determinação experimental pode-se admitir :

$$f_{e0,d} = f_{c0,d} \quad (2.40)$$

$$f_{e90,d} = 0,25 f_{c0,d} \alpha_e \quad (2.41)$$

sendo o coeficiente α_e dado pela norma e reproduzida na TAB. 2.1.

TABELA 2.1. valores de α_e em função do diâmetro do prego.

ϕ	$\leq 0,62$	0,95	1,25	1,6	1,9	2,2	2,5	3,1	3,8	4,4	5,0	$\geq 7,5$
α_e	2,5	1,95	1,68	1,52	1,41	1,33	1,27	1,19	1,14	1,1	1,07	1

Fonte: NBR 7190/97

ϕ = diâmetro do prego

Em relação à perda de estabilidade local na alma, analisa-se este comportamento em função da limitação da razão entre a altura e a espessura da mesma, fazendo o uso de enrijecedores. A NBR 7190/97 recomenda o uso de enrijecedores espaçados de no máximo duas vezes a altura da viga.

2.3.6 - Demais normas a serem consideradas

As demais normas estudadas apresentam semelhanças em relação às normas já mencionados e/ou apresentam pouca relevância em relação ao assunto de vigas compostas, portanto foram agrupados neste item onde são comentados alguns aspectos consideráveis.

O “Structural Timber Design Code, do CONSEIL INTERNATIONAL DU BÂTIMENT (1980)”, recomenda que as tensões atuantes devem ser calculadas segundo a teoria-da-elasticidade, e ainda que seja levada em consideração a deformabilidade das ligações, para as seções compostas pregadas ou parafusadas. Para tanto, apresenta valores de módulo de deslizamento das ligações em função do módulo de elasticidade da madeira e do diâmetro do pino metálico utilizados. O método indica que para diâmetros pequenos, o módulo de deslizamento depende do diâmetro do prego e do módulo de elasticidade longitudinal da madeira, e para diâmetros grandes, depende apenas do módulo de elasticidade longitudinal da madeira.

Esta norma traz ainda um método baseado na teoria de estabilidade de chapas, onde as tensões críticas tangenciais podem ser controladas pela distância entre os enrijecedores e a relação altura /espessura da alma.

“A BRITISH STANDARD -Structural Use of Timber- BS 5268”,(1991) não apresenta equações específicas para vigas compostas pregadas, recomendando um acréscimo de 50% na flecha máxima para considerar o efeito dos deslocamentos destas ligações e as deformações por cisalhamento. Segundo esta norma, o cálculo das vigas compostas coladas pode ser feito considerando-se a teoria de flexão clássica, levando-se em consideração fatores de modificação referentes às características geométricas e módulos de elasticidade dos materiais das mesas.

A “Wood Design Manual (1995)” trata de vigas compostas de madeira e compensado para o uso específico de pisos. Os compensados utilizados são

de 12,5 e 15mm de espessura, e os critérios são semelhantes aos da “Engineering Design in Wood (Limit States Design)” de 1994.

A “Australian Standart Timber Structures (1995)” em seu apêndice E, apresenta dados de projeto para vigas compostas em compensado. Recomenda que as vigas compostas sejam enrijecidas na região dos apoios onde sofrem maior influência da tensão de cisalhamento, sendo que admite não ser conveniente que esses enrijecedores tenham seção transversal menor que 0,25 vezes a área da mesa e apresenta espaçamento entre eles em função de tabelas específicas.

Entre as normas americanas que abordam dimensionamento de ligações, cita-se a norma “Load and Resistance Fator Design”–LRFD (1996), pouco utilizada nesse país e que recomenda o dimensionamento pelo método dos estados limites. Deve-se citar também a “National Design Specification” – NDS (2001) que opta pelo método das tensões admissíveis para dimensionamento de ligações em estruturas de madeira. Tratando-se de pinos metálicos, o dimensionamento em estruturas de madeira foi introduzido nas normas americanas à partir de 1991. Daí para frente, vários estudos vem sendo realizados com o objetivo de relacionar estas normas.

2.3.7 – Comentários sobre as normas de dimensionamento de ligações em estruturas de madeira

SMITH e FOLIENTE (2002) relacionaram os dados de entrada para as expressões de resistência lateral do EUROCODE 5. A resistência ao embutimento da madeira e a resistência do pino foram inseridos nas expressões com a utilização de coeficientes parciais de segurança variando de acordo com o modo de ruptura dominante na ligação. Consideraram ainda como aspecto positivo para determinação do coeficiente de segurança a interação entre a duração da carga e o teor de umidade da madeira em condições normais de serviço.

VELOSO et al (2002) realizaram estudo comparativo deduzindo as expressões das normas NBR7190 e EUROCODE 5 para resistência das ligações. Apesar das semelhanças entre as expressões de resistência destas normas, os dados de entrada para as mesmas são bem diferenciados, o que pode levar a resultados também diferenciados. Em relação à resistência ao embutimento entre peças de madeira, as diferenças de resultados entre as duas normas são proporcionais à diferença entre espessura da peça e resistência ao embutimento.

METTEM (1986) apud SANTANA (1997) para considerar a influência da deformação da ligação e da força cortante, aumentou em 50% o deslocamento máximo da expressão da BS 5268. Já no texto da NBR 7190/97 essa deformação não é considerada.

De uma forma geral, as normas não fazem concordância relacionada ao módulo de deslizamento das ligações para vigas de madeira. O método indicado pelo EUROCODE 5 e pela norma DIN 1052 é empírico, no qual este módulo depende do peso específico da madeira, mas não se pode dizer que este método sirva para espécies brasileiras.

2.4 - Considerações Finais da Literatura

Após a realização da revisão da literatura apresentada neste capítulo, pode-se fazer as seguintes considerações finais:

- As pesquisas desenvolvidas até o presente momento, sobre vigas compostas madeira/compensado (VCMC), não chegaram a um consenso em como avaliar todos os parâmetros envolvidos e seu desempenho visando o dimensionamento dessas;
- Analisando em ordem cronológica os trabalhos realizados sobre vigas compostas de madeira e compensado, verifica-se que a literatura internacional, mostra que por mais de 40 anos esses elementos estruturais foram utilizados na construção civil. A partir da década de 70, houve um avanço tecnológico para a produção das mesmas, então começam a surgir na década de 80, estudos na literatura brasileira. O tema é complexo visto que os materiais envolvidos são anisotrópicos e ortotrópicos e o comportamento das vigas é influenciado pelas propriedades de elasticidade, resistência da composição dos materiais e eficiência das ligações;
- É consenso que a rigidez das ligações é um dos aspectos de fundamental importância, pois influencia de forma significativa o comportamento final das vigas compostas unidas por conectores mecânicos. Portanto são necessários estudos dos critérios a serem adotados para o correto dimensionamento desses sistemas estruturais;
- Os modelos e os métodos de dimensionamento apresentados pela literatura são semelhantes. O modelo de escoamento (Yield Model) assume um comportamento perfeitamente plástico, tanto para a madeira quanto para o pino. Para determinar a capacidade de carga nas ligações possui razoável precisão, apesar de não possibilitar a prescrição da rigidez e deslocamento na ruptura. Já o modelo de fundação elástica

possibilita a determinação da resistência e rigidez das ligações, apresentando consistência nas formulações;

- Diversos métodos para a determinação do módulo de deslizamento são apresentados, tanto empíricos como experimentais. Algumas das normas estudadas apresentam formas de obtenção deste módulo enquanto outras ignoram a sua existência. A norma EUROCODE 5 define este módulo por uma equação empírica envolvendo a densidade da madeira. A norma alemã DIN 1052 propõe valores tabelados em função da forma geométrica da seção transversal da peça;
- O volume de trabalhos encontrados na literatura sobre vigas compostas é muito pequeno. A maioria dos trabalhos, sobre peças compostas, estão direcionados para a determinação da capacidade de carga da ligação. Alguns trabalhos são desenvolvidos para investigar a rigidez das ligações e em relação às emendas de vigas compostas com vãos maiores que 220cm, quase nada foi encontrado;
- Quanto aos códigos normativos, as recomendações da DIN 1052 e EUROCODE 5 possuem uma metodologia semelhante proveniente das equações de equilíbrio. Como diferença está a rigidez efetiva, que para a DIN 1052 é definida pelo produto dos módulos de elasticidade pelo momento de inércia efetivo " I_{ef} " e para o EUROCODE 5 é definida pela composição " EI_{ef} ". A norma brasileira NBR 7190/97 recomenda uma metodologia simples de dimensionamento para peças compostas, apresenta coeficientes para a redução da inércia da peça não levando em consideração a não solidarização total da composição.

3

ANÁLISE TEÓRICA DA VIGA COMPOSTA

As VCMC foram analisadas teoricamente considerando iteração parcial, denominação utilizada por NEWMARK (1951, apud SANTANA, 1997) para definir a influência da deformação da ligação no comportamento final das vigas. Este autor considera que a iteração total é alcançada quando o elemento de ligação é a cola e, é nula quando inexistem elementos de ligação.

O conceito de composição parcial das vigas é fundamental para a análise matemática das VCMC. Neste capítulo, será apresentado o desenvolvimento da equação diferencial básica das vigas através do método baseado nas equações de equilíbrio, conforme apresentado por MOLHER (1956, apud SANTANA 1998).

3.1 – Hipóteses básicas

Para o desenvolvimento desta análise consideraram-se as seguintes hipóteses:

- a) a ligação é deformável entre os elementos madeira e compensado;
- b) a ligação apresenta comportamento elástico-linear;

- c) os deslocamentos das vigas são pequenos;
- d) as seções planas permanecem planas;
- e) a curvatura devida à flexão é a mesma para os elementos madeira e compensado;
- f) o carregamento é aplicado em toda a largura da seção transversal de maneira uniforme.

3.2 – Desenvolvimento da equação diferencial

Os parâmetros utilizados para as VCMC (FIG.3.1) estão relacionados a seguir:

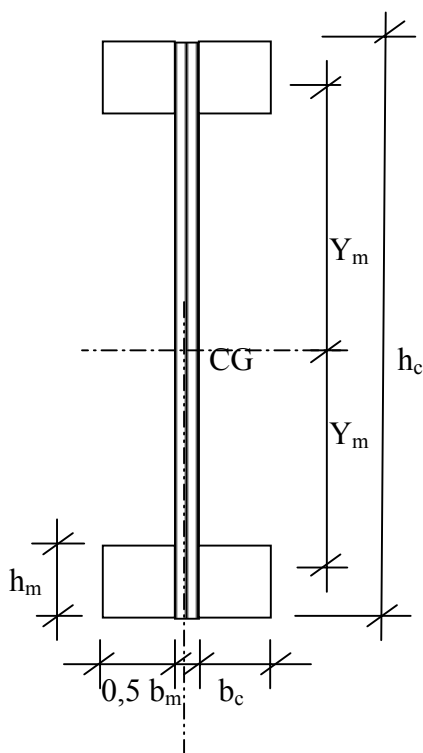


FIGURA 3.1 Seção transversal da viga

A_c = área da mesa inferior ou superior

A_m = área da alma

E_m = módulo de elasticidade da madeira

E_c = módulo de elasticidade do compensado

I_m = momento de inércia da mesa inferior ou superior

I = momento de inércia da seção composta

I_o = soma dos momentos de inércia de todos os elementos

I^* = momento inércia da seção parcialmente composta

I_f^* = momento inércia da mesa parcialmente composta

K = módulo de deslizamento da ligação

$\bar{K}$ = módulo de deslizamento equivalente

L = vão livre da viga

M_m = momento fletor para mesa superior ou inferior

M_c = momento fletor da alma

M = momento fletor da seção inteira

N_m = resultante das tensões normais na mesa

P = carga concentrada

S = espaçamento entre os pregos

T = fluxo de cisalhamento atuante na interface entre mesa e alma

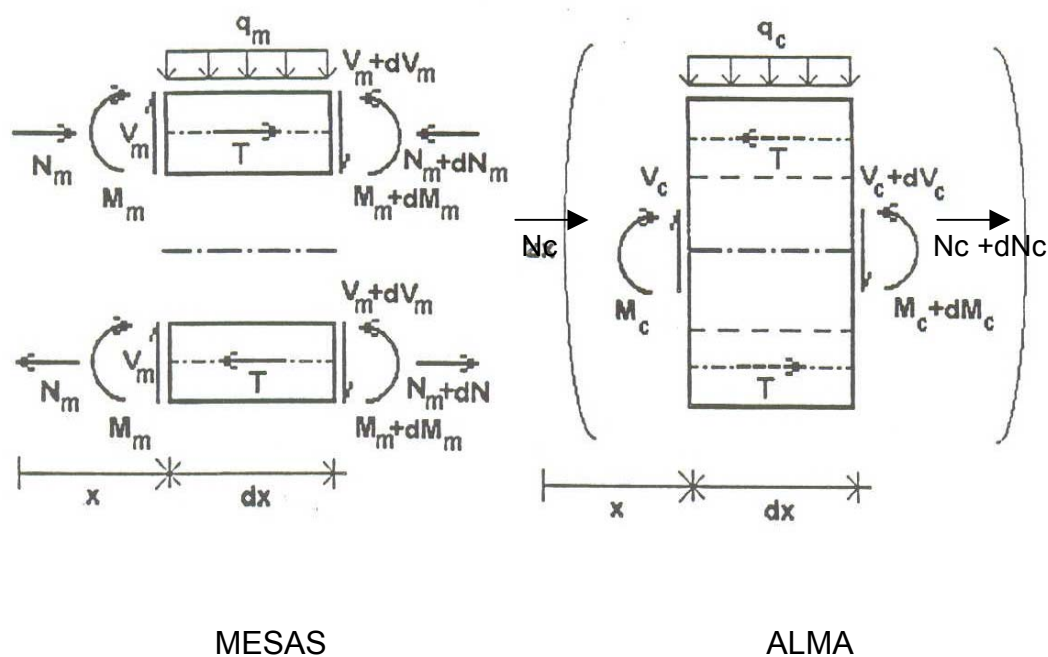


FIGURA 3.2 –Diagrama de corpo livre de um elemento infinitesimal da VCMC
Fonte: SANTANA (1997)

O diagrama de corpo livre de um elemento infinitesimal da viga, (FIG. 3.2) esquematiza a distribuição dos esforços internos e a solicitação externa entre as mesetas e a alma.

Momentos Fletores

O momento fletor resultante das tensões normais na alma é dado por:

$$M_c(x) = - E_c I_c \frac{dv^2(x)}{dx^2} \quad (3.1)$$

$$\text{Sendo : } I_c = \frac{b_c h_c^3}{12}$$

Nas mesas o momento fletor devido a tensões normais distribuídas em cada uma delas (1 par de flanges) é dado por:

$$M^*_m(x) = - E_m I_m \frac{d^2 v(x)}{dx^2} \quad (3.2)$$

$$\text{Sendo: } I^*_m = \frac{b h^3}{12} + A d^2$$

$$I^*_m = \frac{b_m h_m^3}{12} + \phi A_m \cdot \overline{y_m^2}$$

Sendo $\phi \rightarrow$ fator limitador da inércia, utilizado para definir composição parcial dos elementos. É um valor intermediário entre a inércia individual das peças e a inércia considerando a composição total. ($0 < \phi < 1$)

Forças Normais

A resultante das tensões normais atuantes nas mesas é a força normal dada por:

$$N_m(x) = - \frac{d^2 v(x)}{dx^2} \phi A_m \cdot \overline{y_m^2} \quad (3.3)$$

$$N_m(x) = - \frac{M(x)}{EI^*} \phi A_m \overline{y_m^2} \quad (3.4)$$

I^* = inércia da seção parcialmente composta

$$EI^* = E_c I_c + 2 \left(E_m I_m + E_m \phi A_m \overline{y_m^2} \right)$$

Considerando que na alma a resultante das tensões normais é nula, a distribuição de tensões nas mesas fica:

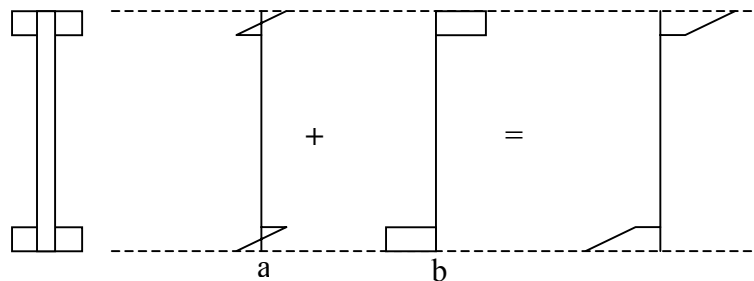


FIGURA 3.3 – Distribuição de tensões normais nas mesas das VCMC
 (a) distribuição considerando o momento fletor nas mesas
 (b) distribuição considerando a força normal aplicada nas mesas
 (c) distribuição total das tensões normais nas mesas

Resultante de Momento fletor em cada mesa em função da distribuição (a):

$$M_m(x) = - E_m I_m \frac{dv^2(x)}{dx^2} \quad (3.5)$$

Sendo $I_m = \frac{b_m h_m^3}{12}$ e sendo nula a resultante das tensões normais $N_c = 0$

Resultante de momento fletor para distribuição uma composição total (b)

$$M_m(x) = N_m \cdot 2 \overline{y_m} \quad (3.6)$$

A tração e compressão nas mesas resultam num binário representado por:

$$2 N_m(x) \overline{y_m} = - \left(EI^* - E_c I_c - 2 E_m I_m \right) \frac{d^2 v(x)}{dx^2} \quad (3.7)$$

$$M_m^*(x) = M_m(x) + 2 N_m(x) \overline{y_m} \quad (3.8)$$

A equivalência de momentos na seção é dada pelo momento na alma somado aos momentos nas duas mesas (superior e inferior) e a força normal nas mesas:

$$M(x) = M_c(x) + 2 M_m(x) + 2 N_m(x) \overline{y_m} \quad (3.9)$$

Para uma seção totalmente composta $\phi = 1$:

$$M_m(x) = - E_m I_m \frac{d^2 v(x)}{dx^2} \quad (3.10)$$

$$M_m^*(x) = - E_m I_m^* \cdot \frac{d^2 v(x)}{dx^2} \Rightarrow \quad (3.11)$$

$$M_m^*(x) = - \left(E_m I_m + E_m A_m \overline{Y_m^2} \right) \cdot \frac{d^2 v(x)}{dx^2} \quad (3.12)$$

$$N_m(x) = \frac{d^2 v(x)}{dx^2} A_m \overline{y_m} \Rightarrow \frac{M(x)}{EI} A_m \cdot \overline{y_m} \quad (3.13)$$

Sendo:

$$EI = E_c I_c + 2 E_m I_m + 2 A_m \overline{y^2} \quad (3.14)$$

$$EI_o = (E_m I_m + 2 E_c I_c) \quad (3.15)$$

$$EI^* = (E_c I_c + 2 E_m I_m) + 2 E_m \phi A_m \overline{y_m^2} \quad (3.16)$$

Então:

$$EI^* = EI_o + 2 E_m A_m \phi \overline{y_m^2} \quad (3.17)$$

Para uma seção com composição nula: $\phi=0$

$$M_c(x) = - E_c I_c \frac{d^2 v(x)}{dx^2} \quad (3.18)$$

$$M_m^*(x) = M_m(x) = - E_m I_m \frac{d^2 v(x)}{dx^2} \quad (3.19)$$

$$N_m(x) = 0 \quad (3.20)$$

Pela hipótese da curvatura ser a mesma para todos os elementos infinitesimais da viga, sendo o momento fletor distribuído por elemento, proporcional à rigidez e à flexão individual de cada um, têm-se:

$$\frac{d^2 v(x)}{dx^2} = -\frac{N(x)}{EI^*} = -\frac{M_m(x)}{E_m I_m} = -\frac{M_c(x)}{E_c I_c} \quad (3.21)$$

Das equações 3.9 e 3.21:

$$\frac{d^2 v(x)}{dx^2} = \frac{M_c(x) + 2M_m(x)}{EI_o} = \frac{M(x) - 2N_m(x)\bar{y}_m}{EI_o} \quad (3.22)$$

Fluxo de Cisalhamento:

Para a parte superior ou inferior da viga ($F(x) = N/2$) obtêm-se a relação entre a força e o deslizamento entre os elementos da ligação

$$q(x) = \frac{dN_m(x)}{2dx} \quad q(x) = \bar{k} \cdot \delta(x) \quad (3.23)$$

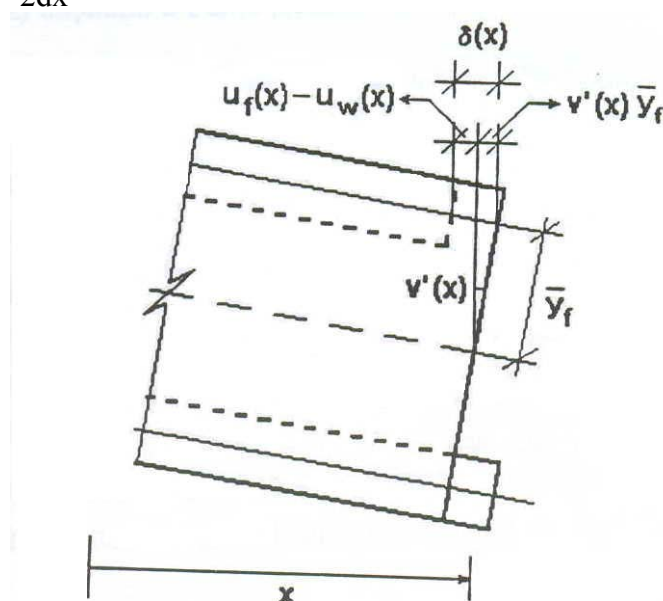


FIGURA 3.4 – Escorregamento relativo entre a mesa e a alma

A FIG. 3.4 mostra o escorregamento longitudinal relativo entre a mesa e a alma em seus centros de gravidade e pode-se escrever uma expressão que representa a compatibilidade de deslocamentos entre esses centros como:

$$\delta(x) = \mu_c(x) - \mu_m(x) + v'(x) \overline{y_m} \quad (3.24)$$

$$\delta(x) = \mu_m(x) - \mu_c(x) + \frac{d^2 v(x)}{dx^2} \overline{y_m} \quad (3.25)$$

Derivando a equação tem-se:

$$\frac{d\delta(x)}{dx} = \varepsilon_m(x) - \varepsilon_c(x) + \frac{d^2 v(x)}{dx^2} \cdot \overline{y_m} \quad (3.26)$$

Para composição total $\frac{d\delta(x)}{dx} = 0$ daí,

$$\varepsilon_m(x) - \varepsilon_c(x) = \frac{d^2 v(x)}{dx^2} \overline{y_m} \quad (3.27)$$

Voltando na expressão de fluxo tem-se:

$$q(x) = \overline{k} \cdot \delta(x) \rightarrow \delta(x) = \frac{q(x)}{\overline{k}} \quad (3.28)$$

$$\delta(x) = \frac{dN_m(x)}{2 \overline{k} dx} \quad (3.29)$$

Sendo $\overline{k}$ = módulo de deslizamento.

$$\frac{dN_m(x)}{dx} = 2 \overline{k} \delta(x) \quad (3.30)$$

As deformações na alma de compensado e nas mesas de madeira de acordo com a Lei de Hooke são:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_c = 0 \\ \varepsilon_m = \frac{N_c(x)}{E_c A_c} \end{array} \right.$$

$$\frac{d\delta(x)}{dx} = \frac{N_m(x)}{E_m A_m} + \frac{d^2 v(x)}{dx^2} \quad (3.31)$$

Sendo $\bar{k}$ o módulo de deslizamento e considerando a expressão 3.31 tem-se:

$$\frac{d^2 N_m(x)}{dx^2} = 2 \bar{k} \cdot \left(\frac{N_m(x)}{E_m A_m} + \frac{d^2 v(x)}{dx^2} \right) \quad (3.32)$$

Como:

$$\frac{d^2 v(x)}{dx^2} = \frac{N_m \bar{y}_m^2}{E_m I_m + E_c I_c} \quad (3.33)$$

$$\frac{d^2 N_c(x)}{dx^2} = 2 \bar{k} \cdot \left(\frac{N_m(x)}{E_m A_m} + \frac{N_m \bar{y}_m^2}{E_m I_m + E_c I_c} \right) \quad (3.34)$$

Partindo da equação 3.33 e considerando $EI_0 = 2 E_m I_m + E_c I_c$ teremos:

$$\frac{d^4 v(x)}{dx^4} - \alpha^2 \frac{d^2 v(x)}{dx^2} = \frac{\alpha^2}{EI} M(x) + \frac{\alpha^2}{EI_0} \frac{d^2 M(x)}{dx^2} \quad (3.35)$$

Onde:

$$\alpha^2 = 2 \bar{k} \left[\frac{1}{E_m A_m} + \frac{2 \bar{y}_m^2}{EI_0} \right] \quad (3.36)$$

Quando $\bar{k}$ e $2\bar{k}$ tende a infinito e, considerando a expressão 3.14, a equação da viga composta pode ser escrita da seguinte maneira para a composição total entre os elementos:

$$\frac{d^2 v(x)}{dx^2} = - \frac{M(x)}{EI} \quad (3.37)$$

3.3 – Equação para deslocamentos verticais das VCMC considerando o efeito da flexão

As VCMC foram ensaiadas conforme apresentado no capítulo 4 aplicando-se o esquema e carregamento conforme ilustrado FIG. 3.5

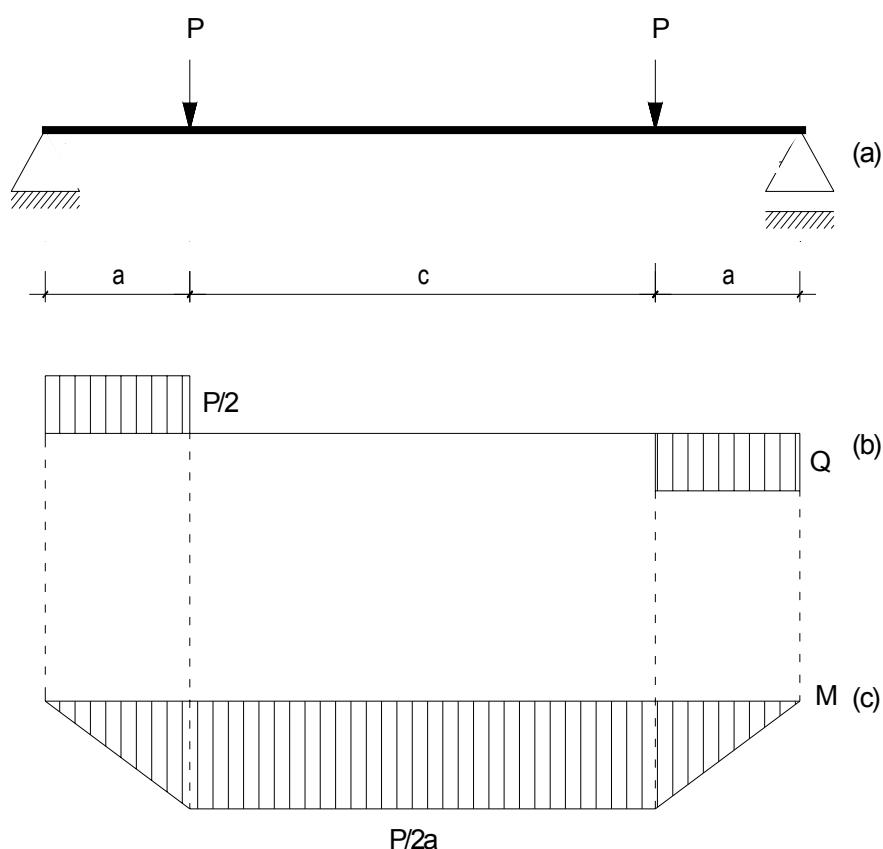


FIGURA 3.5 – (a) Esquema de carregamento das vigas e
 (b) Diagrama de força de cortante
 (c) Diagrama de momento fletor

Para esse tipo de carregamento, conforme apresentado por SANTANA (1997) fazendo o uso do software *Mathematica*, para a determinação da solução da equação diferencial da elástica (3.37) é dada a expressão:

$$0 \leq x \leq a: \quad (3.39)$$

$$v(x) = \frac{PaL}{2EI} x - \frac{Pa^2}{2EI} x + \frac{P}{6EI} x^3 + \frac{P}{\alpha^3 EI} \left(\frac{EI}{EI_0} - 1 \right) \left[\alpha x - \left(\cosh \alpha a - \sinh \alpha a \tanh \frac{\alpha L}{2} \right) \sinh \alpha x \right]$$

$$a \leq x \leq \frac{L}{2} : \quad (3.40)$$

$$v(x) = -\frac{Pa^3}{6EI} + \frac{PaL}{2EI}x - \frac{Pa}{2EI}x^2 + \frac{P}{\alpha^3 EI} \left(\frac{EI}{EI_0} - 1 \right) \left[\alpha a - \left(\cosh \alpha x - \sinh \alpha x \tanh \frac{\alpha L}{2} \right) \sinh \alpha a \right]$$

Sendo $\alpha^2 = 2k (1/E_c A_c + 2y^2/EI_0)$

Da mesma forma o deslocamento vertical máximo (L/2) pode ser escrito:

$$V_{\max} = \frac{PaL^2}{8EI} - \frac{Pa^3}{6EI} + \frac{P}{\alpha^3 EI} \left(\frac{EI}{EI_0} - 1 \right) \left[\alpha a - \frac{\sinh \alpha a}{\cosh \frac{\alpha L}{2}} \right] \quad (3.41)$$

Da resistência dos materiais, seguindo o esquema estático e as respectivas dimensões apresentadas, a determinação do deslocamento vertical máximo (L/2) teórico pode ser calculado pela soma dos deslocamentos devidos à flexão e ao cisalhamento:

(3.42)

$$V_{\max} = V_m + V_v$$

- parcela devida a momento fletor:

$$V_m = \frac{P}{6EI} \left[\frac{4a^4 + 8a^3c + 4,5a^2c^2 + 0,75ac^3}{c + 2a} \right] \quad (3.43)$$

Onde EI é o módulo de rigidez calculado levando-se em consideração a composição parcial da seção devido às deformações na região dos pinos metálicos.

(3.44)

- parcela devida a força cortante

$$V_v = f \frac{Pa}{GA}$$

Sendo:

f= fator de forma adotado

G = módulo de elasticidade transversal do material

4

ANÁLISE EXPERIMENTAL

Para o estudo do comportamento de vigas compostas de madeira e compensado (VCMC), proposto nesse trabalho, se fez necessária a realização de ensaios experimentais. Essa análise teve como objetivo aferir modelos matemáticos e numéricos de comportamento de vigas compostas e obtenção de parâmetros a serem usados em tais modelos.

Inicialmente foram caracterizados todos os materiais envolvidos nos ensaios. Estabelece-se como caracterização a determinação de propriedades físicas, de resistência e rigidez dos elementos que fizeram parte da composição das vigas. Desta maneira, a análise experimental foi dividida e realizada nas seguintes etapas:

a) Caracterização dos materiais

- A caracterização do compensado a ser utilizado na alma da VCMC;
- A caracterização da madeira a ser utilizada nas mesas da VCMC;
- A análise do comportamento das ligações utilizadas na união da alma com as mesas;

b) Ensaios de Flexão

- A análise do comportamento mecânico de vigas compostas de 220cm;
- A análise do comportamento mecânico de vigas compostas de 440cm com emendas transpassadas dos tipos “M” e “MA”;
- A análise do comportamento mecânico de vigas compostas de 440cm com emendas parafusadas;
- A análise das deformações das VCMC.

4.1 – Ensaios preliminares

A primeira etapa da análise experimental consistiu na caracterização dos materiais componentes das VCMC. Por meio da caracterização simplificada de 3 tipos de compensado, definiu-se o tipo mais adequado, entre estes compensados, para a composição das VCMC. As propriedades mecânicas da espécie de madeira “*Eucalliptus Grandis*” bem como o comportamento mecânico dos elementos de ligação madeira/compensado, também foram determinados experimentalmente.

4.1.1 – Definição e caracterização do compensado das VCMC

Na norma brasileira não existem procedimentos para a determinação de todas as propriedades do compensado, necessárias para o desenvolvimento desse trabalho. Desta maneira, para a caracterização de propriedades cujo procedimento não está normalizado, foram utilizados procedimentos propostos por autores da literatura pesquisada.

Os ensaios realizados tiveram como objetivo a determinação da resistência à compressão, tração, flexão, módulo de elasticidade à compressão e flexão de três tipos de compensado:

- Compensado de virola com espessura $e = 15 \text{ mm}$;
- Compensado de virola com espessura $e = 18 \text{ mm}$;
- Compensado naval com espessura $e = 18 \text{ mm}$.

Com os valores obtidos nos ensaios aliados ao custo das chapas, definiu-se o tipo a ser utilizado na execução das VCMC.

4.1.1.1 – Determinação da resistência à compressão do compensado

Foram realizados dois tipos de ensaio de compressão paralela às fibras; o primeiro, com a intenção de quantificar a resistência à compressão e o segundo para determinação de módulo de elasticidade. Os ensaios foram realizados para os três tipos de compensado: virola com espessura (e) igual a 15mm, virola ($e = 18$ mm) e naval ($e = 18$ mm).

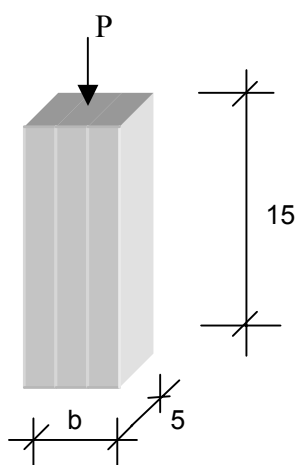


FIGURA 4.1 – Esquema do corpo-de-prova de ensaio à compressão do compensado
(Dimensões em cm, prisma composto por 3 peças coladas de 5x15cm)

Sendo:

$$b = 3e$$

e = espessura do compensado utilizado

De acordo com procedimentos descritos por RIBEIRO (1986), baseados no método da ASTM D-143(1981), que propõe a utilização de corpos-de-prova compostos por varias chapas de compensado coladas. Neste trabalho foram preparados e ensaiados 12 corpos-de-prova de cada tipo de compensado adotando as dimensões especificadas na NBR 7190/97 para compressão paralela cujas dimensões são 50mm x 50mm x 150mm. As chapas de

compensado foram cortadas em peças de dimensões de 5 cm de largura por 20cm de altura. Suas superfícies, após serem preparadas, foram coladas através de cola branca para madeira de tal forma que cada corpo-de-prova constituiu-se em blocos de 3 peças (FIG. 4.1).

A metodologia de ensaio bem como os valores médios e característicos foram obtidos segundo o procedimento indicado pela NBR 7190/97 item 6.4.7, para corpos-de-prova de madeira e são apresentados na TAB.4.1.

TABELA 4.1 – Resultados de ensaios de compressão em corpos-de-prova de compensado

Compensado	$F_{co,m}$ (kN)	$f_{co,m}$(MPa)	$f_{co,k}$(MPa)	$E_{co,m}$(MPa)
Virola (15 mm)	47,4	20,3	14,9	5489,0
Virola (18 mm)	57,4	19,6	13,7	4790,3
Naval (18 mm)	76,8	28,1	20,4	7968,9

Sendo:

$F_{co,m}$ = força de ruptura média à compressão paralela às camadas;

$f_{co,m}$ = resistência média à compressão paralela às camadas;

$f_{co,k}$ = resistência característica à compressão paralela às camadas;

$E_{co,m}$ = módulo de elasticidade médio à compressão paralela às camadas.

4.1.1.2 – Determinação da resistência à tração do compensado

Para quantificar a resistência à tração dos três tipos de compensado foi utilizada a metodologia de ensaio também utilizada por RIBEIRO (1986), que foi extraída da ASTM 3500-76 (1981). Desta forma os corpos-de-prova tiveram sua seção reduzida na largura, mantendo-se as características originais da chapa na região central.

Os procedimentos de ensaio seguiram as recomendações da NBR 7190/97 para corpos-de-prova de madeira especificadas em seu anexo B, item 6.4.7.

Foram preparados e ensaiados 12 corpos-de-prova (FIG.4.2) e as médias de seus resultados estão apresentadas na TAB. 4.2.

TABELA 4.2 – Resultados de ensaios de tração em corpos-de-prova de compensado

Compensado	$F_{to,m}$ (kN)	$f_{to,m}$ (MPa)	$f_{to,k}$ (MPa)
Virola (15 mm)	16,0	41,7	29,1
Virola (18 mm)	20,6	43,1	30,4
Naval (18 mm)	18,5	41,7	29,5

Sendo:

$F_{to,m}$ = força de ruptura média à tração paralela às camadas;

$f_{to,m}$ = resistência média à tração paralela às camadas;

$f_{to,k}$ = resistência característica à tração paralela às camadas.

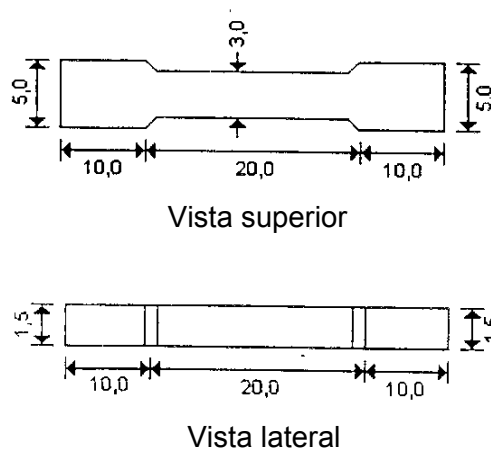


FIGURA 4.2 – Esquema do corpo-de-prova para ensaio de tração para compensado
(Dimensões em cm)

4.1.1.3 - Determinação da resistência à flexão do compensado

Para determinar o módulo de elasticidade e resistência média à flexão estática do compensado, foram realizados ensaios com 12 corpos-de-prova seguindo as

recomendações da norma NBR9533/86 e as médias de seus resultados são apresentadas na tabela 4.3.

TABELA 4.3 – Resultados de ensaios de flexão de corpos-de-prova de compensado

Compensado	$F_{\text{máx}}$ (kN)	T_r (MPa)	E_b (MPa)
virola (15 mm)	*	*	*
virola (18 mm)	2,2	44,6	4356,6
Naval (18 mm)	2,1	47,6	6985,6

Sendo:

$F_{\text{máx}}$ = Força máxima de ruptura devido à flexão normal às fibras;

T_r = Tensão de ruptura à flexão normal às fibras;

E_b = Módulo de elasticidade devido à flexão normal às fibras ;

(*) = Valores não obtidos em função da baixa rigidez.

4.1.1.4 – Conclusões Preliminares

Tendo em vista os resultados encontrados, analisou-se os seguintes aspectos:

- Os valores de resistência à compressão e à tração do compensado virola de espessura 15 mm são proporcionalmente inferiores aos valores de 18 mm;
- O compensado virola de espessura 15 mm apresentou dificuldades para ensaio de flexão devido a sua baixa rigidez;
- Apesar do compensado virola 18 mm ter apresentado bons resultados não superou os resultados dos ensaios realizados com o compensado naval de mesma espessura;
- O compensado naval não apresenta vantagem no que diz respeito ao fator econômico, portanto, optou-se em realizar as vigas compostas com o compensado tipo virola 18 mm, com os valores de resistência, elasticidade e densidade, apresentados na TAB. 4.4.

TABELA 4.4 –Propriedades mecânicas do compensado utilizado na composição das VCMC

Propriedades	(MPa)
$f_{co,m}$	19,6
$f_{co,k}$	13,7
$E_{co,m}$	4740
$f_{to,m}$	43,1
$f_{to,k}$	30,4
T_r	44,6
E_b	4356

Sendo a densidade do compensado igual a $\rho = 5,73 \text{ kN/m}^3$, determinada de acordo com as normas da ABNT.

4.1.2 - Caracterização da madeira

A madeira, Eucalyptus Grandis, proveniente de áreas de reflorestamento do norte de Minas Gerais, com cerne castanho claro, alburno bege rosado, pouco brilho, macia ao corte e de textura media, foi previamente secada em estufa e acondicionada em ambiente com 20°C de temperatura, aproximadamente, com umidade relativa do ar em torno 65%.

Posteriormente à escolha visual das peças a serem utilizadas, essas foram caracterizadas, segundo a NBR 7190/97, quanto à densidade, resistência à compressão paralela às fibras, resistência à compressão normal e à tração paralela às fibras.

4.1.2.1 - Determinação da resistência à compressão da madeira

Os 12 corpos-de-prova para este ensaio (FIG.4.3) foram instrumentados por dois relógios comparadores conforme recomendado pela NBR 7190. Por meio dos trechos lineares dos diagramas de (tensão x deformação) traçados após os ensaios, foram determinados os respectivos módulos de elasticidade pela para

compressão paralela as fibras da madeira. Os valores médios e característicos dos resultados desses ensaios estão apresentados na TAB. 4.5.

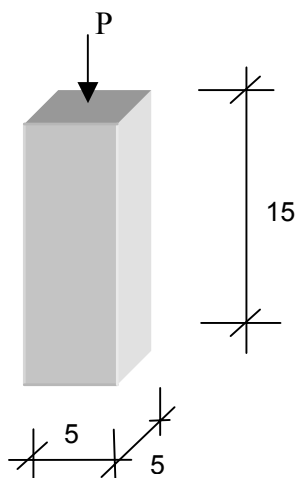


FIGURA 4.3 – Esquema do corpo-de-prova para ensaio à compressão da madeira. (Dimensões em cm)

TABELA 4.5 – Resultados dos ensaios de compressão paralela e normal da madeira

$f_{co,m}(MPa)$	$f_{co,k}(MPa)$	$E_{co,m}(MPa)$	$f_{c90,m}(MPa)$	$f_{c90,k}(MPa)$	$E_{c90,m}(MPa)$
76,2	53,8	26340	19,5	13,9	1580

Sendo:

$f_{co,m}$ = resistência média à compressão paralela às fibras;

$f_{co,k}$ = resistência característica à compressão paralela às fibras;

$E_{co,m}$ = módulo de elasticidade médio no ensaio de compressão paralela às fibras;

$f_{c90,m}$ = resistência média à compressão normal às fibras;

$f_{c90,k}$ = resistência característica à compressão normal às fibras;

$E_{c90,m}$ = módulo de elasticidade médio no ensaio de compressão normal às fibras.

4.1.2.2– Determinação da resistência à tração da madeira

A rigidez da madeira de acordo com a NBR 7190/97 na direção paralela as fibras e obtida pelo ensaio de tração paralela as fibras e caracterizada pelo módulo de elasticidade, determinado pelo trecho linear do diagrama tensão deformação específica. Os 12 corpos-de-prova para este ensaio são representados na FIG. 4.4.

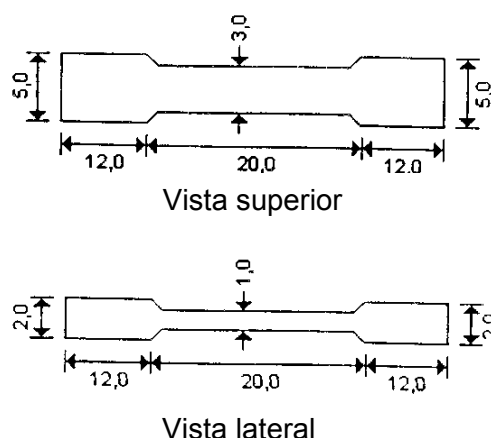


FIGURA 4.4 – Esquema do corpo-de-prova para ensaio de tração da madeira

TABELA 4.6–Resultados dos ensaios de tração paralela e da densidade da madeira

$f_{to,m}$ (MPa)	$f_{to,k}$ (MPa)	$E_{to,m}$ (MPa)	ρ (kN/m ³)
183	128	20310	11,51

Sendo:

$f_{to,m}$ = resistência média à tração paralela às fibras;

$f_{to,k}$ = resistência característica à tração paralela às fibras;

$E_{to,m}$ = módulo de elasticidade no ensaio de tração paralela às fibras.

ρ = densidade da madeira

4.1.3 –Ligações – Módulo de Deslizamento

Em função dos estudos teóricos realizados, concluiu-se em adotar o EUROCODE 5 para formulações matemáticas de dimensionamento das VCMC. Dessa forma, fez-se necessário a determinação do módulo de deslizamento ou rigidez (k) das ligações entre as mesas e a alma.

Para essas ligações entre alma e mesas foram utilizados parafusos de 11mm de diâmetro. Segundo STAMATO (2002), os ensaios recomendados para a determinação do módulo de deslizamento consistem em reproduzir ligações semelhantes às ligações dos modelos reais, com os mesmos diâmetros de parafusos e dimensões dos materiais, madeira e compensado. Os corpos-de-prova foram moldados com a espessura original do compensado, 1,8cm, que é a espessura da alma das vigas e com a espessura de 3,5cm para as peças de madeira representando a largura das mesas.

Semelhante ao método de ensaio da resistência ao embutimento da madeira que é especificado nas recomendações do Anexo B da NBR 7190/97, este ensaio, segundo STAMATO (2002), elimina as interferências que não são medidas nos ensaios de embutimento, como as diferenças entre as propriedades da alma e das mesas.

Os ensaios foram realizados com o auxílio de um sistema computadorizado com a utilização do programa TESC. Foram ensaiados 10 corpos-de-prova com geometria ilustrada na figura 4.5.

Os sensores do equipamento efetuaram as leituras de deslocamentos entre os pratos da máquina e com esses dados foram traçados diagramas de carga x deslocamento como o exemplificado na FIG. 4.6 para cada corpo-de-prova. Os registros das forças foram efetuados automaticamente em aproximadamente 10 leituras por segundo.

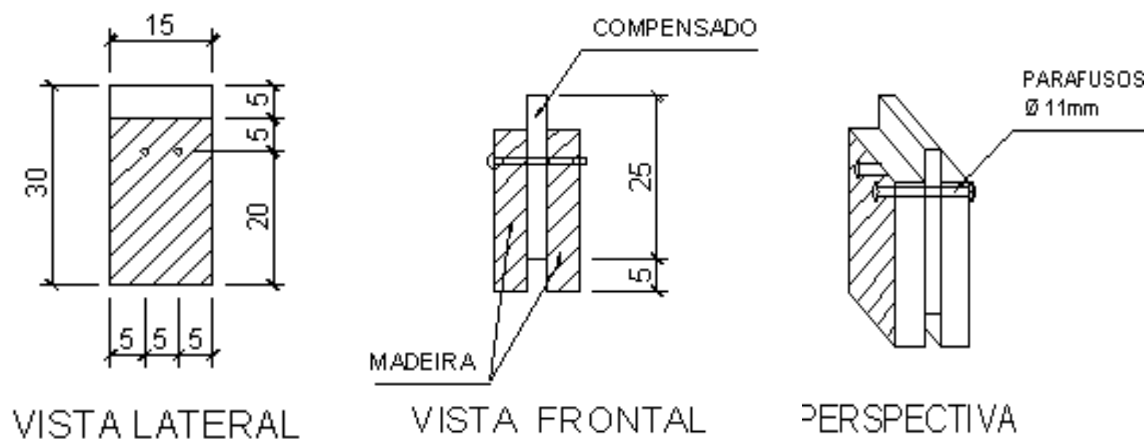


FIGURA 4.5 - Esquema de ensaio para determinação do módulo de deslizamento da ligação – Medidas em (cm)

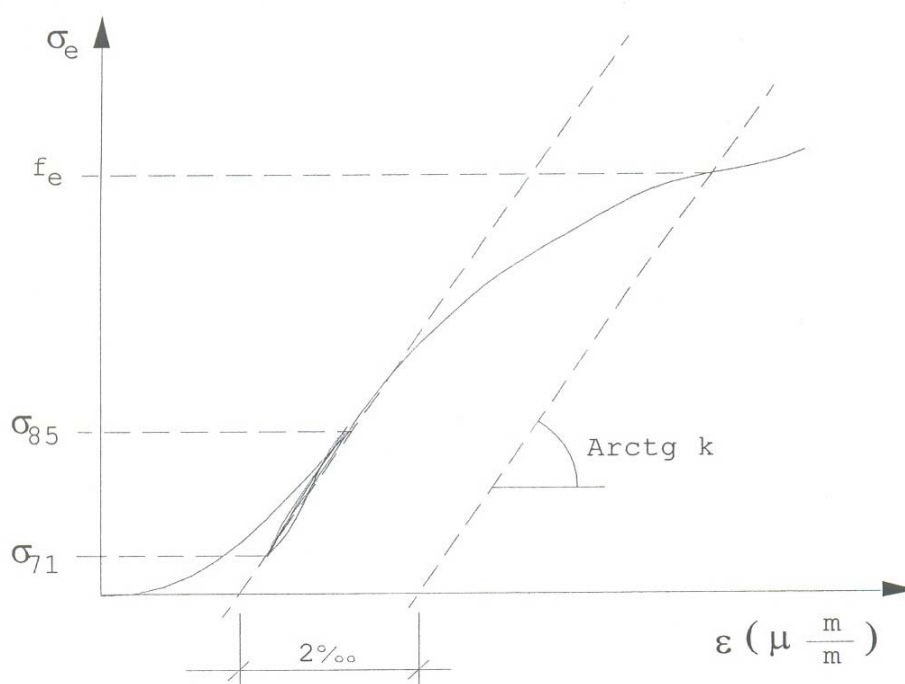


FIGURA 4.6 –Diagrama tensão deformação específica de embutimento
Fonte NBR 7190/97, anexo B.

Neste mesmo ensaio, determinou-se a resistência média de embutimento do compensado ($f_{e0,est}$) sendo igual a 44,6MPa e seu valor característico igual 31,2MPa. Considerando o carregamento máximo aplicado, os valores obtidos dos módulos de deslizamento das ligações dos 10 corpos-de-prova são mostrados na TAB. 4.7.

TABELA 4.7 – Resultados dos módulos de deslizamento das ligações em corpos-de-prova de madeira e compensado

CP	K (kN/cm)
01	28,30
02	27,33
03	27,45
04	28,50
05	25,80
06	31,23
07	25,19
08	25,14
09	33,07
10	22,33
média	27,50

4.2 – Planejamento Estatístico

Antes da realização dos ensaios principais das vigas VCMC foi utilizado um planejamento estatístico para que a análise dos dados experimentais fosse mais eficiente.

Todos os modelos de 440cm de comprimento foram elaborados com os parâmetros geométricos e propriedade de resistência similares. A diferença entre os mesmos, consistiu na emenda central que teve quatro tipos de união.

- Tipo M = com transpasse das peças de madeira e com enrijecedor central.

- Tipo MA = com transpasse das peças de madeira e sem enrijecedor central.
- Tipo MP8 = sem transpasse das peças de madeira e com ligação de 8 parafusos na emenda central
- Tipo MP12 = sem transpasse das peças de madeira e com ligação de 12 parafusos na emenda central.

O planejamento adotado neste item é similar ao apresentado por STAMATO (2002), que alcançou resultados satisfatórios. Com base nas teorias de estatística foi elaborado um planejamento para execução dos ensaios e adotou-se a análise de 2^2 (segunda ordem) representada pela distribuição abaixo (QUAD. 4.1)

QUADRO 4.1- Variáveis da análise estatística

Variável VCMC	X1	X2
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1

Onde:

X1 = tipo de emenda

mínimo (-1) = emenda com parafusos

máximo (+1) = emenda com transpasse

X2 = enrijecedor central

mínimo (-1) = sem enrijecedor central

máximo (+1) = com enrijecedor central

Para se obter um bom controle desta análise foram planejados 6 ensaios para cada tipo de modelo. Assim sendo, totalizou-se 24 vigas a serem ensaiadas.

4.3 – Ante-Projeto da viga composta

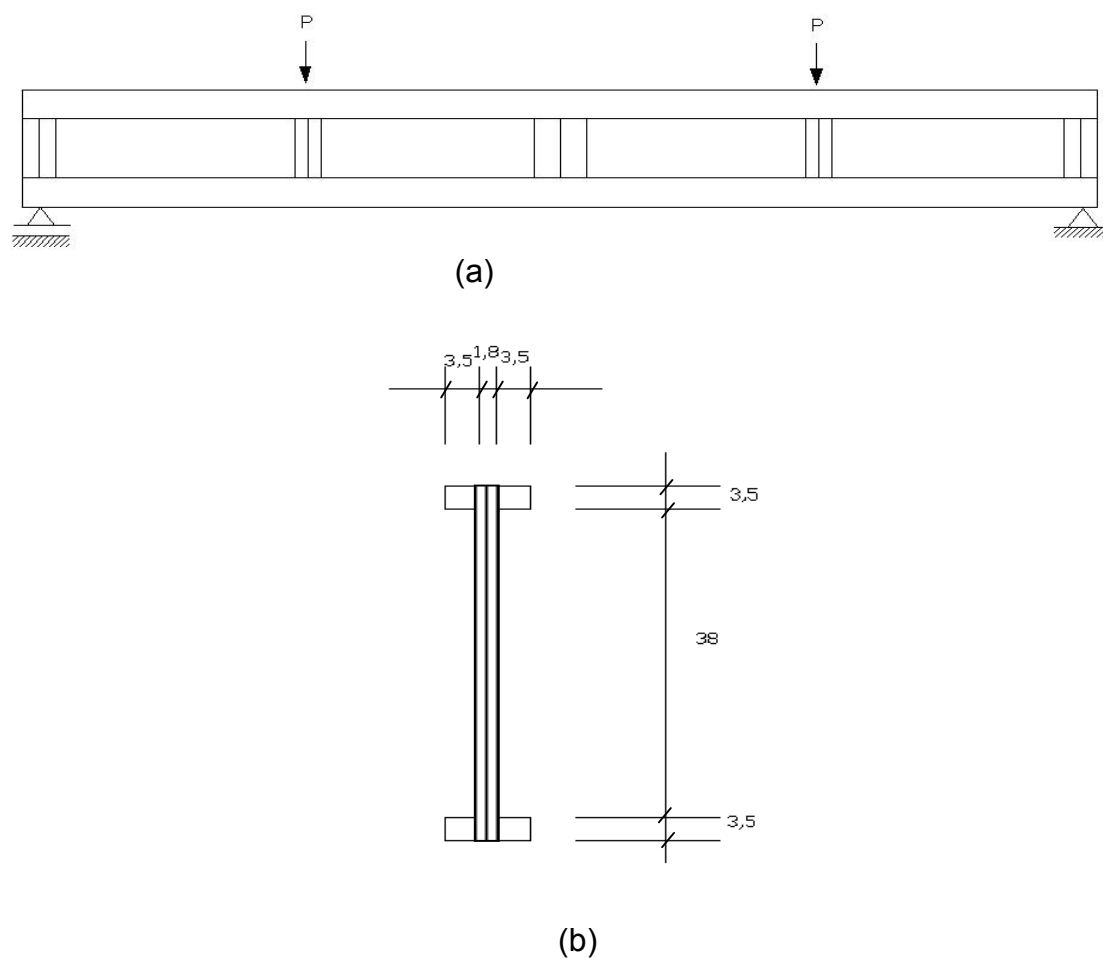


FIGURA 4.7 – Geometria da seção e esquema de carregamento da VCMC
 (a) Vista Lateral da Viga (b) Seção Transversal da Viga (cm)

No Brasil, as chapas de compensado apresentam comprimento máximo de 220cm. A utilização dessas chapas em peças estruturais, em comprimentos maiores que o de fábrica, só se torna possível por meio da confecção de emendas. Neste item será apresentado o anteprojeto de uma viga biapoiada, composta de madeira e compensado de comprimento igual a 440cm.

Os dados geométricos da seção transversal e o tipo de carregamento adotado estão representados na FIG. 4.7.

4.3.1 – Determinação da força máxima P

Com os materiais caracterizados no item 4.1 e com a geometria apresentada na FIG. 4.7, determinou-se:

- força máxima P que poderá atuar em uma viga;
- espaçamento entre os parafusos na ligação alma/mesa;
- número de parafusos da ligação/emenda entre as peças no meio do vão.

Pelas equações de equilíbrio, determinou-se o momento fletor máximo $M_{\text{máx.}}$. Com as expressões clássicas da resistência dos materiais foram obtidos os seguintes resultados:

- Tensão de tração na flexão:

$$M_{\text{máx.}} = 141,5 P_1$$

$$f_{t0 \text{ madeira}} = 183 \text{ MPa} \quad P_1 = 135 \text{ kN}$$

$$f_{t0 \text{ compensado}} = 4310 \text{ MPa} \quad P_{1'} = 51,95 \text{ kN}$$

- Tensão de compressão na flexão:

$$M_{\text{máx.}} = 141,5 P_2$$

$$f_{c0 \text{ madeira}} = 76,2 \text{ MPa} \quad P_2 = 56,5 \text{ kN}$$

$$f_{t0 \text{ compensado}} = 19,6 \text{ MPa} \quad P_{2'} = 15,53 \text{ kN}$$

- Tensão de cisalhamento na flexão:

$$V_{\text{máx.}} = P_3$$

$$f_{v0 \text{ madeira}} = 9,1 \text{ MPa} \quad P_3 = 40,30 \text{ kN}$$

- Deslocamento vertical máximo (Flecha máxima)

$$V_{\text{máx.}} = 430/200 = 2,15 \text{ cm} \quad P_4 = 15,34 \text{ kN}$$

Conhecidos esses valores conclui-se que $P_{\text{máx.}} = 15,34 \text{ kN}$. Essa é a força teórica que pode ser aplicada nas VCMC, na realização dos ensaios.

4.3.2 – Determinação do espaçamento entre os parafusos na ligação alma/mesa

- Diâmetro adotado = 1,1 cm
- Fluxo de cisalhamento na região da ligação alma/mesa: $q = 0,165 \text{ kN/cm}$

Com o embutimento da madeira ($f_{e0} = 76,2 \text{ MPa}$), o embutimento do compensado ($f_{e0} = 44,4 \text{ MPa}$) e a resistência ao cisalhamento do parafuso ($f_v, \text{ par.} = 150 \text{ MPa}$), determinou-se respectivamente e_1 , e_2 , e_3 , que são os espaçamentos necessários para os parafusos que ligam as mesas e a alma, o menor dos três valores (e):

- espaçamento - $e_1 = 177,8 \text{ cm}$
- espaçamento - $e_2 = 53,28 \text{ cm}$
- espaçamento - $e_3 = 86,36 \text{ cm}$

Portanto, o espaçamento máximo a ser adotado entre os parafusos deve ser de $e = 53,28 \text{ cm}$.

Em função dos itens expostos foram montadas vigas de 440cm, com emenda por transpasse das peças de madeira, visando seu comportamento mecânico e carga máxima. Essas vigas foram montadas com espaçamento entre parafusos da ligação alma/mesa de 20cm, valor este definido com intuito de diminuir a influência do esmagamento do compensado nos valores de deslocamentos finais.

4.4 – Ensaio de flexão das VCMC

As VCMC foram montadas em formas e dimensões diferenciadas, com protótipos dos tipos: A, M, MA, M8P, M12P e MSE. Seus respectivos ensaios foram elaborados com o objetivo de se determinar: deslocamentos verticais, solicitações máximas, modos de ruptura e deformações. A montagem das VCMC, o procedimento dos ensaios e seus respectivos resultados são descritos nos itens a seguir.

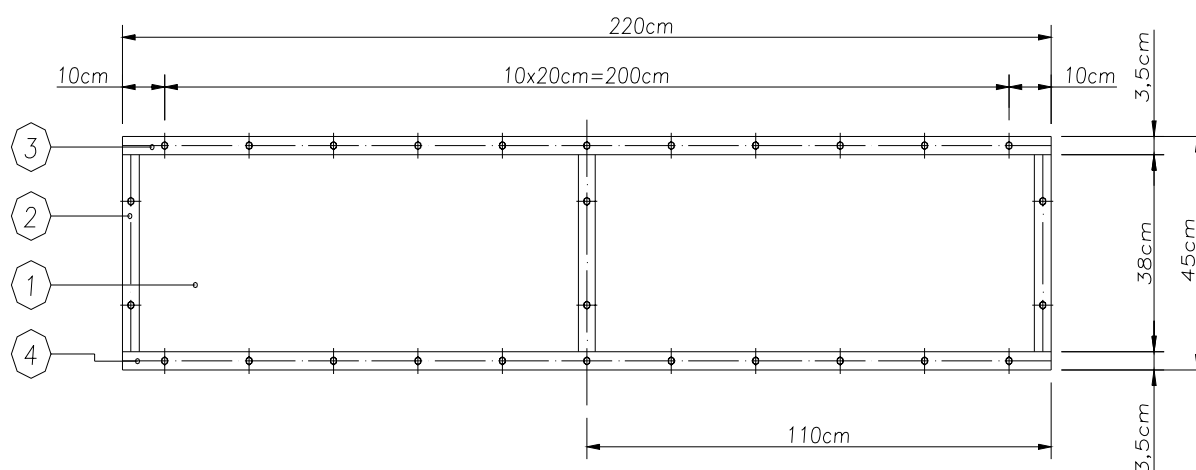
4.4.1 - Determinação experimental de deslocamentos verticais e de carregamento de ruptura

As vigas foram montadas com os tipos A, M, MA, MP8, e MP12 conforme citado no item 4.2. Os deslocamentos verticais das vigas e o carregamento de ruptura das mesmas foram determinados através de ensaios experimentais realizados no Laboratório de Análise Experimental de Estruturas (LAEES) da Escola de Engenharia da UFMG.

4.4.1.1–Vigas do Tipo “A”

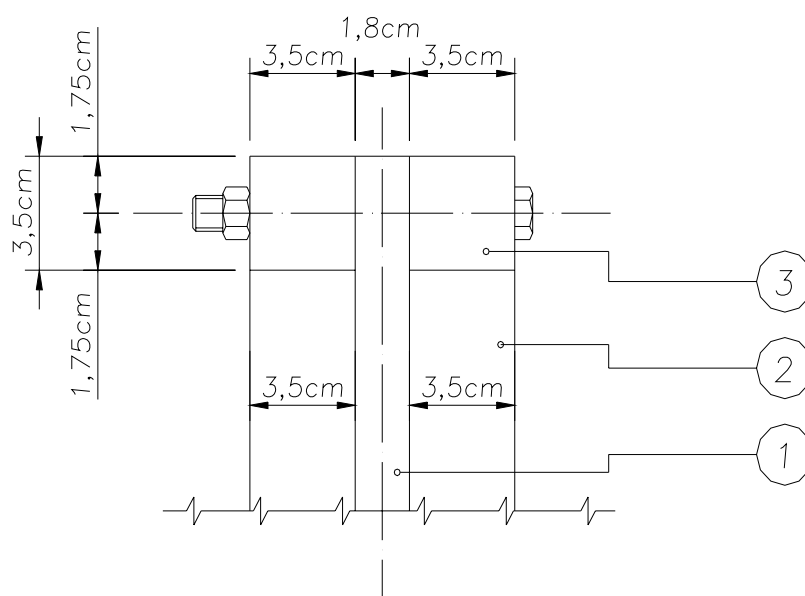
Cada viga do tipo “A”, ilustrada na FIG. 4.8, era composta de 4 peças de madeira serrada da espécie eucalipto na posição das mesas, com seção transversal de 3,5cm x 3,5cm e 220cm de comprimento. Na posição da alma, este tipo de viga era composto pelo compensado tipo virola, com 1,8cm de espessura, 45cm de altura e 220cm de comprimento.

Os parafusos lisos com roscas nas extremidades, com 1,1cm de diâmetro e 11cm de comprimento, foram espaçados a cada 20cm e distribuídos de forma simétrica em relação ao centro da extensão da viga. Desta forma cada viga possuía 28 unidades, 11 unidades em cada mesa, superior e inferior, e 6 nos enrijecedores (2 por enrijecedor). Suas extremidades foram enrijecidas com peças de madeira de seção 3,5 x 3,5 cm e 37 cm de altura.



(a)

- 1 – Chapa de Compensado de 18 mm (alma da viga)
 2 – Enrijecedor em madeira
 3 – Parafusos – parafusos de 11 mm
 4- Peça de madeira de 3,5 x 3,5 cm (mesa da viga)



DETALHE – 1

ESC.: 1:4

(b)

FIGURA 4.8 – Vigas do tipo A : Fonte:do autor

a)Vista Lateral

b) Detalhe da Seção transversal na região do enrijecedor

A montagem foi executada na marcenaria da UFMG e constituiu-se em cortar as peças de madeira e de compensado em uma serra elétrica de bancada com as dimensões especificadas em projeto. Posteriormente, as peças foram aparelhadas e demarcadas para receberem a pré-furação onde os parafusos foram colocados para unirem o conjunto. Ao todo, foram montados e ensaiados 6 vigas deste tipo.

4.4.1.1.1–Equipamentos utilizados

Para a realização dos ensaios foi utilizado um anel dinamométrico e um pórtico de reação com capacidade para 100kN disponível no LAEES. Para que o carregamento fosse aplicado em apenas dois pontos da viga, foi colocado sobre a mesma um perfil metálico.

Foram criados apoios de madeira tipo garfo, para as extremidades das vigas (FIG. 4.9), sendo um fixo e outro móvel. Para que durante o ensaio fosse permitido o deslocamento longitudinal na região dos apoios, foram colocadas pequenas rodinhas.



FIGURA 4.9 – Apoio tipo garfo para as extremidades da viga

Para aplicação do carregamento, foi utilizado um cilindro hidráulico controlado por uma bomba elétrica. A vazão de óleo desta bomba corresponde à velocidade de aplicação do carregamento.

4.4.1.1.2- Descrição do Ensaio

Não existe uma recomendação normativa na NBR7190, portanto, para a realização de ensaio de flexão em vigas compostas fez-se uma adaptação em função das recomendações de ensaios realizados por outros autores da bibliografia disponível, como SANTANA (1997), citada no capítulo 2.

As vigas eram transportadas manualmente, da marcenaria para o Laboratório, após serem montadas. Sob o pórtico, as vigas eram centralizadas e colocadas sobre os apoios fixo e móvel em suas extremidades, que foram colocados sobre dois blocos de concreto.

Três relógios comparadores digitais com capacidade de centésimos de milímetros foram utilizados na região inferior das vigas para medir os deslocamentos verticais. Sobre a viga foi colocado um perfil metálico, centralizado e bi-apoiado. Este perfil teve a função de receber o carregamento e transferi-lo para cada terço de vão da viga, conforme mostra o arranjo de ensaio ilustrado na FIG. 4.10.

Em todos os ensaios procurou-se aplicar o mesmo carregamento para uma melhor comparação e análise de resultados. Estipulou-se, em função de um ensaio destrutivo preliminar, que a provável ruptura das vigas seria com um valor aproximado de 50kN. Valor este definido pela perda de estabilidade lateral apresentada neste ensaio destrutivo. Por esse motivo, os valores coletados de deslocamentos não puderam ultrapassar à correspondente força de 36,90kN, isto é, aproximadamente 70% da provável ruptura.

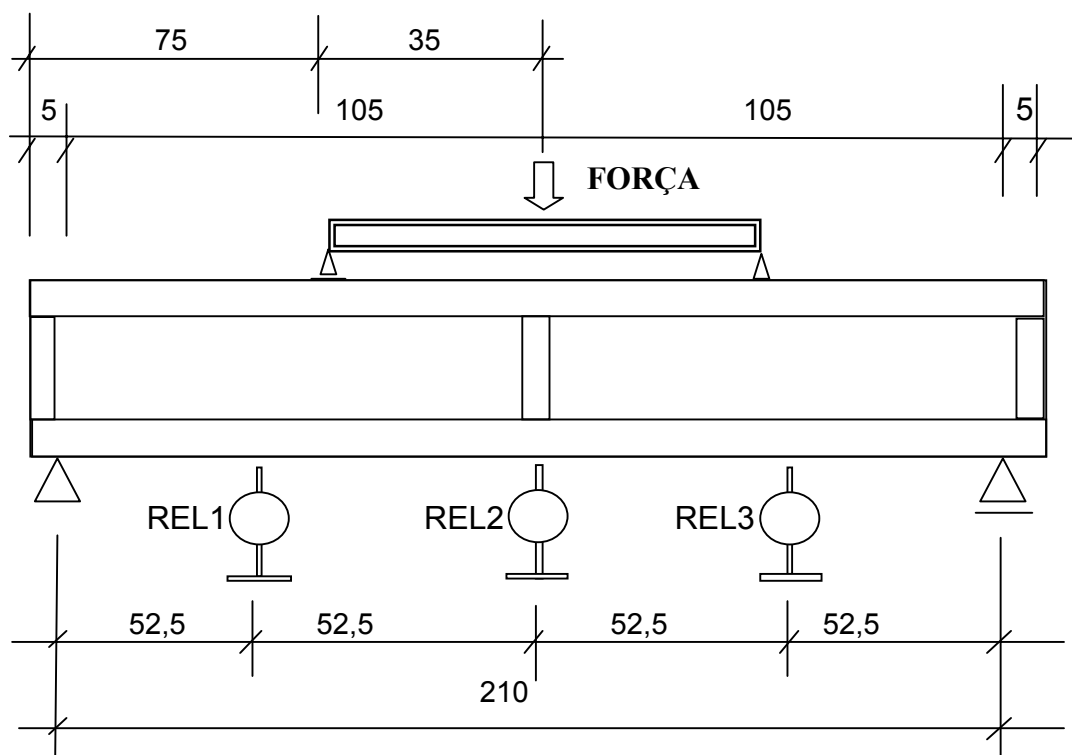


FIGURA 4.10 - Esquema de ensaio das vigas tipo A (medidas em cm)

Uma primeira viga foi montada e rompida sem instrumentação, para a determinação da solicitação de ruptura das vigas posteriores. Sendo assim, as demais foram ensaiadas com instrumentação e as leituras foram efetuadas então, a cada acréscimo de 2,46kN de força. Após a realização da parte inicial do ensaio ($P=36,90\text{kN}$) e da coleta de dados, foram retirados os relógios comparadores para evitar-se danos dos mesmos. A força foi então acrescida até a ruptura da viga.

Os dados coletados foram transportados para uma planilha eletrônica, onde realizou-se o traçado de gráficos das configurações deformadas das vigas.

4..4.1.1.3 – Resultados

A TAB 4.8 mostra os resultados de ruptura e as FIG de 4.11 a 4.16 mostram as respectivas configurações deformadas das vigas 1A, 2A, 3A, 4A, 5A e 6A. Sendo o comprimento do vão livre entre os apoios igual a 210cm, é

apresentado o valor das deformações: no centro da viga, a 35cm de distância do apoio direito e a 35 cm de distância do apoio esquerdo.

De todas as vigas ensaiadas, o modo de ruptura apresentado foi o de tração na alma de compensado próximo às mesas inferiores devido a flexão.

TABELA 4.8 –Resultados de ruptura dos protótipos tipo A

VIGA	Força de ruptura (kN)
1A	56,58
2A	41,82
3A	59,04
4A	51,66
5A	44,28
6A	54,12

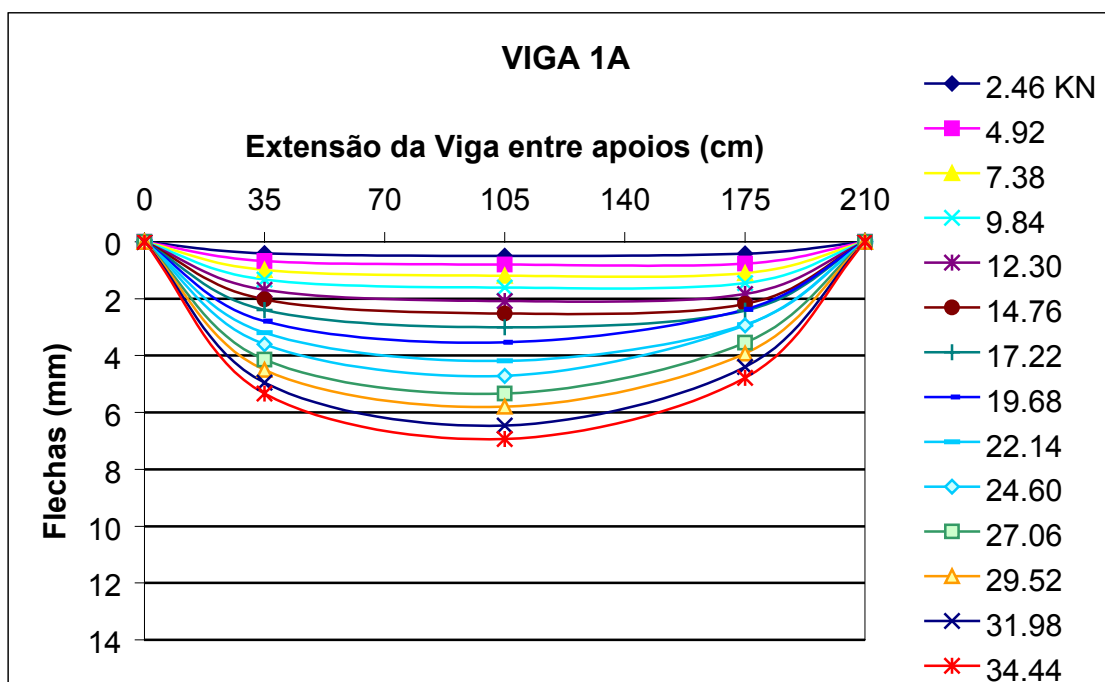


FIGURA 4.11 - Gráfico da configuração deformada da viga 1A

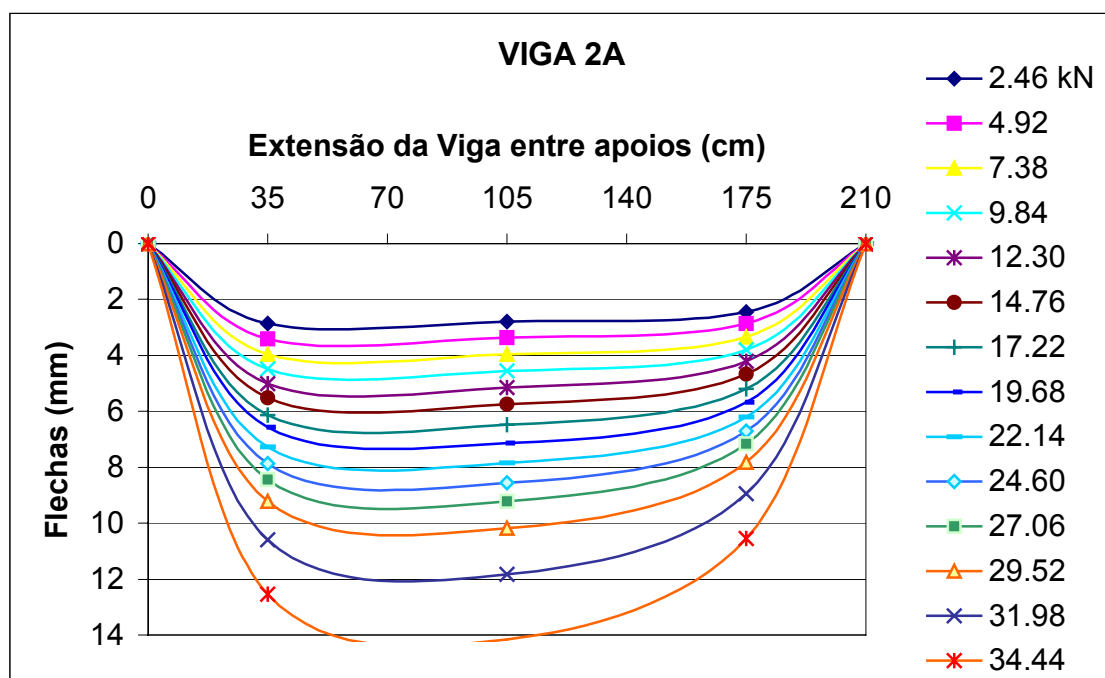


FIGURA 4.12 - Gráfico da configuração deformada da viga 2A

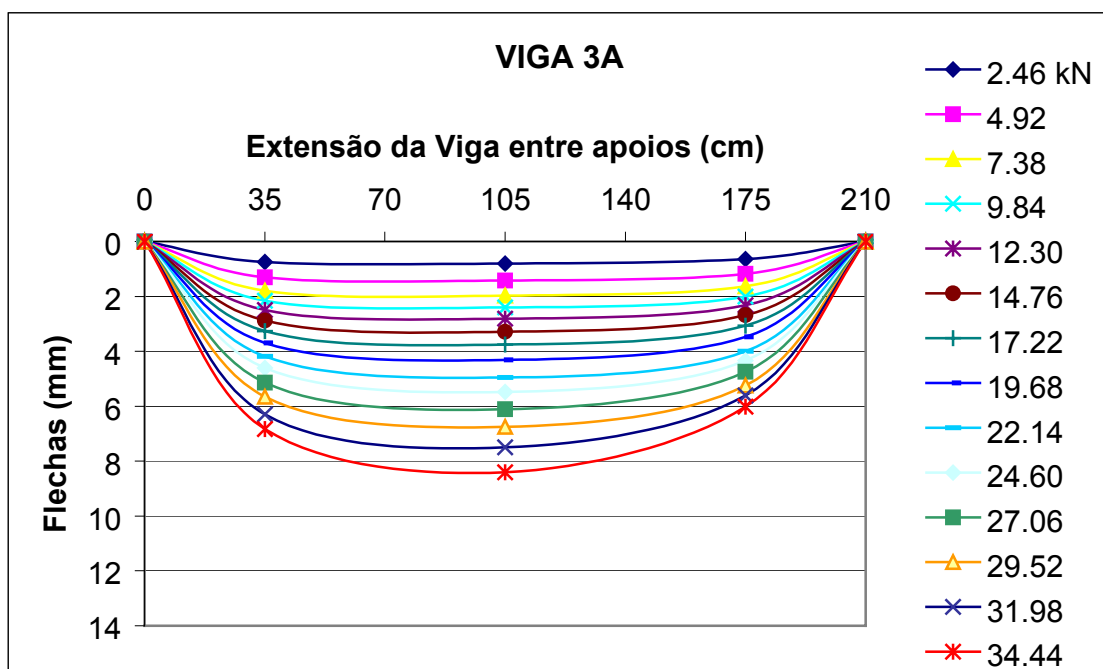


FIGURA 4.13 - Gráfico da configuração deformada da viga 3A

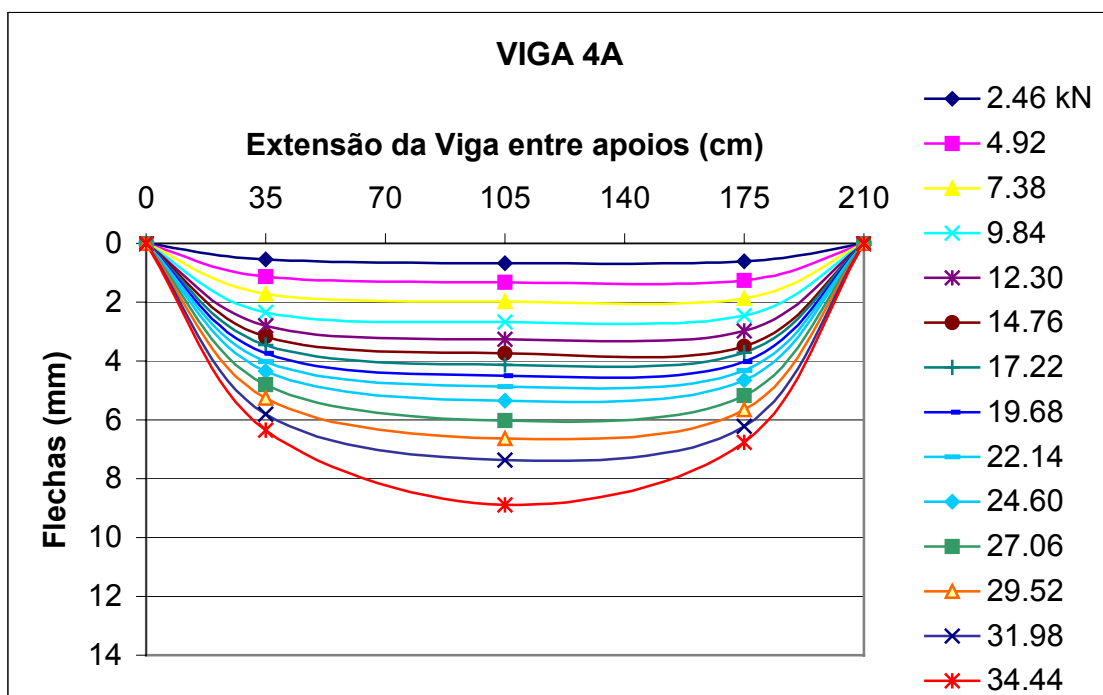


FIGURA 4.14 - Gráfico da configuração deformada da viga 4A

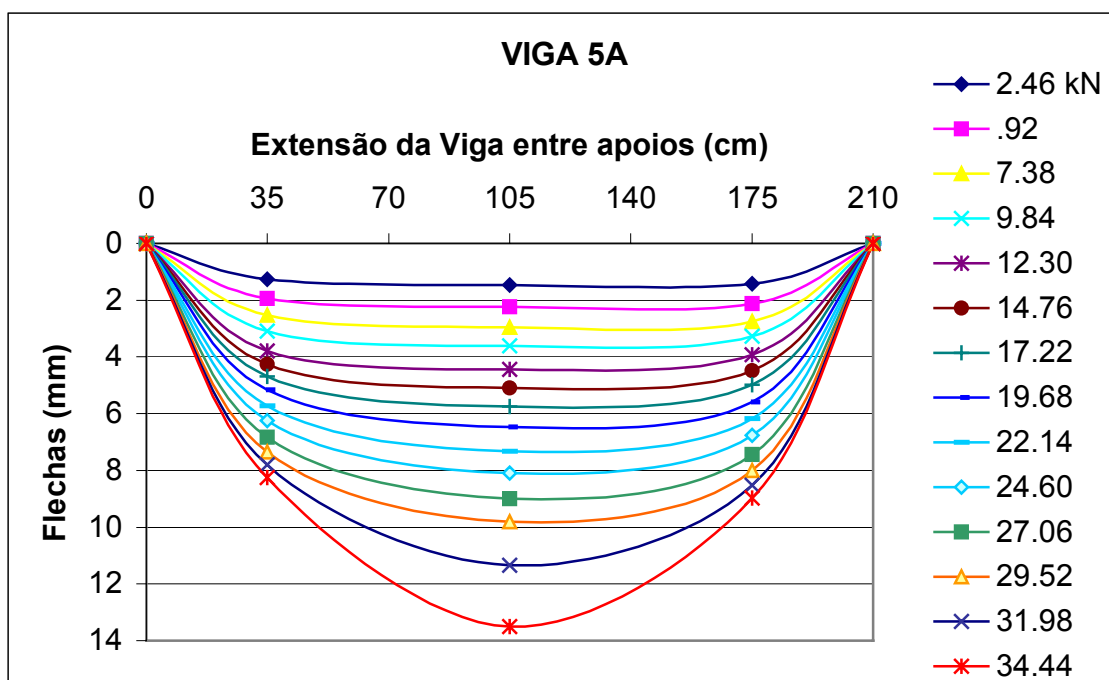


FIGURA 4.15 - Gráfico da configuração deformada da viga 5A

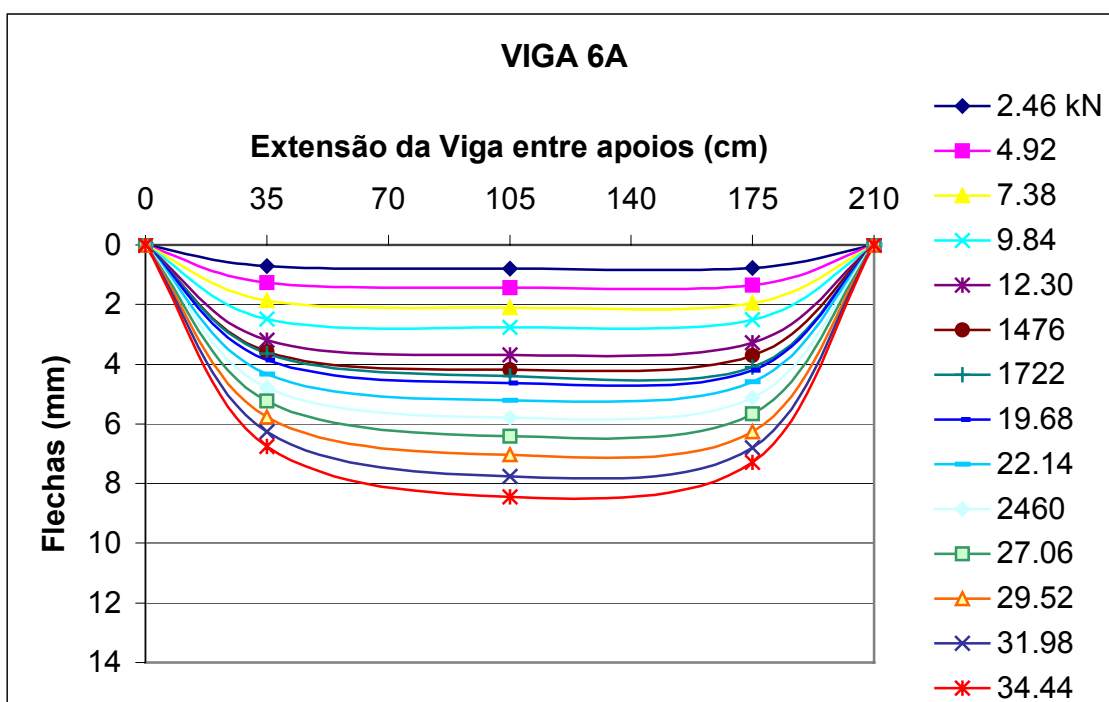


FIGURA 4.16 - Gráfico da configuração deformada da viga 6A

4.4.1.2 –Vigas Tipos “M” e “MA”

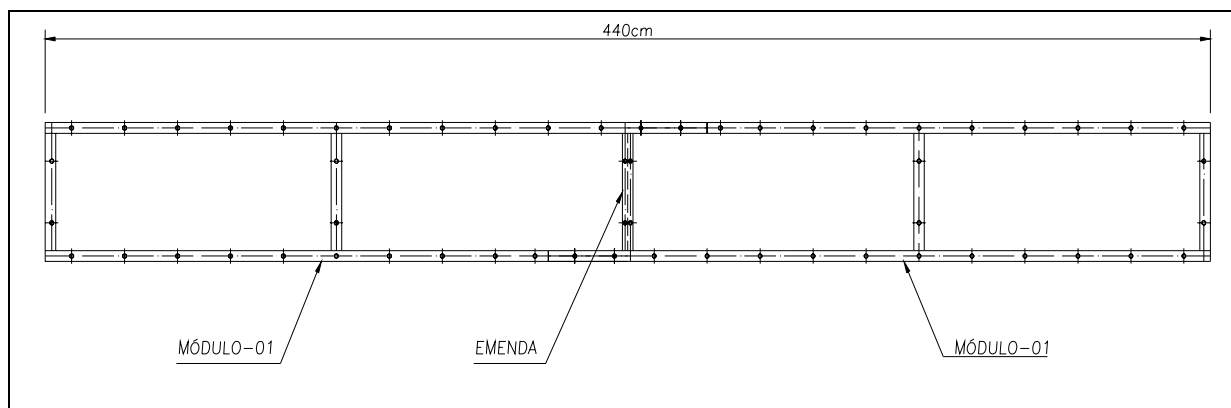
Cada uma das 6 vigas dos tipos “M” e “MA” eram compostas de 8 peças de madeira com seção transversal de 3,5cm x 3,5cm. Dessas 8 peças de madeira, 4 possuíam 250cm de comprimento e 4 peças possuíam 190cm de comprimento, respectivamente. Colocadas de forma intercalada, conforme ilustrado na FIG. 4.17. Essas peças de madeira eram ligadas a 2 chapas de compensado tipo virola, com as dimensões de 1,8cm de espessura por 45cm de altura e 220cm de comprimento.

Os mesmos parafusos e espaçamentos que foram utilizados para as vigas do tipo “A” foram utilizados para os tipos “M” e “MA”. Foi colocado um enrijecedor central de 7 cm de largura de cada lado das vigas do tipo “M” e dois de 3,5 cm de cada lado para os tipos “MA”. Nos dois casos, os enrijecedores foram unidos por pares de parafusos às chapas de compensado.

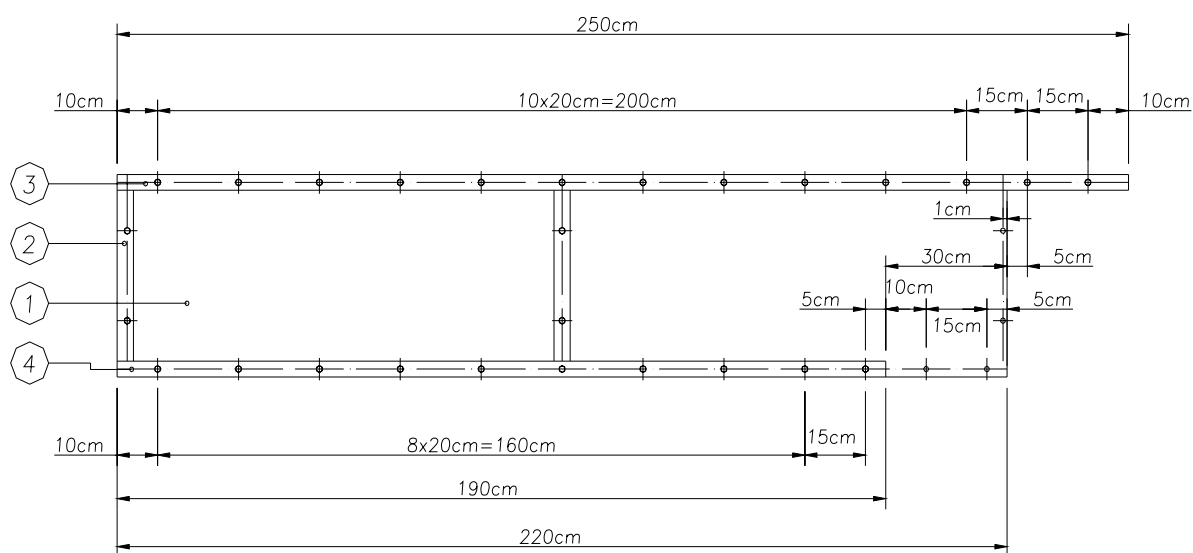
A montagem destes elementos foi feita dentro da marcenaria do LAEES/UFGM. Cada viga do tipo “M” ou “MA” foi montada em duas etapas. Cada etapa constituiu um módulo de 4 peças de madeira e uma de compensado.

Sendo assim, um módulo era montado da seguinte maneira: na parte superior da seção, era colocada uma peça de madeira com 250cm de comprimento do lado direito e a outra peça do lado esquerdo com 190cm de comprimento. Na parte inferior da seção era colocada uma peça de madeira com 190cm de comprimento do lado direito e a outra peça do lado esquerdo com 250cm de comprimento. Desta forma, um módulo era encaixado a outro módulo semelhante, por um transpasse inferior e superior nas peças de madeira formando um modelo de 440 cm de extensão com 8 peças de madeira e 2 peças de compensado (FIG 4.17b).

Vigas 1,2,3,4,5 e 6 TIPO “M” e Vigas 7,8,9,10,11 e12 TIPO “MA”



(a)



(b)

- 1 – Chapa de Compensado de 18 mm (alma da viga)
- 2 – Enrijecedor em madeira
- 3 – Pinos – parafusos de 11 mm
- 4- Peça de madeira de 3,5 x 3,5 cm (mesa da viga)

FIGURA 4.17 –Vigas tipo M e MA

- a)Vista Lateral da viga
- b) Módulo 1- Vista lateral

4.4.1.2.1 – Equipamentos Utilizados

Os mesmos equipamentos utilizados nos ensaios das vigas do tipo “A” foram utilizados para os ensaios das vigas do tipo “M” e “MA”. Da mesma forma, foi colocado um perfil metálico sobre os protótipos para receber a força e transmitir à estrutura em cada terço de seu vão.

Travamentos laterais foram criados de modo a evitar a perda de estabilidade na viga constatada em ensaio destrutivo preliminar. Assim, foram construídos quatro travamentos com peças de madeira. Esses travamentos eram encaixados e apoiados no pórtico de ensaios, conforme ilustrado nas FIG.4.18a e 4.18b.

Ema cada coluna do pórtico, era colocado um travamento na altura da viga a ser ensaiada e em cada ponto de encosto do travamento com a viga foi colocada uma rodinha para que a mesma pudesse se deslocar livremente na direção vertical e ou longitudinal.



FIGURA 4.18 a –Vista Superior do Travamento lateral das Vigas

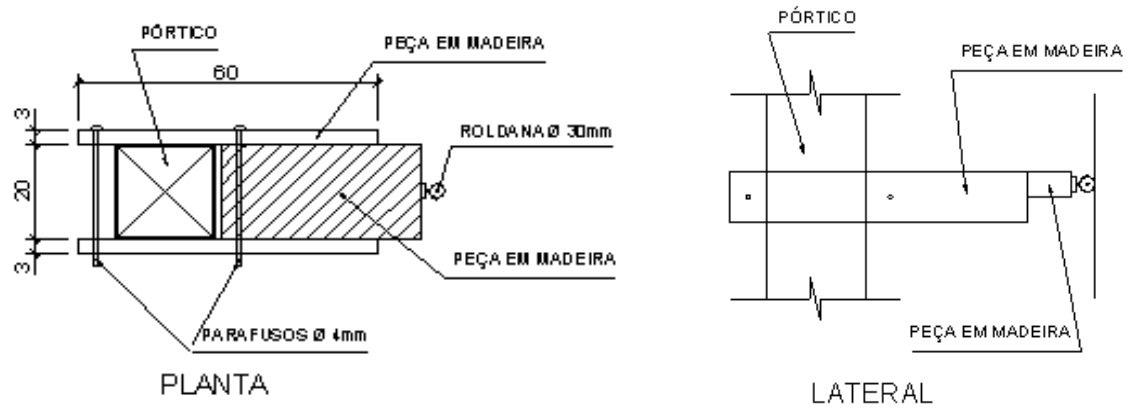


FIGURA 4.18 b—Esquema do travamento lateral

4.4.1.2.2 – Descrição dos ensaios dos protótipos tipo “M” e “MA”

Utilizando-se o mesmo esquema de ensaio das vigas do tipo “A” (FIG. 4.19), o carregamento foi aplicado e as leituras efetuadas até aproximadamente 20kN, em função de ensaio preliminar realizado onde se constatou uma força de ruptura de 35kN.

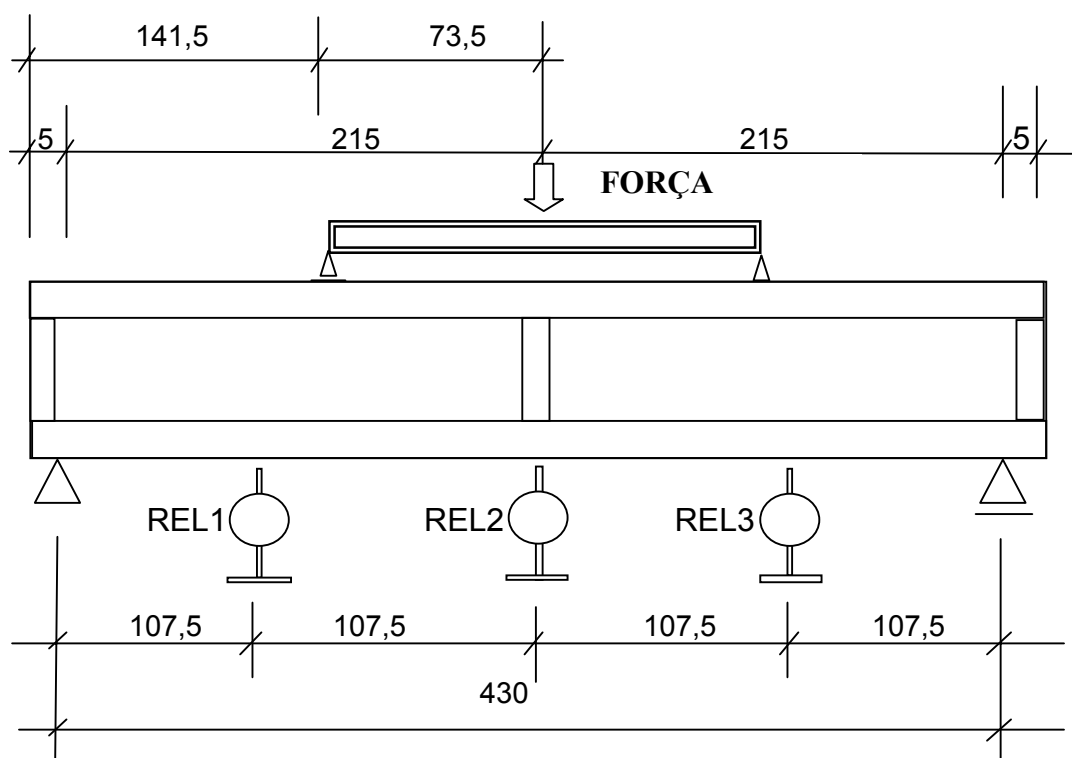


FIGURA 4.19 - Esquema de ensaio das Vigas dos tipos “M” e “MA”
(Medidas em cm)

4.4.1.2.3 – Resultados dos Ensaios das Vigas dos Tipos “M” e “MA”

Os resultados de ensaios de 12 vigas foram traçados em diagramas de configurações deformadas, mostradas nas FIG. 4.20 a 4.32. As vigas 1M, 2M, 4M, 5M, 6M, 8MA, 9MA, sofreram ruptura por tração na alma de compensado, conforme mostrado nas FIG. 4.32 a 4.35. As demais vigas do mesmo tipo, 3M, 7MA, 10MA, 11MA e 12MA perderam a estabilidade na alma não sendo possível continuar os ensaios até a ruptura.

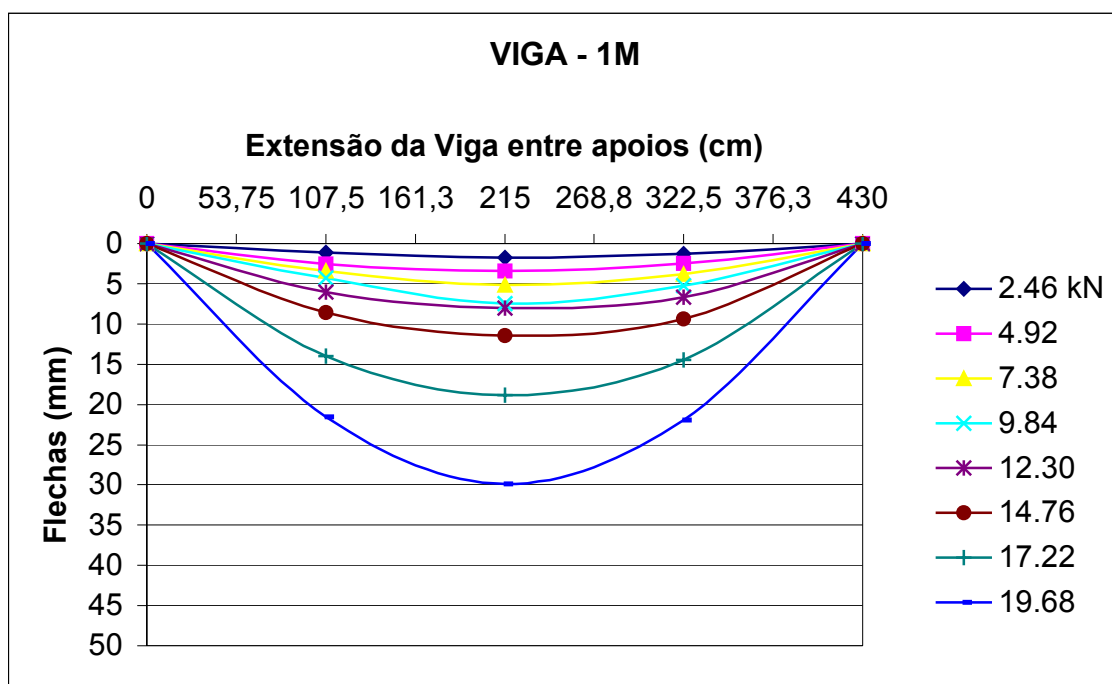


FIGURA 4.20 - Gráfico da configuração deformada da viga 1M

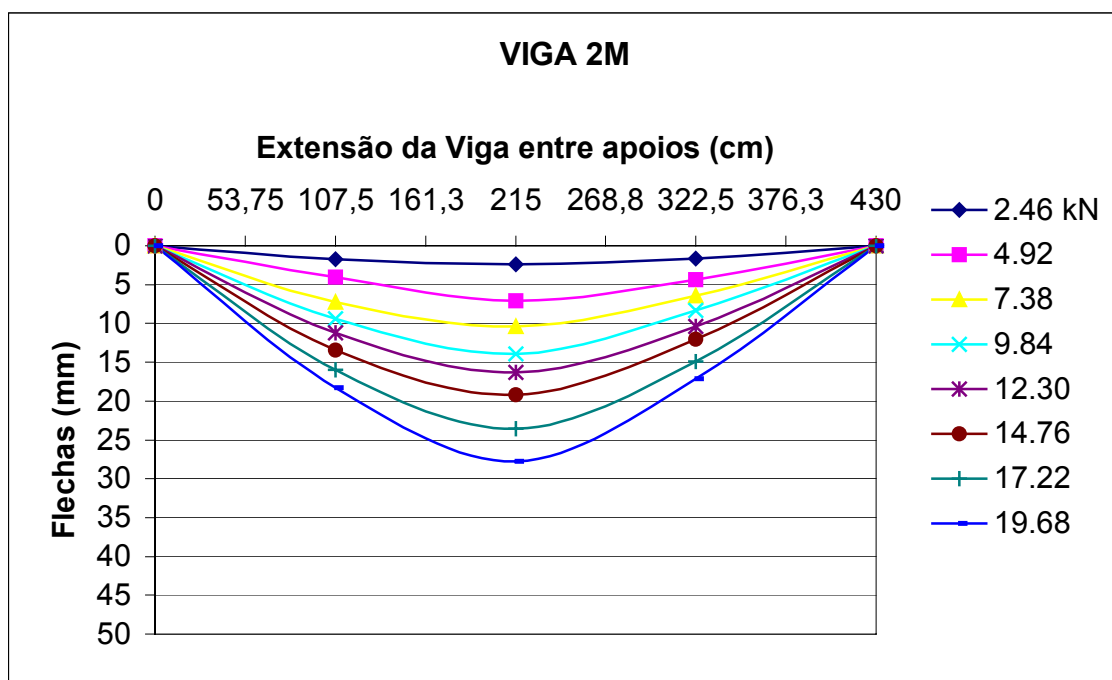


FIGURA 4.21 - Gráfico da configuração deformada da viga 2M

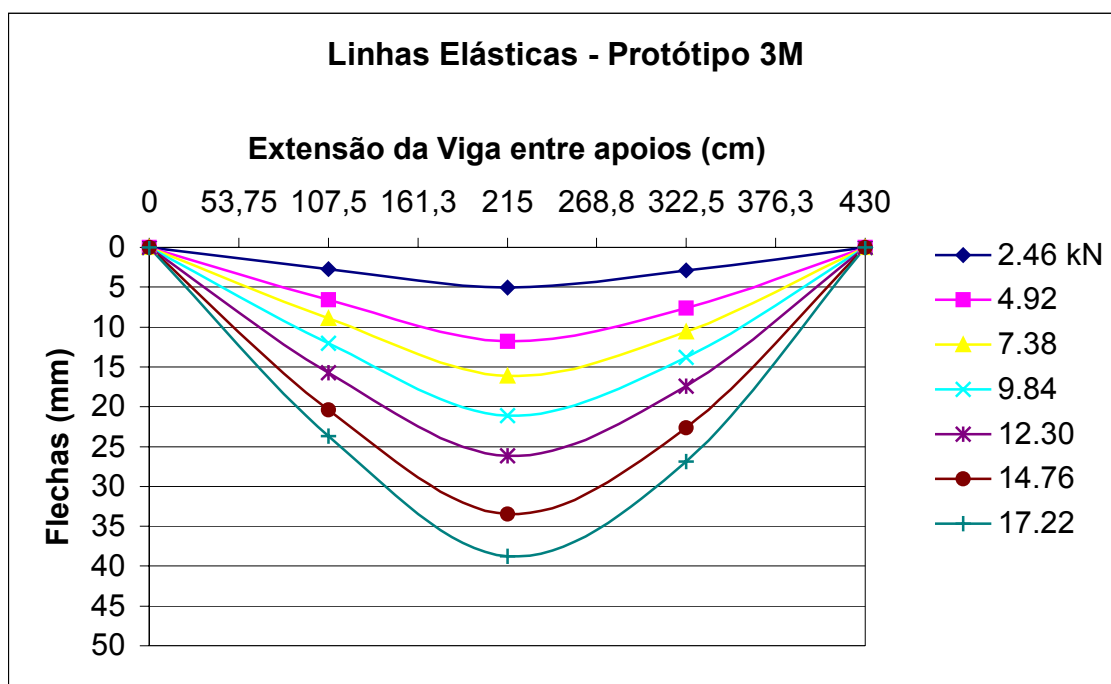


FIGURA 4.22 - Gráfico da configuração deformada da viga 3M

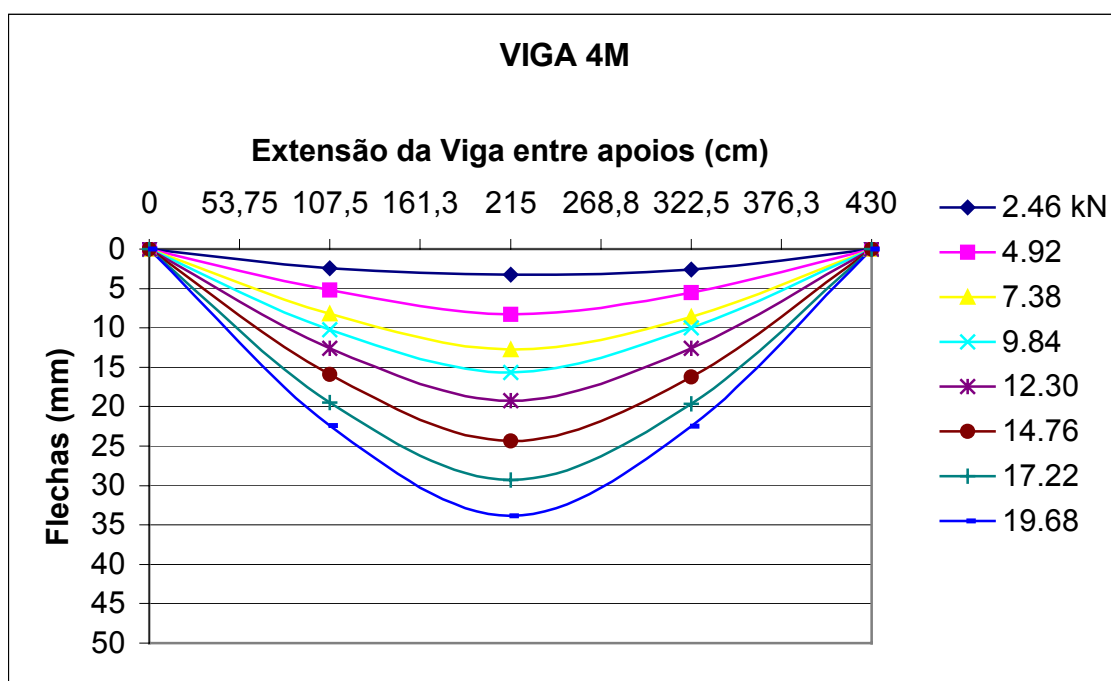


FIGURA 4.23 - Gráfico da configuração deformada da viga 4M

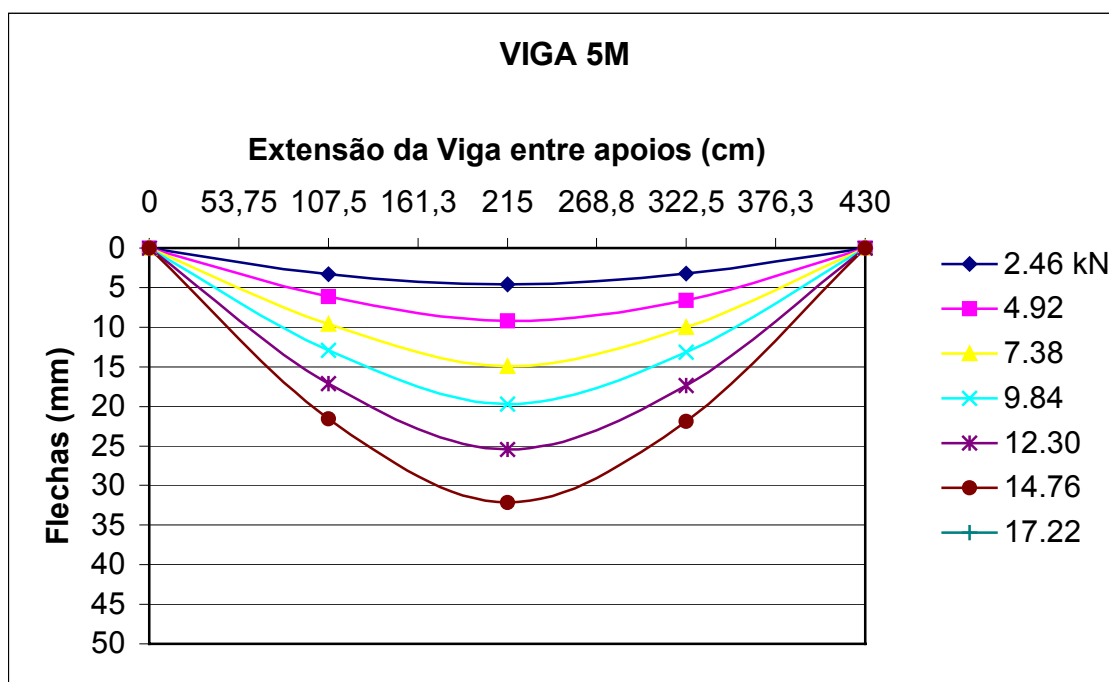


FIGURA 4.24 - Gráfico das elásticas do protótipo 5M

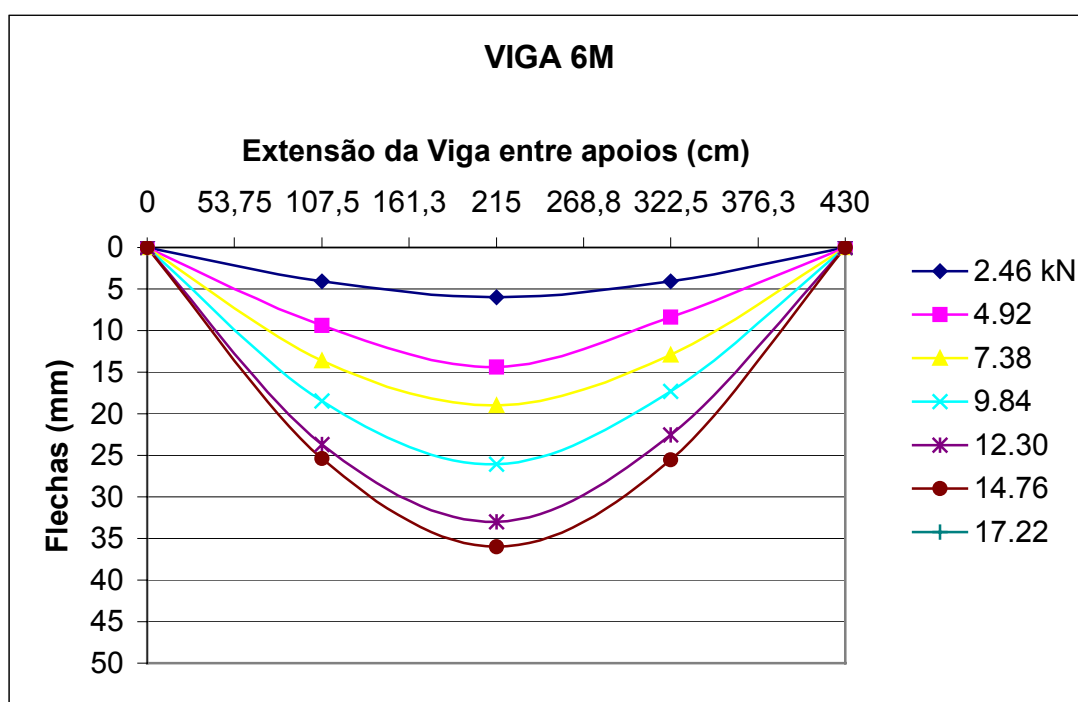


FIGURA 4.25 - Gráfico da configuração deformada da viga 6M

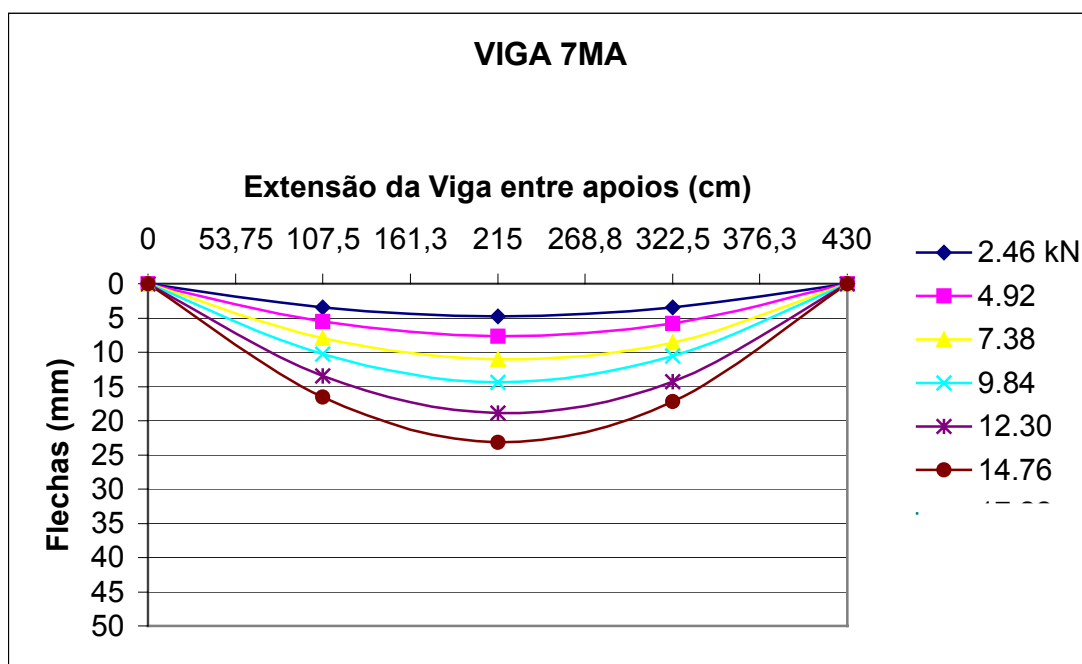


FIGURA 4.26 - Gráfico da configuração deformada da viga 7MA

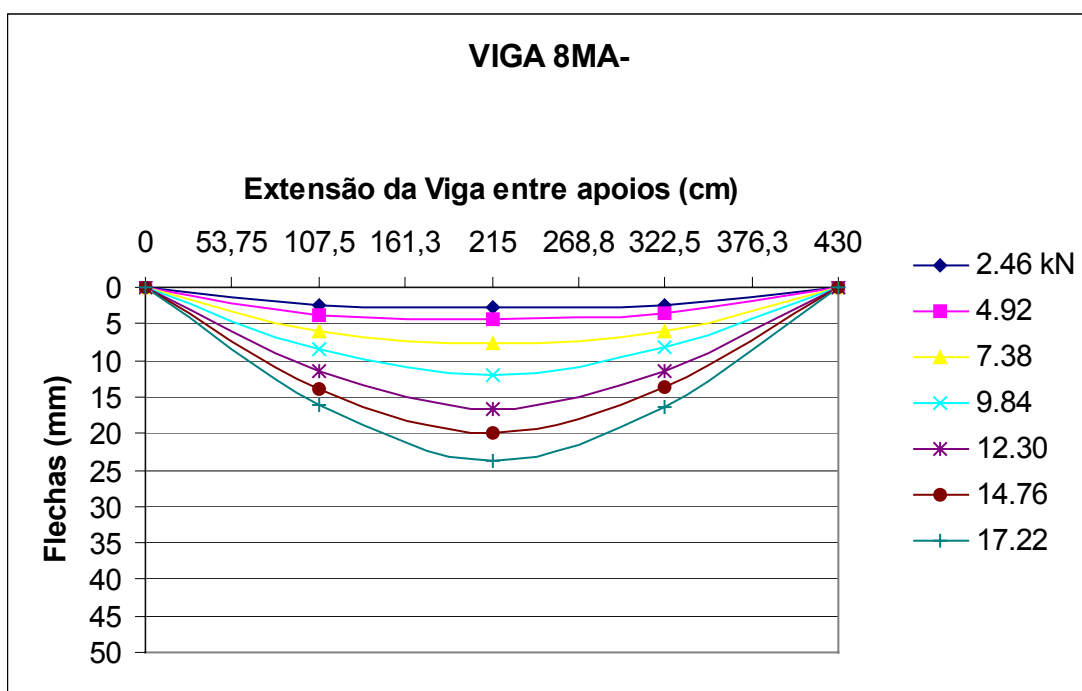


FIGURA 4.27 - Gráfico da configuração deformada da viga 8MA

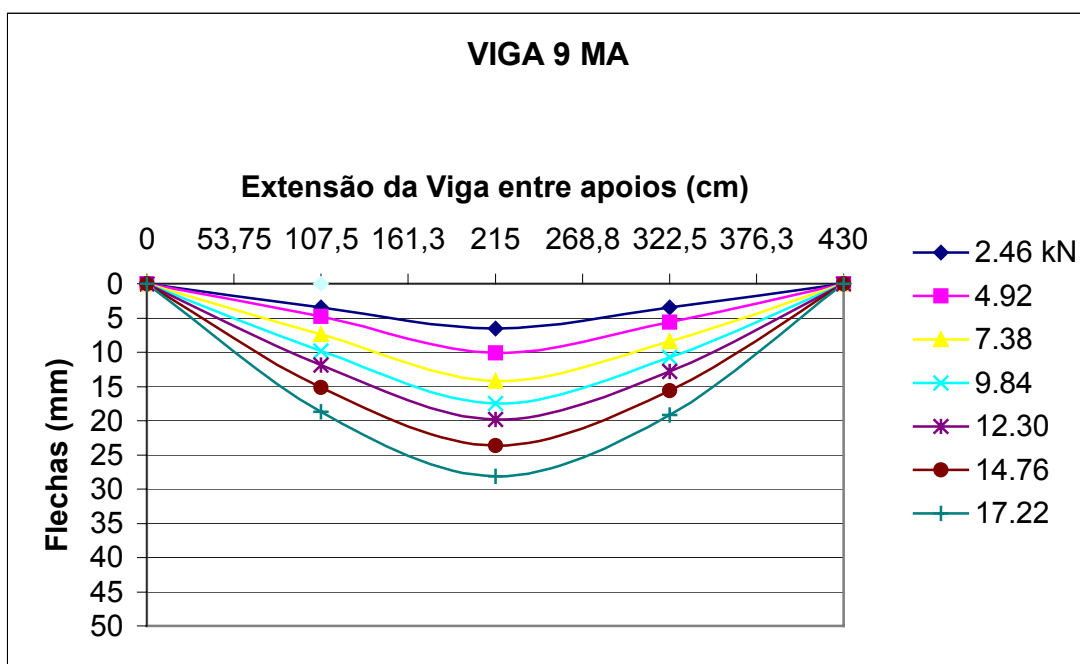


FIGURA 4.28 - Gráfico da configuração deformada da viga 9 MA

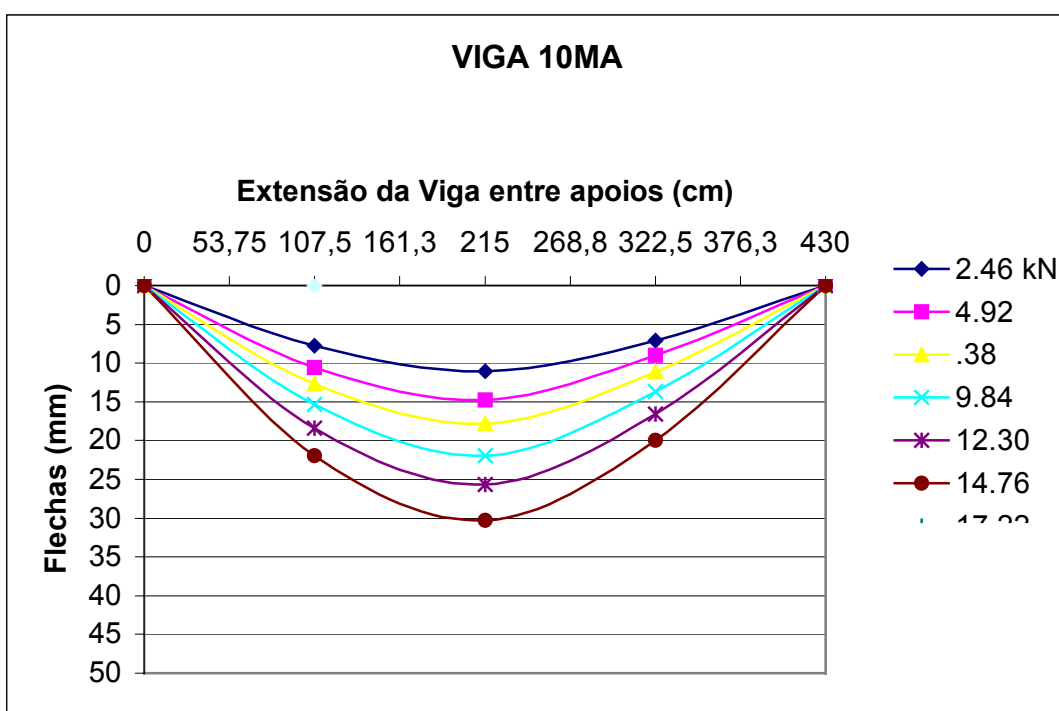


FIGURA 4.29 - Gráfico da configuração deformada da viga 10MA

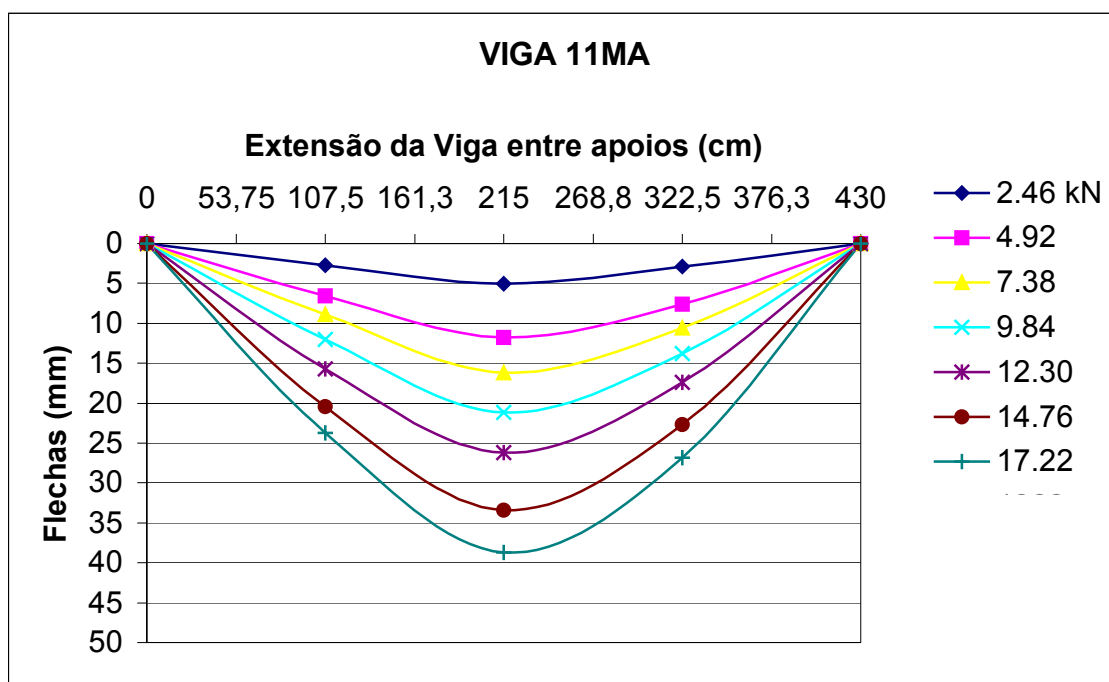


FIGURA 4.30 - Gráfico da configuração deformada da viga 11MA

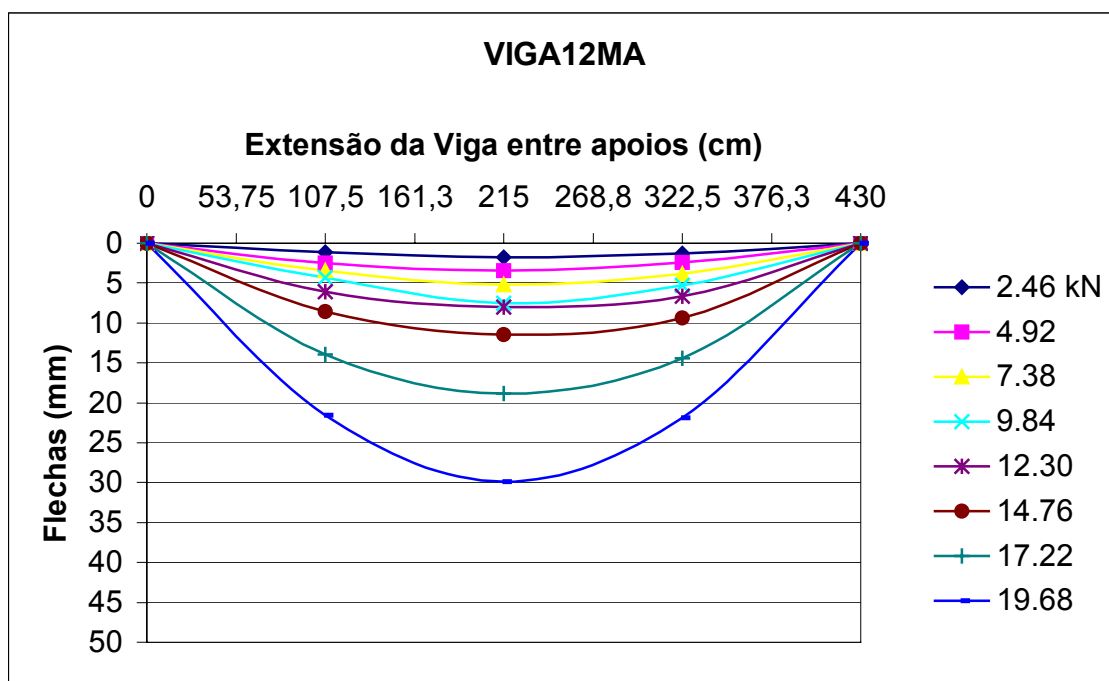


FIGURA 4.31 - Gráfico da configuração deformada da viga 12MA



FIGURA 4.32 –Ruptura característica das vigas tipo "M"



FIGURA 4.33 –Vista de uma viga tipo "M" ensaiada



FIGURA 4.34 – Detalhe da ruptura do compensado

4.4.1.3 – Vigas com emendas parafusadas

Com o objetivo de se ter uma comparação do comportamento das vigas dos tipos “M” e “MA”, ou seja, com transpasse nas peças de madeira e enrijecedor central, foram montadas e ensaiadas vigas com outros tipos de arranjos na região central das mesmas. A princípio optou-se por realizar uma emenda com uma peça de madeira de cada lado da viga com 8 parafusos (VIGA MP8) dispostos como mostra a FIG. 4.35. Para este tipo de viga, as peças de madeira que compõe as mesas foram colocadas com união de topo. Sendo assim, essas vigas eram montadas com dois módulos iguais, compostos de 4

peças de madeira de 3,5cm x 3,5cm x 210cm nas mesas e 2 peças de compensado de 1,8cm x 45cm x 210cm.

A segunda alternativa foi colocar uma emenda com 12 parafusos, protótipo MP12 e deixar as peças de madeira de topo, como na viga anterior, conforme ilustrado na FIG 4.36. Foram executados 6 vigas deste tipo.

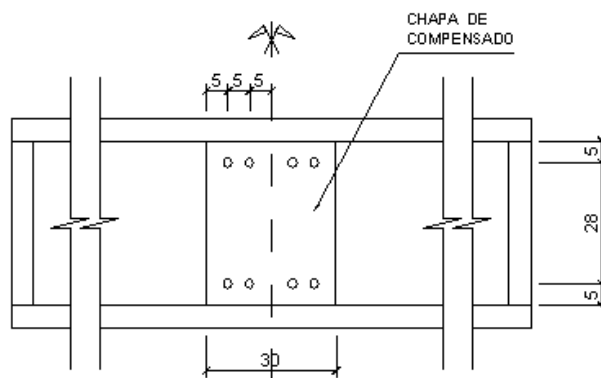


FIGURA 4.35 – Emenda na região central da viga do tipo “MP8”

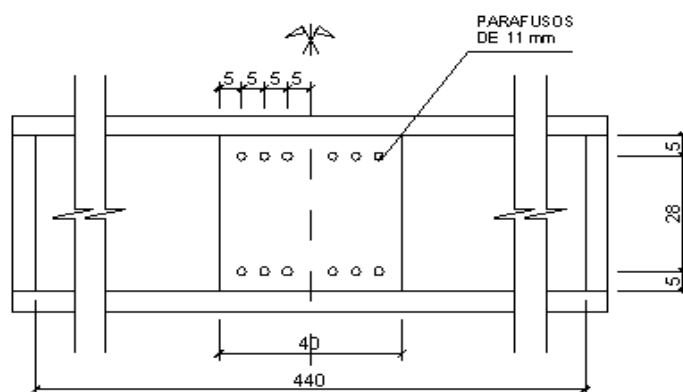


FIGURA 4.36 – Emenda na região central da viga do tipo “MP12”

4.4.1.3.1 – Descrição dos ensaios das vigas com emendas parafusadas

O mesmo arranjo e procedimento de ensaio descrito para os protótipos tipo “M” e “MA” foram utilizados para essas vigas. Os equipamentos também foram os mesmos, incluindo os travamentos laterais. As leituras foram efetuadas a cada 2,46kN.

4.4.1.3.2 – Resultados dos ensaios das vigas com emendas parafusadas

A primeira viga montada do tipo “MP8” deslocou 1,5cm na sua parte central abrindo completamente a madeira na parte inferior (3cm de abertura) com apenas 8,60kN de carregamento, não permitindo nenhum tipo de leitura. Desta forma, verificando a falta de coerência no comportamento mecânico deste tipo de viga, não foram ensaiadas as demais unidades.

A seguir, as 6 vigas do tipo “MP12” foram montadas e ensaiadas. A ruptura foi determinada por meio de ensaio preliminar com 18,45kN de força. As vigas apresentaram deslocamentos conforme apresentado nos diagramas traçados nas FIG. 4.37 a FIG. 4.42.

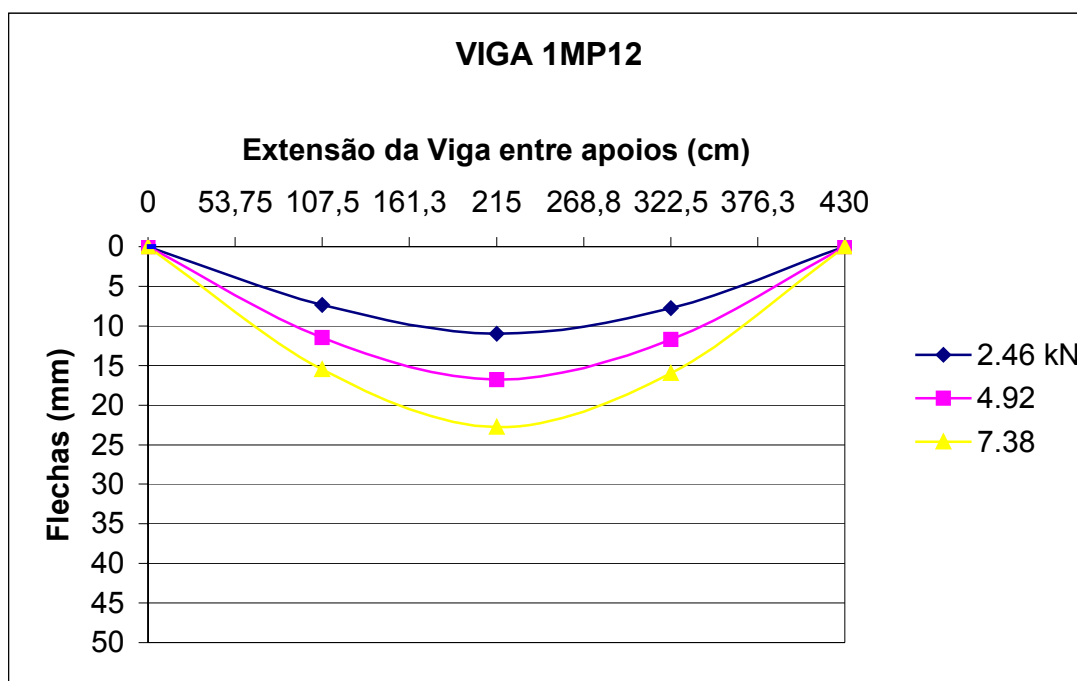


FIGURA 4.37 - Gráfico da configuração deformada da viga 1MP12

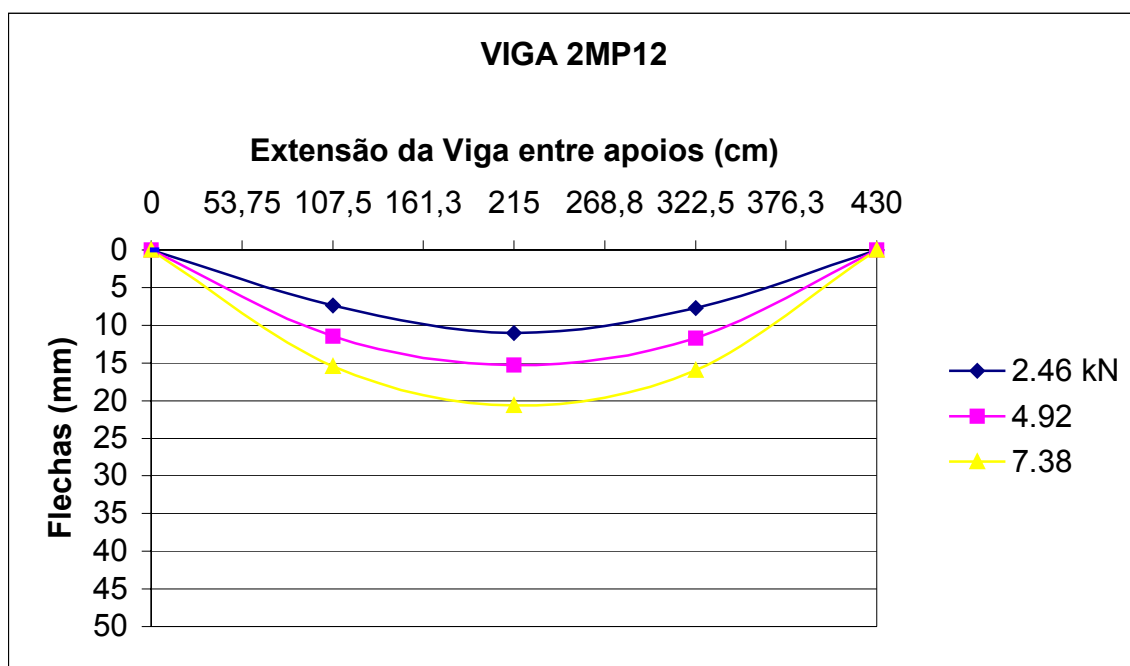


FIGURA 4.38 - Gráfico da configuração deformada da viga 2MP12

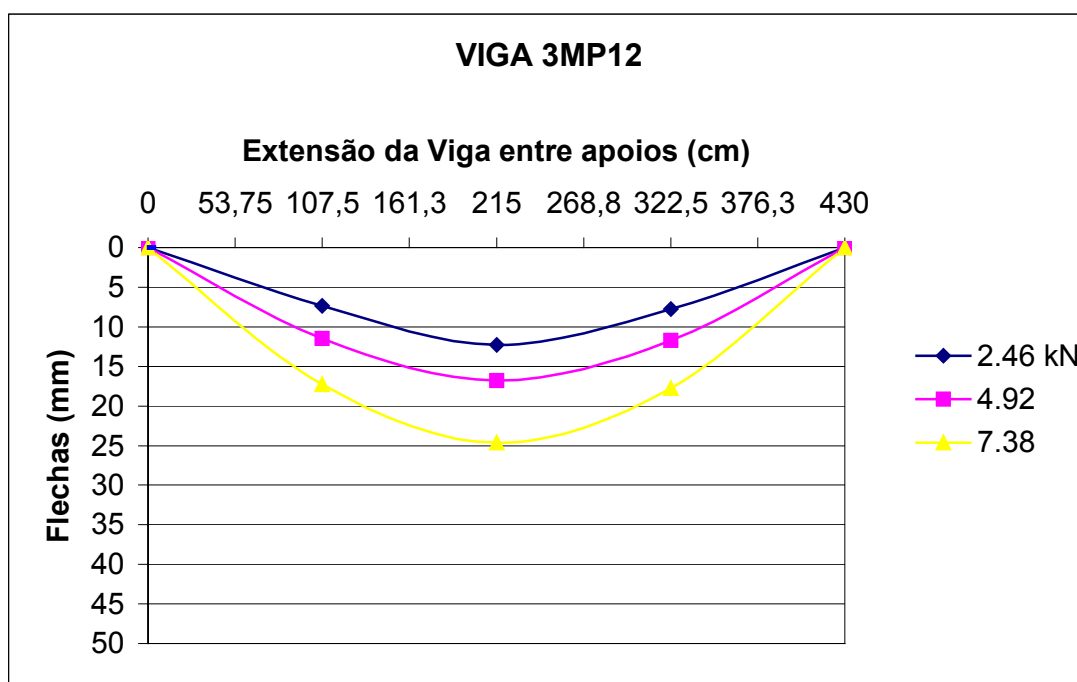


FIGURA 4.39 - Gráfico da configuração deformada da viga 3MP12

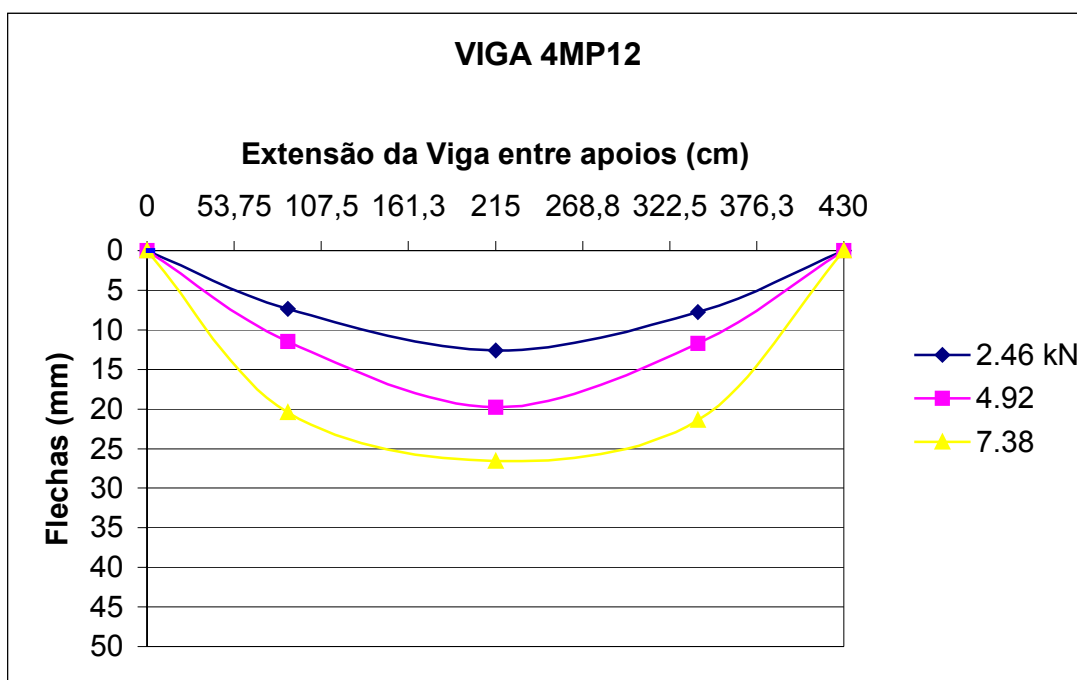


FIGURA 4.40 - Gráfico da configuração deformada da viga 4MP12

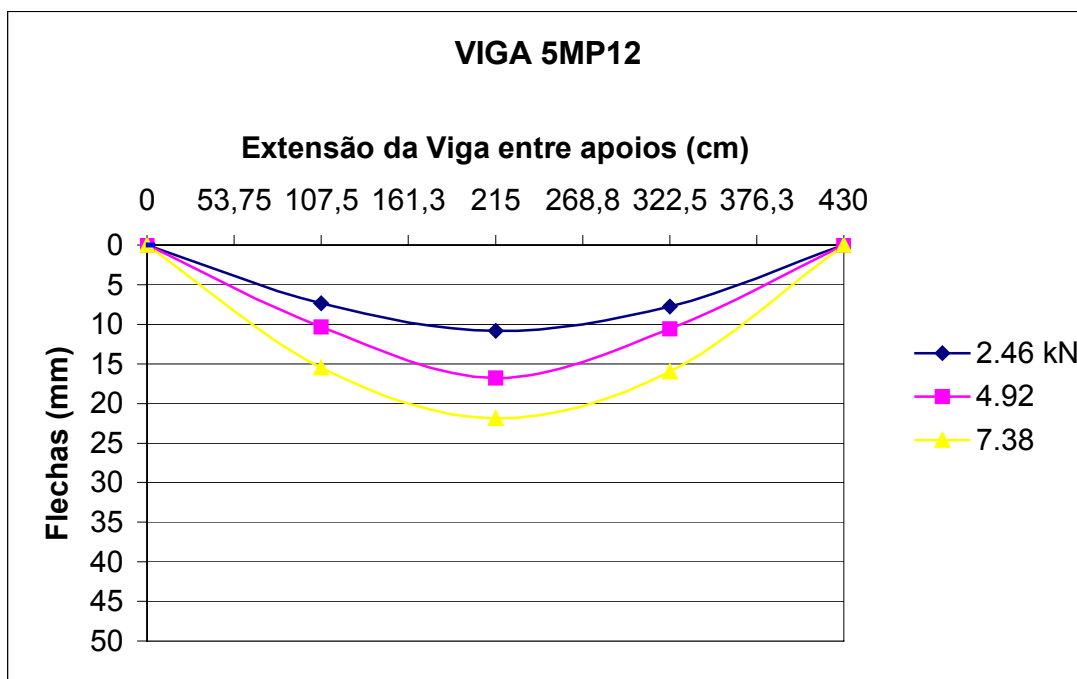


FIGURA 41- Gráfico da configuração deformada da viga 5MP12

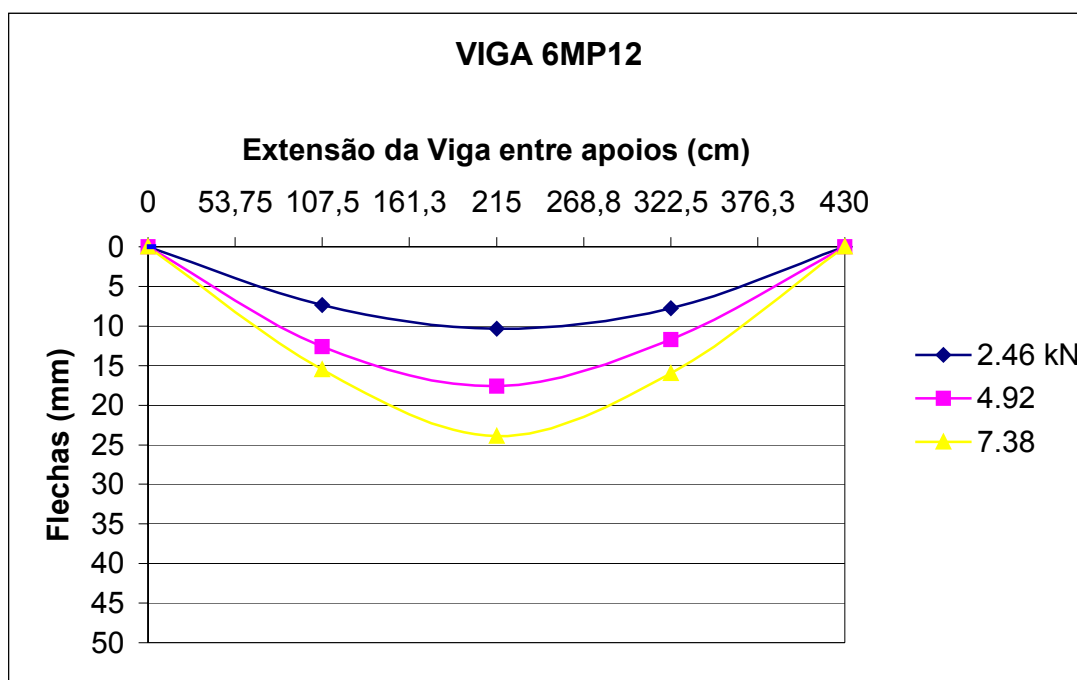


FIGURA 4.42 - Gráfico da configuração deformada da viga 6MP12

4.4.1.4 –Viga MSE

Finalmente, uma outra viga foi criada sem nenhum tipo de intervenção na região central, mantendo as peças de madeira transpassadas da forma que inicialmente havia sido definida nos protótipos dos tipos “M” e “MA”. Esse ensaio teve como objetivo o conhecimento do comportamento da região central das vigas médias (440cm) eliminando qualquer tipo de intervenção nesta região. Esse elemento estrutural foi denominado Viga 1MSE.

Com o mesmo esquema de ensaio das vigas anteriores, este modelo sofreu carregamento em cada terço de seu vão e apresentou um comportamento similar aos demais.

4.4.1.4.1 –Resultado do ensaio da viga 1MSE

Apesar do comportamento desta viga ter sido semelhante aos dos demais, a não existência dos enrijecedores na região central influenciou na ruptura, pois a viga perdeu a estabilidade lateral com apenas 20kN, interrompendo-se assim as leituras dos deslocamentos. A FIG. 4.43 apresenta as leituras de deslocamentos desta viga.

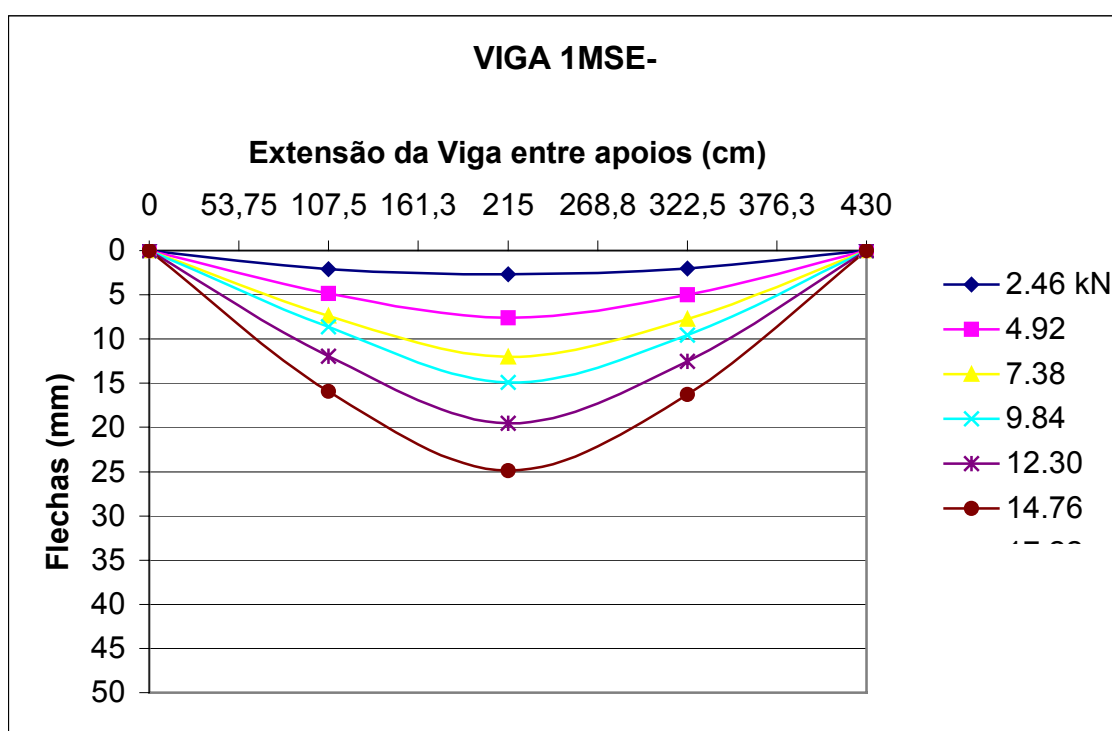


FIGURA 4.43 - Gráfico da configuração deformada da viga 1MSE

4.4.2 - Determinação do diagrama de deformações longitudinais das VCMC

Com o objetivo de se obter o diagrama de deformações longitudinais das VCMC, foram realizados ensaios experimentais em duas vigas: “11MA” e “12MA”. Essas vigas foram instrumentadas para obtenção dos deslocamentos verticais e deformações longitudinais.

4.4.2.1 – Aparelhos utilizados

- Para análise de deformações nas vigas compostas, as duas vigas foram instrumentadas com extensômetros elétricos de resistência e medidores de deslocamentos.

Os mesmos aparelhos e metodologia dos ensaios anteriores foram utilizados. Além desses, os seguintes instrumentos foram incluídos:

- Três transdutores de deslocamento (DT's) fabricados pela kyowa conforme ilustrado na FIG.4.44. Os transdutores de deslocamento foram colocados nas mesmas posições que os relógios comparadores das demais vigas: um na região central e um a cada terço de vão da viga.



FIGURA 4.44 –Transdutor de deslocamentos -

os mesmos aparelhos e metodologia dos ensaios anteriores foram utilizados. Além desses, os seguintes instrumentos foram incluídos:

- Três transdutores de deslocamento (DT's) fabricados pela kyowa conforme ilustrado na FIG.4.44. Os transdutores de deslocamento foram colocados nas mesmas posições que os relógios comparadores das demais vigas: um na região central e um a cada terço de vão da viga.

- Dez extensômetros elétricos tipo KFG-5-120-C1-11 dispostos de acordo com o esquema da FIG. 4.45 e 4.46. Os extensômetros com fator “Gage” de 2.12 foram colocados e enumerados, contando da parte superior para a inferior da seção transversal localizada a 15cm da região central da viga.

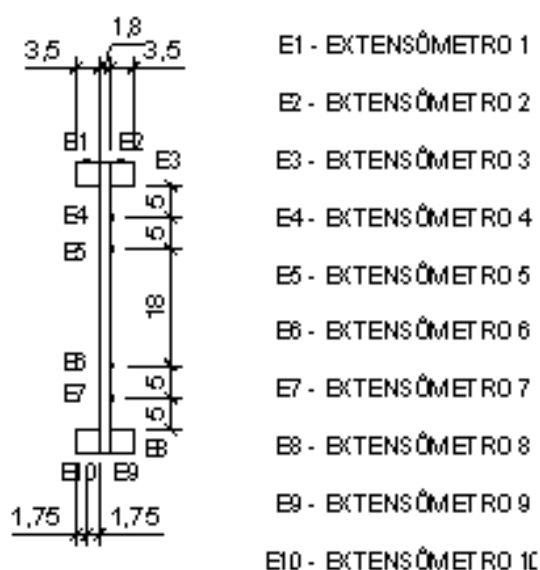


FIGURA 4.45 - Esquema de posicionamento dos extensômetros

O sistema de aquisição de dados utilizado foi o ADS 2000 do LAEES, com o auxílio do programa AqDados, instalado com o sistema de 32 canais.



FIGURA 4.46 – Posicionamento dos extensômetros elétricos

4.4.2.2 – Descrição dos Ensaios

Após a colocação de cada viga em posição de ensaio, os extensômetros foram colados, mediante adequada preparação da superfície e seguindo as técnicas de colagem recomendadas pelo fabricante. Após 24 horas foi dada continuidade à preparação do ensaio.

Como o sistema conta com 32 canais, foram utilizados 10 canais para os extensômetros e 3 canais para os DT's que mediram os deslocamentos. Para que os fios dos sensores sejam conectados ao sistema, cada canal possui um conector de entrada composto por quatro pontos de alojamento. Estes pontos

recebem os sinais positivo, negativo e de excitação dos sensores. Os extensômetros foram ligados em circuitos de $\frac{1}{4}$ de ponte Wheatstone e os DT's em circuitos de ponte completa.

Após a calibração de todos os instrumentos iniciou-se o ensaio onde o carregamento foi aplicado até 15kN com a leitura das deformações e deslocamentos feitas pelo programa.

Para o segundo ensaio, com a viga 12MA, optou-se por eliminar os extensômetros 2 e 9, pois os resultados são semelhantes aos extensômetros 1 e 10 respectivamente. As deformações das vigas 11MA e 12 MA podem ser vistas nas ilustrações 4.47, 4.50 respectivamente.

4.3.2.3 – Resultados

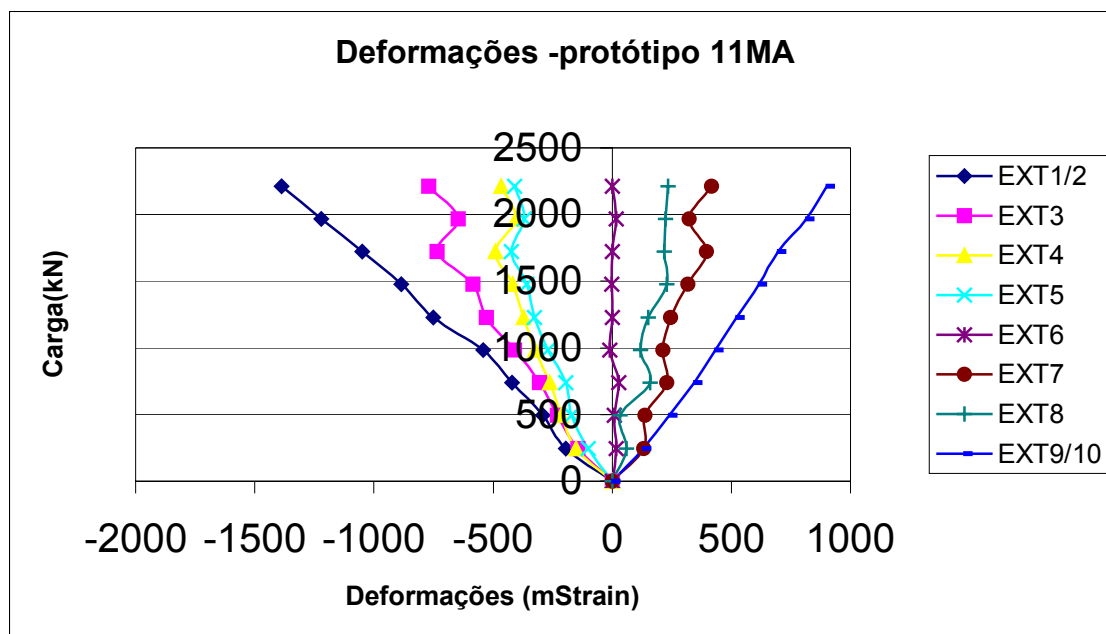


FIGURA 4.49 – Gráficos de deformação da viga 11MA

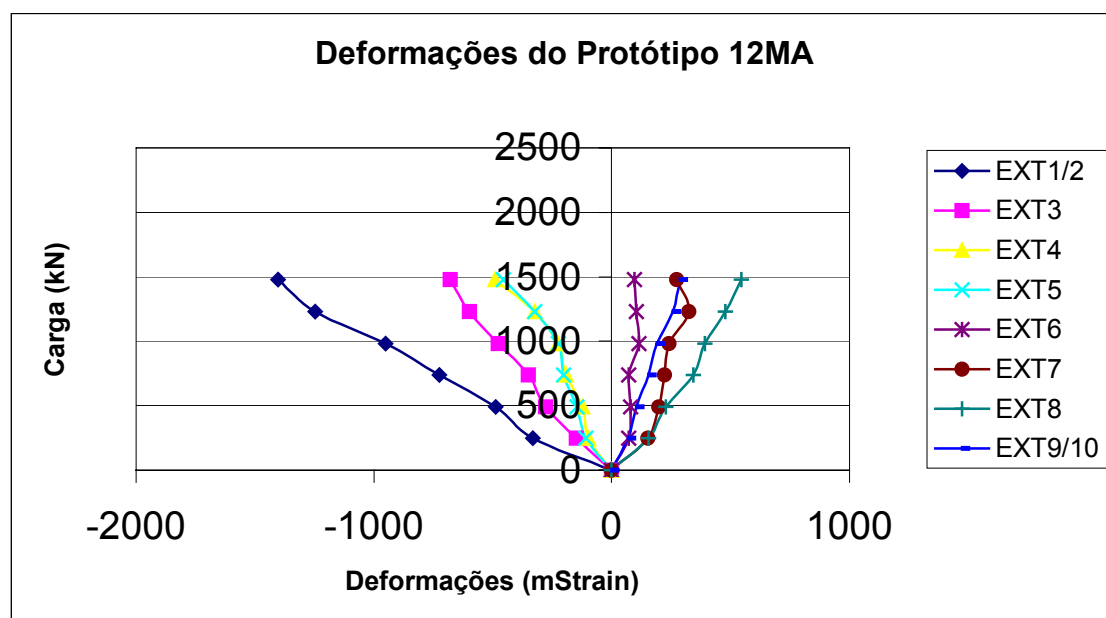


FIGURA 4.50 – Gráficos de deformação da viga 12MA

4.5 –Conclusões Preliminares

Analizando-se os ensaios realizados assim como os resultados obtidos, pôde-se concluir:

- entre os três tipos de compensado analisados, o compensado de virola (espessura 18mm) foi considerado o mais adequado para execução das VCMC. Esta consideração foi fundamentada pelo fato deste ter apresentado mais facilidade para ser manuseado durante a montagem dos corpos-de-prova, para ensaios de caracterização. Outro parâmetro considerado foi resistência mecânica, próxima à do compensado naval, além de seu custo comprovadamente inferior em relação ao mesmo;
- de todas as vigas submetidas a ensaio -vãos de 4,40m-, a que apresentou maior facilidade de execução é a do tipo “MA”. Além disso, esse tipo e viga apresentou resultados de deslocamentos verticais aproximados aos resultados dos tipos “M” e menores que os tipos parafusados (MP8 e MP12)
- deve-se ressaltar é a grande variabilidade nos deslocamentos ocorridos para uma mesma solicitação nas vigas. Esse fato pode ser explicado pela heterogeneidade dos materiais (madeira e compensado), e pela variação da folga existente na pré-furação realizada para a colocação dos elementos de ligação alma/mesas.

Essas conclusões aqui apresentadas justificam a escolha da VCMC tipo “MA” com compensado virola de 18mm para a simulação numérica apresentada no capítulo 5.

5

ANÁLISE NUMÉRICA DAS VIGAS COMPOSTAS

5.1 – Introdução

A análise numérica foi realizada posteriormente aos ensaios e foram utilizados os resultados obtidos das análises experimentais para nortear a modelagem. Os critérios, assim obtidos e aqui adotados, compatibilizando os ensaios com a modelagem numérica poderão, no futuro, balizar outros ensaios e outras análises numéricas. A realidade física das vigas compostas apresenta, a princípio, incertezas quanto ao comportamento e variáveis desconhecidas como, por exemplo:

- propriedades elasto-plásticas ortotrópicas dos materiais;
- ovalização dos furos circulares no compensado;
- influência do torque, aplicado nos parafusos, no atrito gerado entre a madeira e a cabeça dos parafusos e porcas;
- influência da folga existente na furação;
- desconhecimento “a priori” das regiões nas quais a conexão parafusada pode ser considerada rígida, semi-rígida ou simplesmente desconectada.

5.2- Considerações sobre o programa ANSYS

A Swanson Analysis System Inc, empresa norte-americana, atualmente denominada ANSYS Inc., desenvolveu o programa ANSYS para análise numérica através do Método dos Elementos Finitos. Esse programa pode solucionar vários tipos de problemas em áreas distintas, como: térmicos, acústicos, eletromagnéticos, fluido-dinâmicos, bem como sistemas estruturais e, ainda, a interação desses. Apresenta uma grande variedade de opções em termos de elementos, modelagem de materiais, recursos numéricos e de pós-processamento.

Para sistemas estruturais, este programa possibilita abordagens (linear e não linear) tanto físicas quanto geométricas; análises estática e dinâmica; estabilidade e outras. É possível trabalhar com materiais isotrópicos, ortotrópicos e anisotrópicos. O ANSYS possui ainda uma vasta biblioteca de elementos finitos, que podem ser classificados segundo os seguintes tipos:

- pontuais: elementos de massa 2-D e 3-D;
- linhas: elementos de barra, cabo, mola, amortecedor, tubos e contato 2-D;
- planos: elementos de estado plano de tensão, deformação, axissimétrico, membrana e contato 3-D;
- espaciais: elementos de casca e sólidos.

O programa disponibiliza também, para o usuário, uma interface gráfica auto-explicativa, que auxilia nas fases de pré e pós-processamento dos modelos. A rapidez e a eficácia das soluções numéricas assumem um aspecto relevante a ser considerado na escolha da utilização deste programa.

Como desvantagem do programa, para analisar estaticamente um problema, GENDRON (1997) ressalta o espaço exagerado em disco que ele ocupa. Comenta, também, as facilidades encontradas em sua utilização assim como a necessidade do conhecimento específico sobre elementos finitos para

manuseá-lo e para obtenção de resultados satisfatórios. Também POOLE et al. (2001) detalham as inovações do programa, ao longo de seus 30 anos de história, relacionadas aos métodos de soluções de sistemas de equações.

5.2.1- Modelos Constitutivos

Os diversos modelos constitutivos disponíveis permitem a simulação do comportamento dos materiais dúteis e frágeis tais como: metal, concreto, madeira, solos e rochas, entre outros.

Visando à simulação do comportamento de um material em um modelo de elementos finitos, o ANSYS dispõe de vasta possibilidade de opções de modelos constitutivos lineares e não lineares, e até permite que, em certos casos, seja realizada uma combinação destes para a representação de um determinado material.

5.2.2 – Análise numérica

O programa ANSYS, segundo QUEIROZ (2003), tem capacidade de utilizar vários tipos de análise, destacando-se:

- estática com pequenos deslocamentos e/ou deformações – análise estática linear;
- estática com grandes deslocamentos e/ou deformações e/ou contatos – análise estática não-linear;
- dinâmica com pequenos deslocamentos e/ou deformações – análise dinâmica linear (transiente e harmônica);
- dinâmica com grandes deslocamentos e/ou deformações e/ou contatos – análise dinâmica não-linear (transiente e harmônica).

Deve-se aplicar a solicitação (forças, deslocamentos, rotações, pressões e temperaturas) lentamente, para análises não-lineares, a fim de que para tal, o programa permita a definição de vários eventos de solicitação (*load step*),

assim como o número de sub-incrementos de solicitação (*substeps*) e iterações de equilíbrio dentro de cada evento.

O programa possibilita a escolha do modo de resolução do sistema de equações não lineares, que pode ser baseada em métodos diretos ou iterativos. Várias “ferramentas” numéricas conhecidas como *line search* (usado com o método de Newton-Raphson), *adaptive descent* (usado com o método de Newton-Raphson pleno) bem como o método do comprimento do arco são outros recursos disponíveis para a solução de problemas não lineares facilitando a convergência numérica. A adequação da escolha dessas “ferramentas”, de forma isolada ou combinada, depende da natureza física de cada problema.

Os critérios de convergência numérica, podem ser fundamentados em critérios de força, momentos, deslocamentos ou rotações por meio da comparação entre o valor de referência multiplicado por uma tolerância e pela norma do vetor de resíduos desequilibrados do modelo estudado.

Para a verificação de convergência, podem ser utilizadas: a norma que realiza, separadamente, a verificação de cada grau de liberdade do modelo; a norma consistente na soma dos valores absolutos dos resíduos, além da correspondente à raiz quadrada da soma dos quadrados dos resíduos. O ANSYS executa iterações de equilíbrio até que o critério de convergência seja satisfeito em um substep, ou até que o número máximo de iterações acumuladas pré-estabelecido seja alcançado. Portanto, para a obtenção de um resultado incremental eficiente, torna-se fundamentalmente importante a escolha de um critério de convergência adequado para finalizar as iterações de equilíbrio.

Na fase de pós processamento, o programa ANSYS permite, além da obtenção da listagem de valores, a visualização, no modelo, dos resultados relativos às distribuições de tensões, assim como os deslocamentos e deformações para cada evento de carga. Desse modo, gráficos “tensão x deformação” e “força x

deslocamento” podem ser traçados. Desta forma, a análise desses gráficos permite observar o processo de convergência. Também é possível a visualização dos resultados em sistemas de coordenadas do tipo cartesiano, cilíndrico ou esférico. No que diz respeito aos recursos oferecidos pelo programa, esses são apenas alguns exemplos.

5.3 – Análise numérica das VCMC

Tendo em vista as características geométricas das vigas e dos pinos, para a madeira optou-se pela utilização do elemento hexaédrico elasto-plástico SOLID 45 que permite representar a variação tridimensional dos modelos. A formulação do elemento SOLID 45 é baseada na forma hexaédrica de 8 nós com 3 graus de liberdade de translação cada (U_x , U_y , U_z). As propriedades elásticas do material permitem a simulação de comportamento isotrópico e ortotrópico. Este elemento está implementado com as seguintes características de análise: grandes deslocamentos e/ou deformações, plasticidade, entre outras.

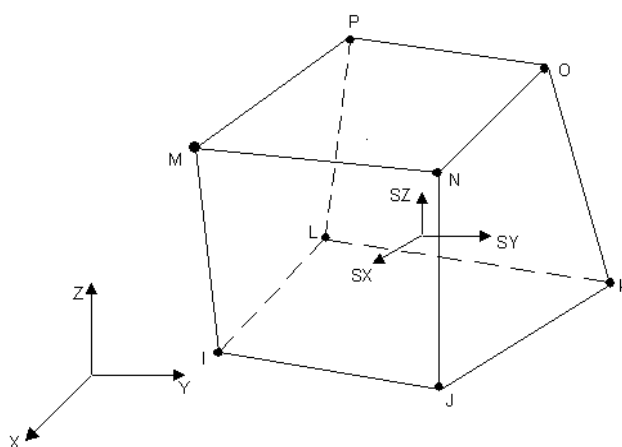


FIGURA 5.1 - Elemento SOLID 45

As vigas dos tipos “A” e “MA” foram modeladas em 3-D utilizando “*keypoints*”, linhas, áreas e volumes, visando a se obter a melhor representação da geometria dos seus componentes, bem como das regiões de ligações parafusadas.

Na interface entre as mesas de madeira e o compensado, foi considerada uma folga de 1 mm de espessura de forma a permitir a ligação nodal, apenas nas regiões parafusadas, simuladas por acoplamentos nodais (“*coupling*”).

O acoplamento nodal é um recurso que permite criar combinações de conjuntos de nós associados aos graus de liberdade (U_x , U_y , U_z) de forma independente. Dessa forma, a cada conjunto criado será assinalado o mesmo deslocamento (U_x , U_y ou U_z) calculado para um nó considerado principal (“*master*”) daquele conjunto. Esse artifício permitiu fazer-se a abstração da ligação parafusada, evitando-se a sua modelagem e ainda simplificando a simulação do contato entre o parafuso, a madeira e o compensado. Para cada ligação parafusada foi seguida a seguinte rotina:

- seleção das superfícies cilíndricas nos furos na madeira e compensado;
- seleção dos nós pertencentes a essas superfícies;
- acoplamento desse conjunto de nós na direção do vão da viga (U_x);
- acoplamento desse conjunto de nós na direção da altura da viga (U_y);
- seleção do sub-conjunto de nós externos correspondentes às regiões da cabeça do parafuso de um lado, e da porca, do outro lado;
- acoplamento desse subconjunto na direção do eixo do parafuso (U_z).

5.3.1- Vigas do tipo “A”

Para as vigas do tipo “A”, os dados de entrada na fase de modelagem são aqueles provenientes do capítulo 4 e podem ser resumidos nos itens a seguir. Os materiais foram por simplificação considerados isotrópicos.

- $E_{co,m} = 26340$ MPa – módulo de elasticidade da madeira;
- $E_{co,m} = 4790$ MPa – módulo de elasticidade do compensado;
- Geometria da seção transversal e vista lateral representadas nas FIG. 4.5a e 4.5b respectivamente;

- Esquema de ensaio e carregamento representados na FIG 4.7.

A TAB. 5.1 quantifica as malhas de elementos finitos resultantes para as vigas do tipo “A”.

TABELA 5.1-Malha de elementos finitos –Vigas Tipo“A”

PROTÓTIPO	NÚMERO DE NÓS	NÚMERO DE ELEMENTOS
A	31827	17856

As FIG. 5.2 e 5.3 representam a modelagem final volumétrica. As diferentes cores estão associadas às propriedades elásticas da madeira, compensado e regiões parafusadas. A fig. 5.4 representa a malha de elementos finitos gerada.

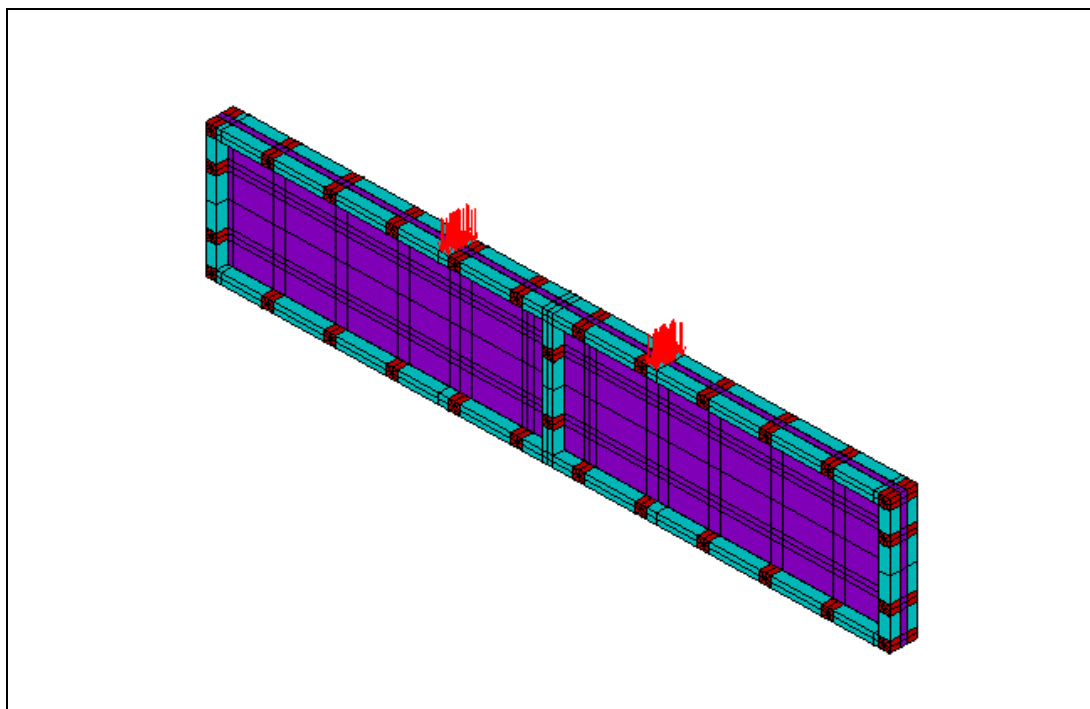


FIGURA 5.2- Modelo 3d – Perspectiva –Viga Tipo “A”

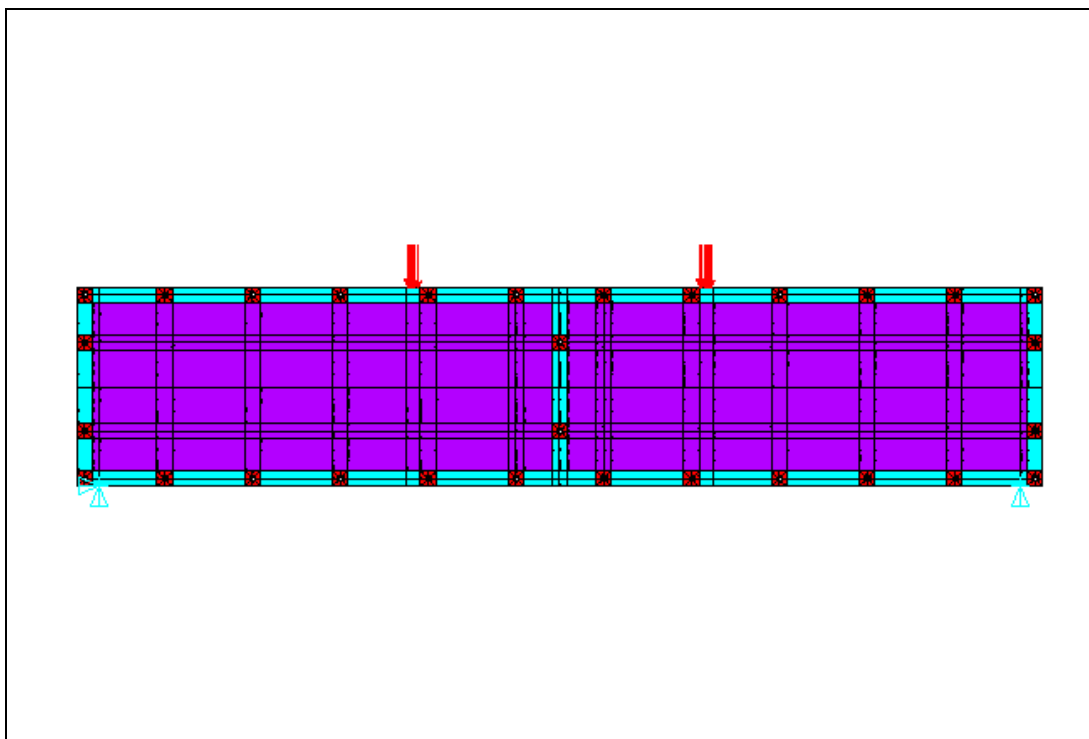


FIGURA 5.3 - Modelo 3d – Vista lateral –Viga Tipo “A”

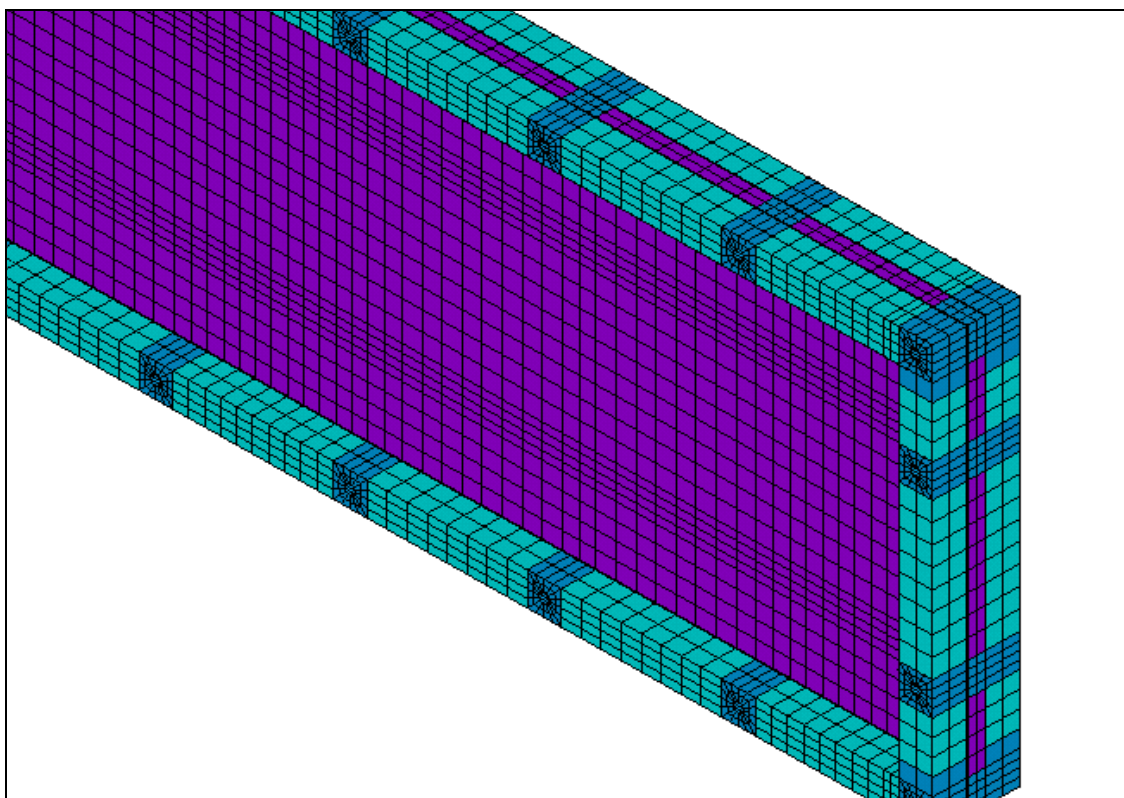


Figura 5.4- Malha de elementos finitos - Detalhe

5.3.1.1 - Resultados da análise numérica das vigas do tipo “A”

Os gráficos $P \times UY$ ilustram a variação da solicitação $P(kN)$ em função dos respectivos deslocamentos verticais UY (mm) na região central das vigas obtidos nos ensaios.

A viga tipo “A” apresentou um comportamento tipicamente linear até o limite do ensaio (36,90kN). Mesmo assim, é de se esperar que haja deslocamentos relativos entre os parafusos e a madeira, o que não garante que as ligações sejam perfeitamente rígidas. Foi considerado, nesse caso, que apenas as regiões de contato entre as mesas de madeira e as extremidades dos parafusos são solidárias. A linearidade do comportamento da viga tipo “A” considerada na análise é representada na FIG 5.5.

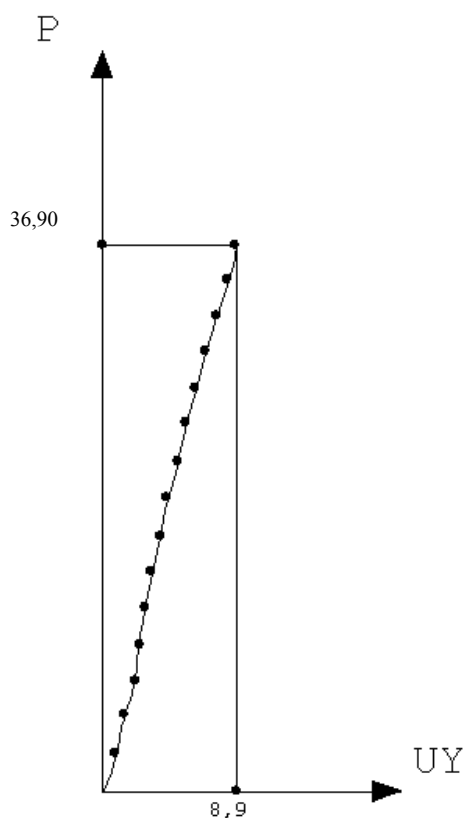


FIGURA 5.5- VIGA Tipo “A” – Diagrama P (kN) x UY (mm)

A FIG. 5.6 mostra a deformada global do modelo para uma solicitação de 36,90kN, que foi o limite adotado. Já as FIG. 5.7 e 5.8 mostram, respectivamente, para esse mesmo valor de solicitação, a variação do deslocamento vertical e da tensão normal.

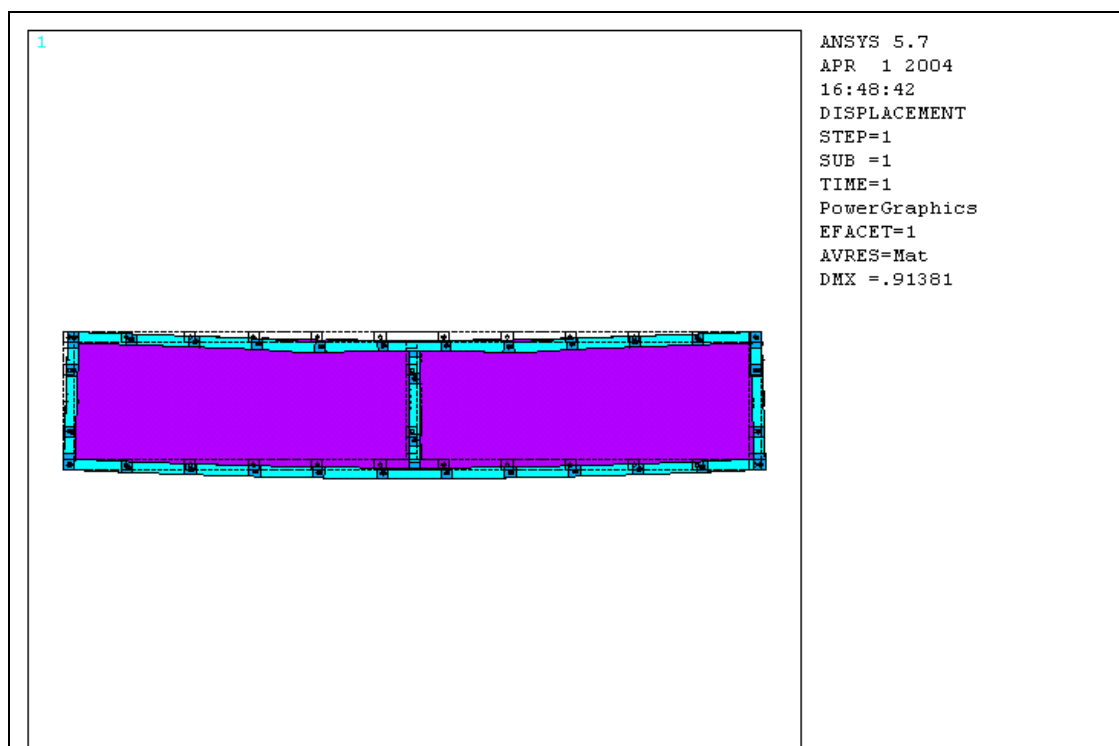


FIGURA 5.6 - Deformada global – $P = 36,90\text{kN}$

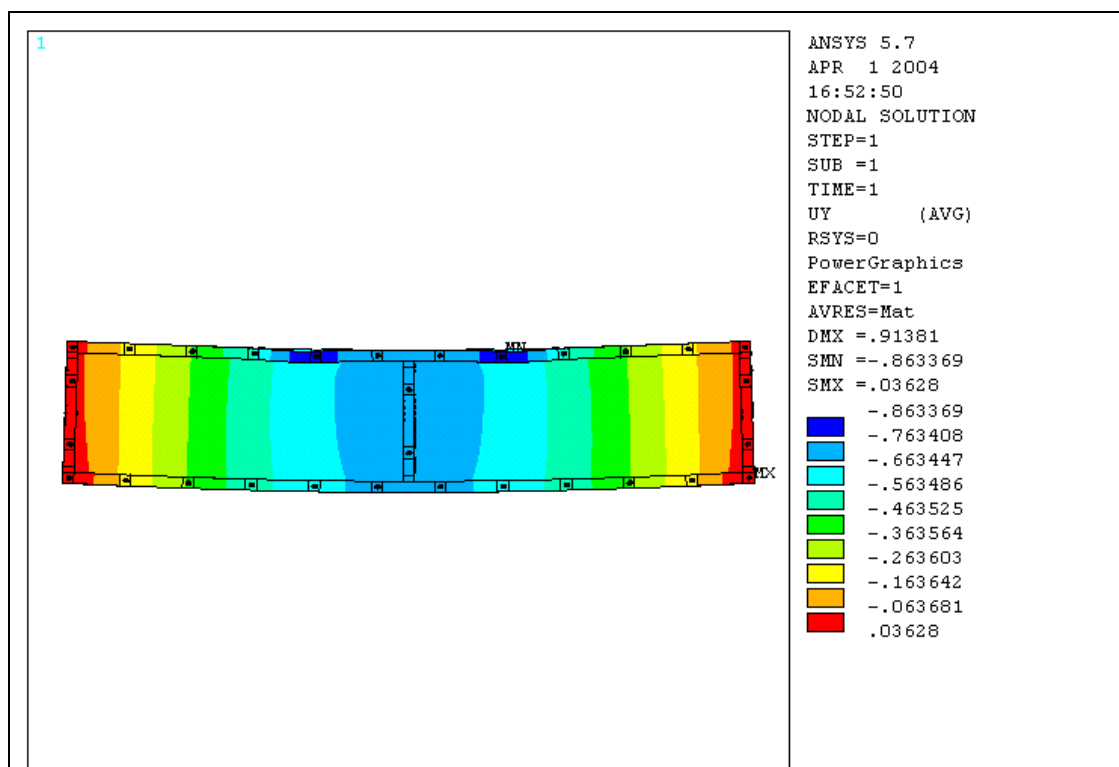
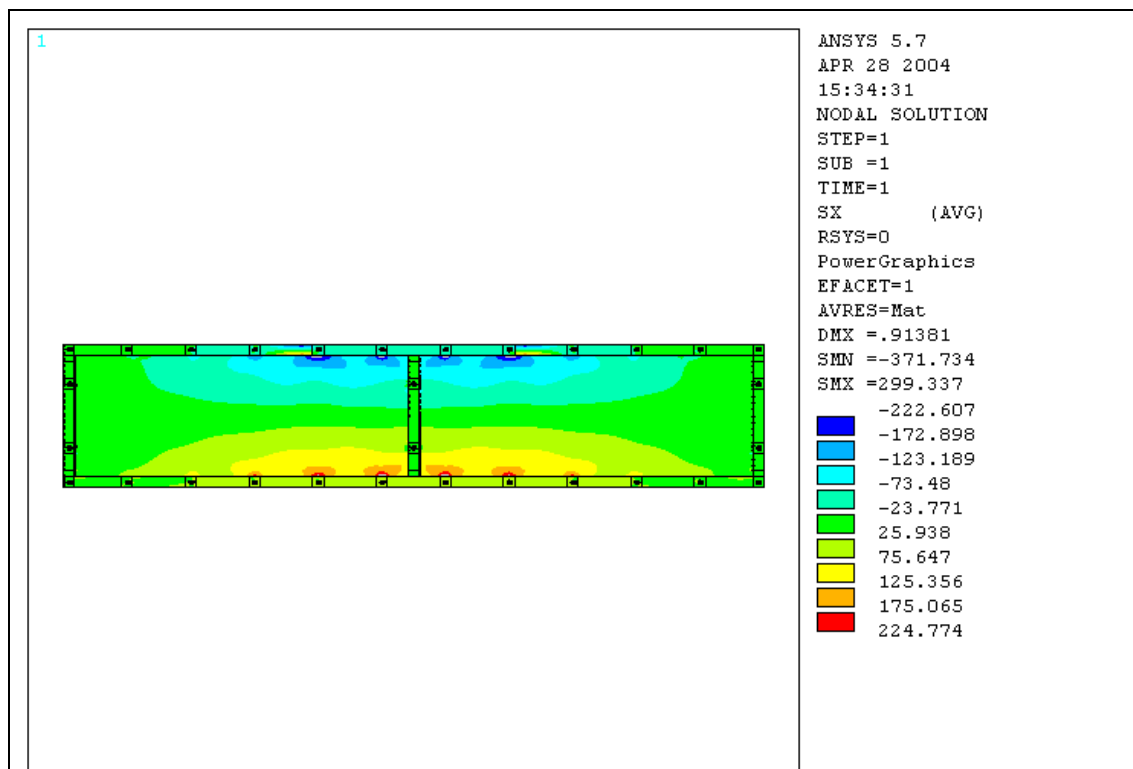


FIGURA 5.7- Deslocamentos verticais - Uy (cm) - P =36,90kN

FIGURA 5.8-Tensões normais - Sx ($\times 10^{-1}$ kN/cm²) - P= 36,90kN

5.3.2- Vigas do tipo “MA”

O mesmo procedimento adotado na modelagem da viga do tipo “A” foi aplicado à viga do tipo “MA”, ou seja, os módulos de elasticidade, as solicitações e características geométricos foram modelados no programa como se segue:

- $E_{co,m} = 26340$ MPa – módulo de elasticidade da madeira;
- $E_{co,m} = 4790$ MPa – módulo de elasticidade do compensado;
- Geometria da seção transversal e vistas laterais das vigas do tipo “MA” representadas nas FIG. 4.17a e 4.17b respectivamente;
- Esquema de ensaio das vigas do tipo “MA” representadas na FIG. 4.16

TABELA 5.2 – Malha de elementos finitos- Viga Tipo “MA”

PROTÓTIPO	NÚMERO DE NÓS	NÚMERO DE ELEMENTOS
MA	73280	43360

As FIG. 5.9, 5.10 e 5.11 representam o modelo da viga do tipo “MA” após a entrada de dados iniciais.

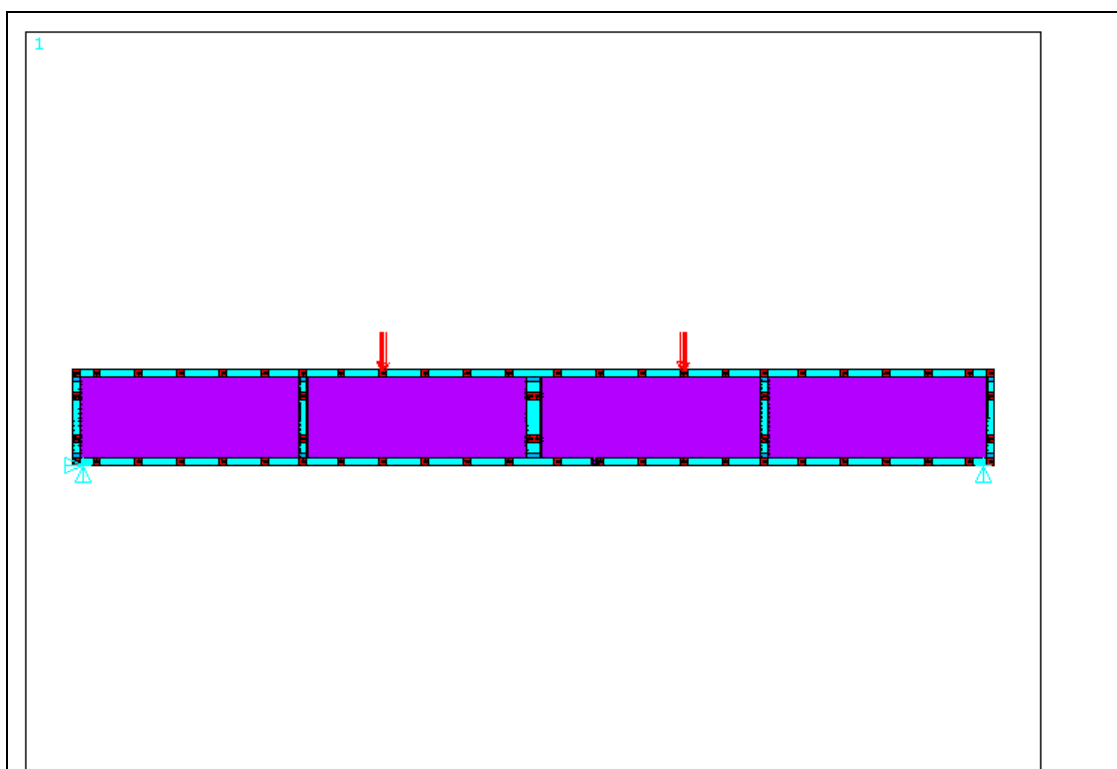


FIGURA 5.9 -Volumes– Vista frontal –Viga Tipo “MA”

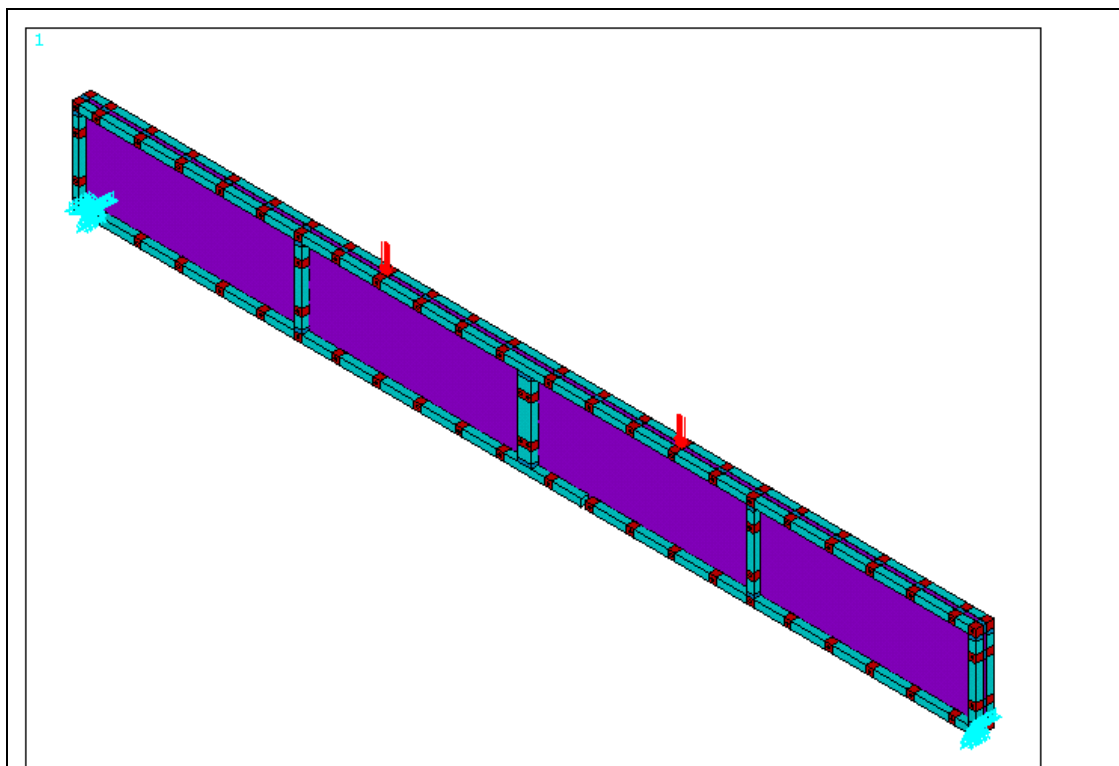


FIGURA –5.10 –Volumes – perspectiva – Viga Tipo “MA”

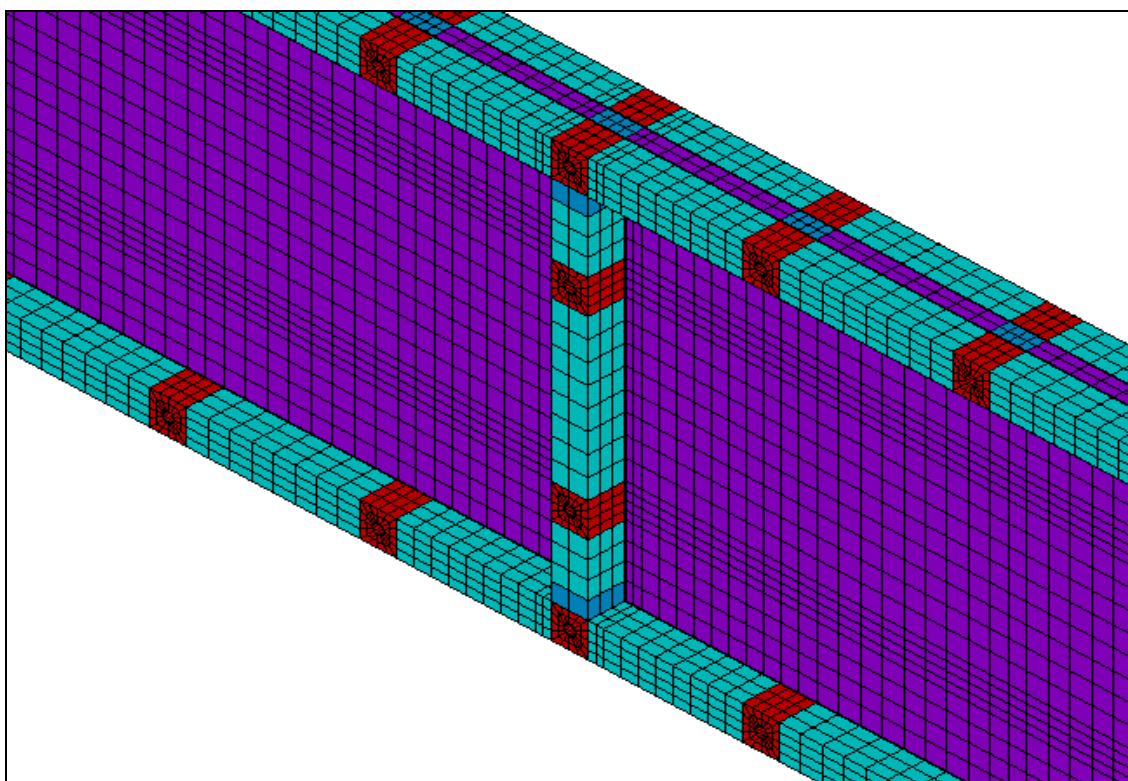


FIGURA 5.11- Malha de elementos finitos - Detalhe

5.3.2.1 - Resultados da análise numérica das Vigas do Tipo “MA”

A viga do tipo “MA” apresentou um comportamento tipicamente bi-linear, conforme FIG. 5.12, ou seja, em torno da força $P = 12,30\text{kN}$ a curva muda de inclinação, indicando a diminuição da rigidez inicial. Esse comportamento sugere que, a partir daquela força, pode estar ocorrendo esmagamento localizado na região da ligação parafusada entre o compensado e as mesas. Ao mesmo tempo, não há garantia de que tal ligação seja perfeitamente rígida. Para compatibilizar o modelo de elementos finitos com o ensaio, foi simulada uma plastificação das regiões parafusadas através da redução do módulo de elasticidade daquelas regiões. Tal redução foi feita proporcionalmente à variação de rigidez observada no ensaio, a partir da força $P = 12,30\text{kN}$, obtendo-se assim para cada trechos:

trecho I $\Rightarrow K_I = 12,30 / 8 = 1,5375 \text{ kN} / \text{mm}$

trecho II $\Rightarrow K_{II} = (24,60 - 12,30) / (43,5 - 8,0) = 0,346 \text{ kN} / \text{mm}$

$f = K_I / K_{II} = 1,5375 / 0,346 = 4,44$

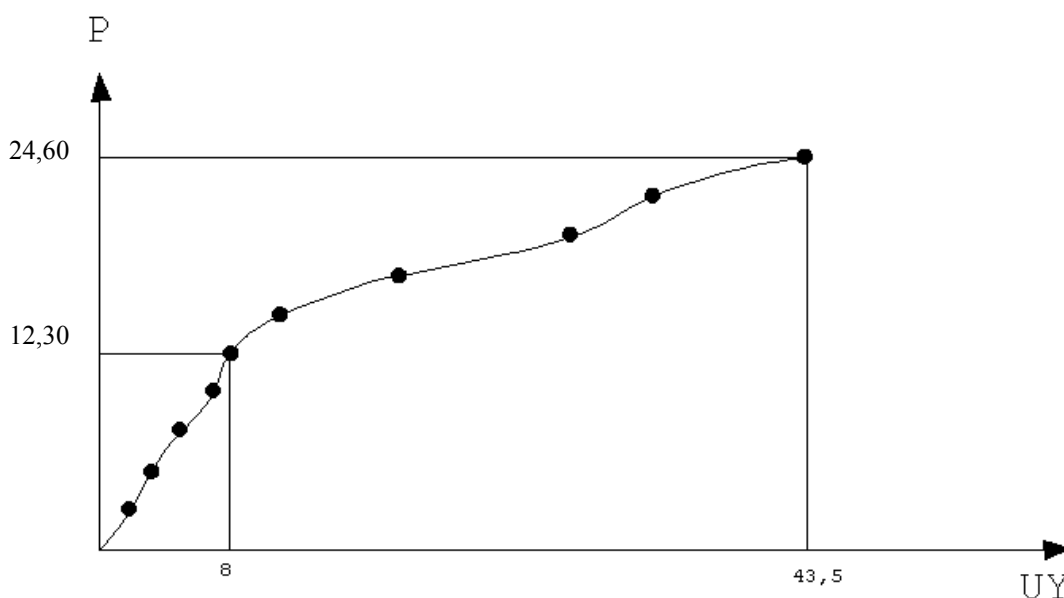


FIGURA 5.12 Viga tipo “MA” – Diagrama P (kN) x UY (mm)

As FIG. 5.13, 5.14, e 5.15 ilustram respectivamente, a deformada global, a variação dos deslocamentos verticais e das tensões normais para a força de $12,30\text{kN}$.

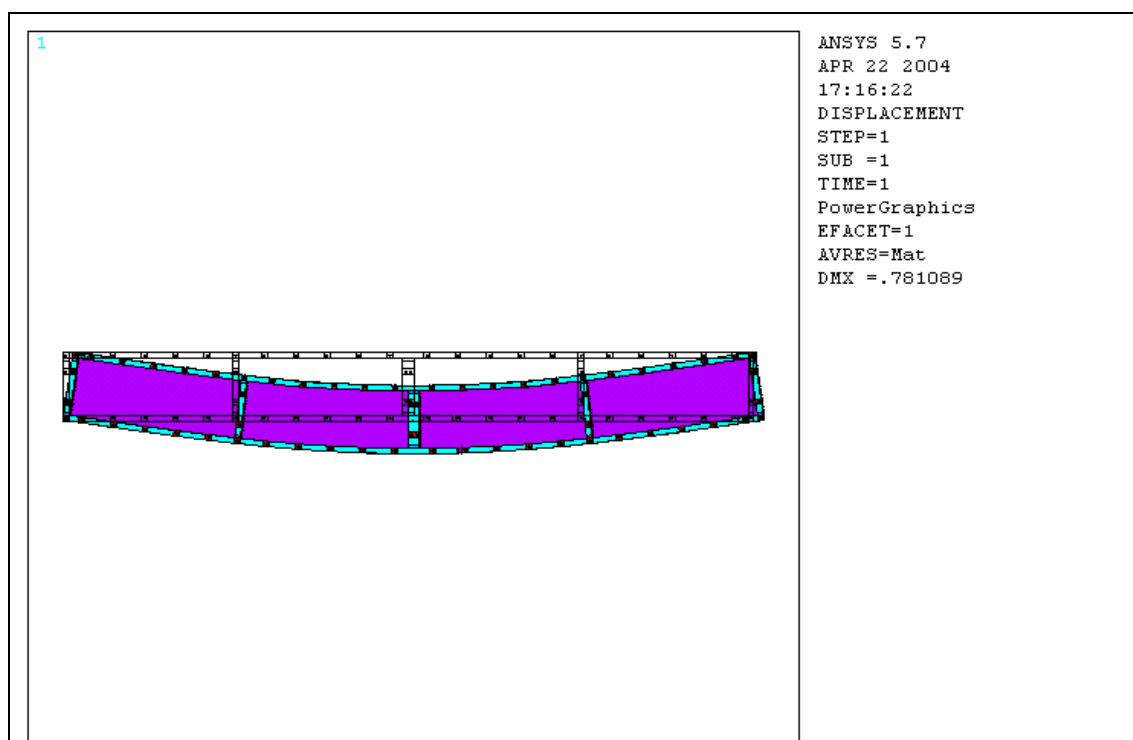


FIGURA 5.13- Deformada global para 12,30kN – Viga Tipo “MA”

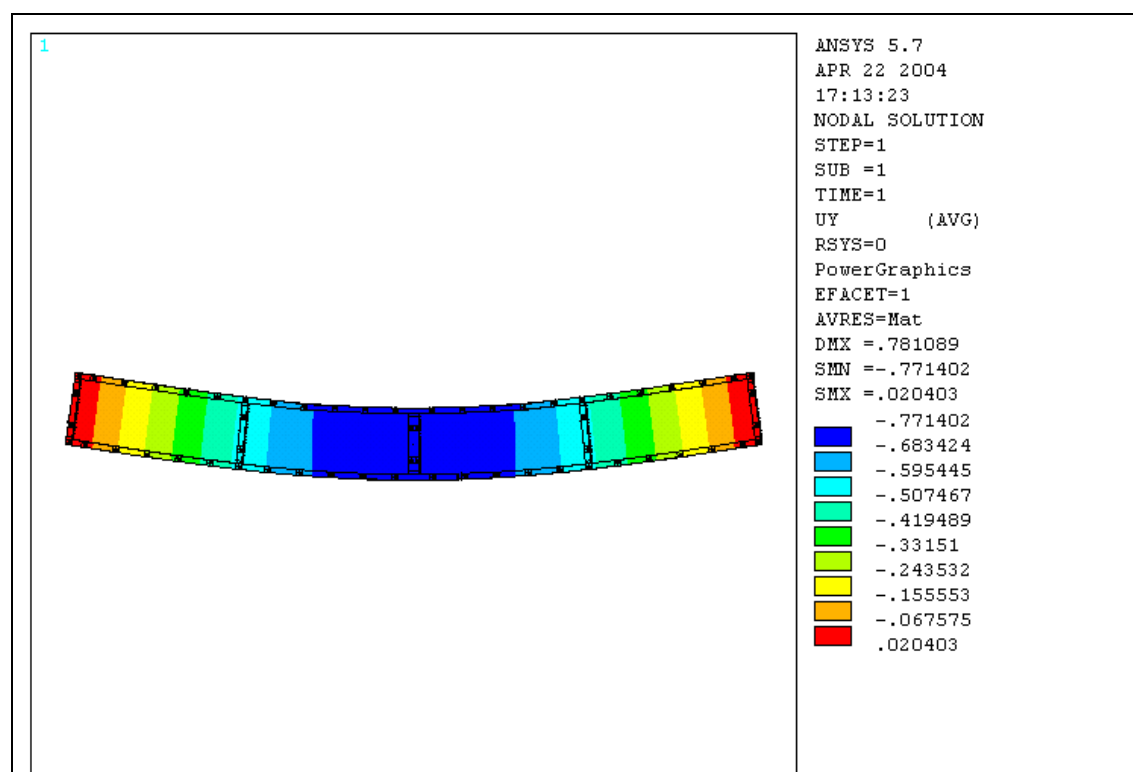


FIGURA –5.14 - Deslocamentos verticais - - Uy (cm) – P = 12,30kN

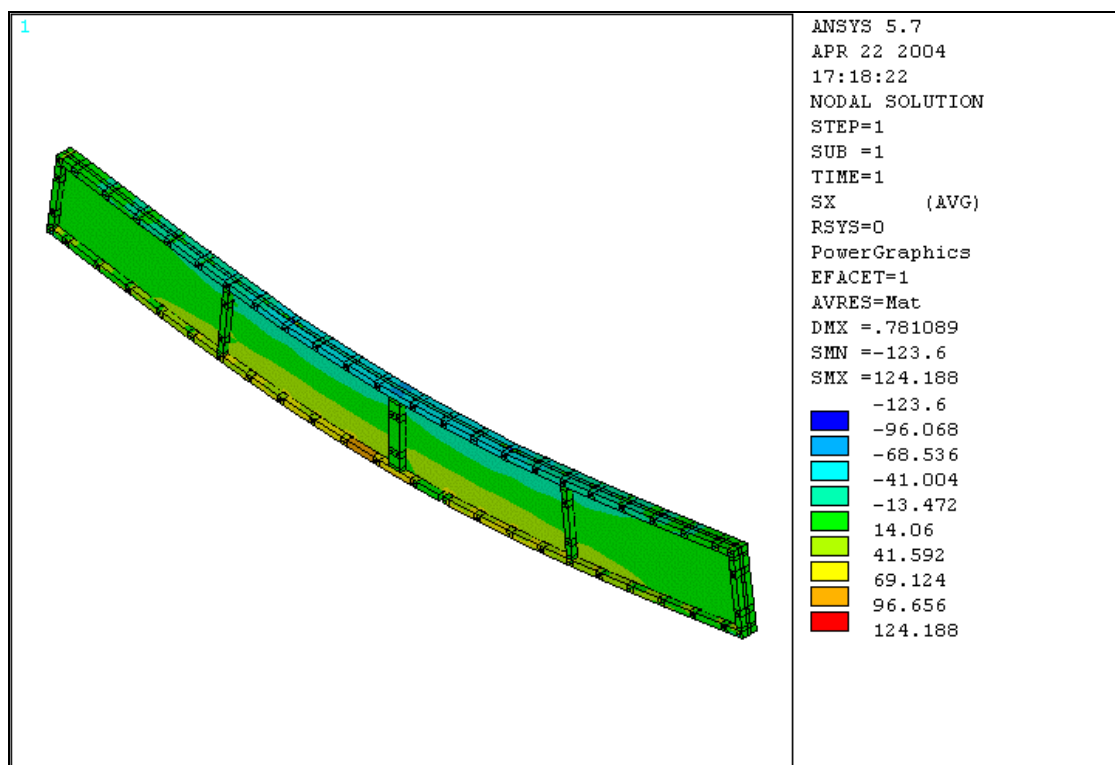


FIGURA –5.15 Tensões normais – S_x ($\times 10^{-2}$ MPa) - $P = 12,30\text{kN}$ -

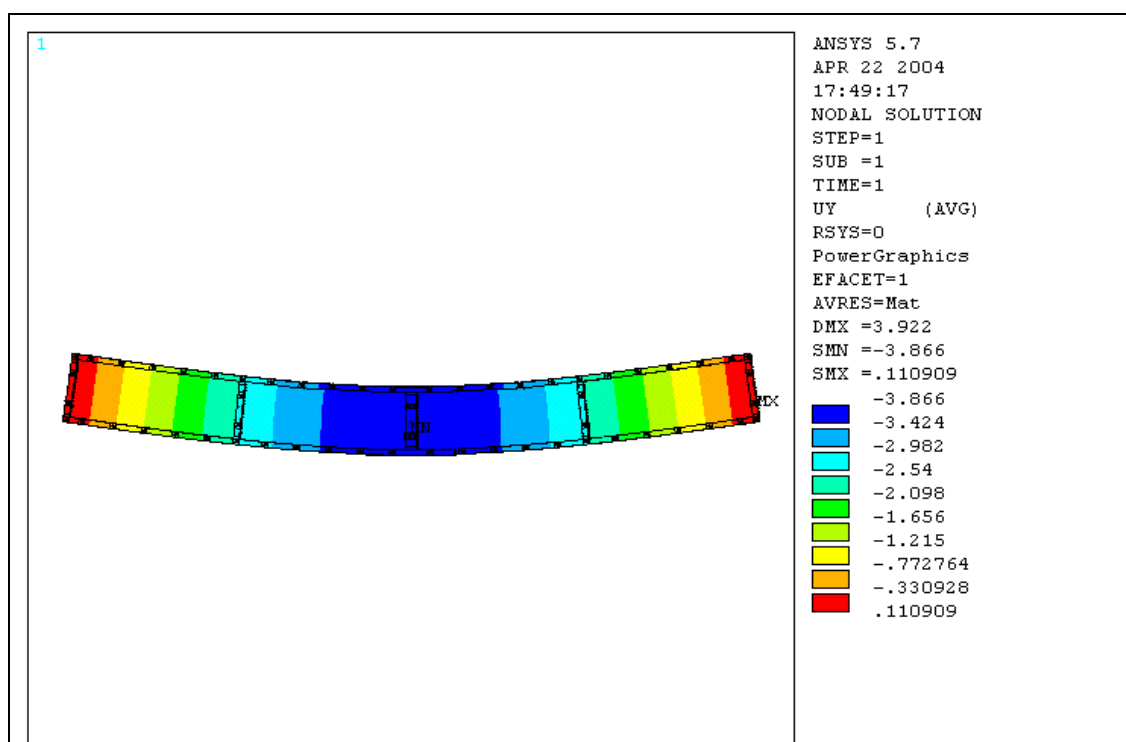


FIGURA – 5.16- Deslocamentos verticais U_y (cm) – $P = 24,6\text{kN}$

As FIG. 5.16 e 5.17 representam, respectivamente, a variação dos deslocamentos verticais e das tensões normais para a força $P = 24,60\text{kN}$.

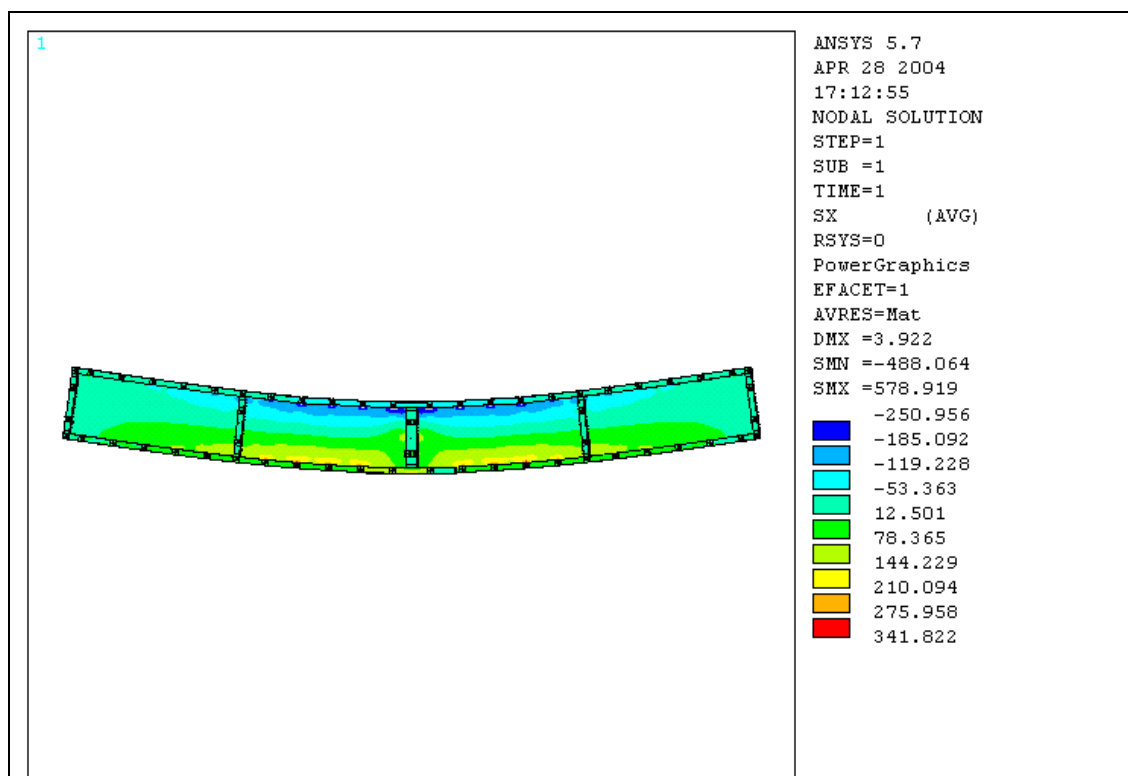


FIGURA –5.17 - Tensões normais S_x ($\text{KN} \cdot 10^{-1}/\text{mm}$)- $P = 24,6\text{kN}$

6

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para facilitar a visualização da análise deste trabalho e ressaltar as observações e aspectos mais importantes, serão apresentados neste capítulo gráficos comparativos de resultados teóricos, numéricos e experimentais dos seguintes itens:

- Deslocamentos verticais e rigidez das vigas do tipo “A”, “MA” e “MP”;
- Tensões normais das VCMC.

6.1 – Deslocamentos verticais das VCMC

Neste item estão sistematizados os valores dos deslocamentos verticais das VCMC, nos quais os resultados teóricos foram obtidos através da Eq. 3.42 com o EI_{ef} proposto pelo EUROCODE 5, os resultados experimentais apresentados no CAP. 4 e os numéricos apresentados no CAP. 5.

Para as vigas do tipo “A” a rigidez efetiva calculada segundo o EUROCODE 5 é de $EI_{ef} = 19403246 \text{ kN.cm}^2$ e para as vigas do tipo “MA” é de $EI_{ef} = 22465207 \text{ kN.cm}^2$.

6.1.1 – Vigas do Tipo “A”

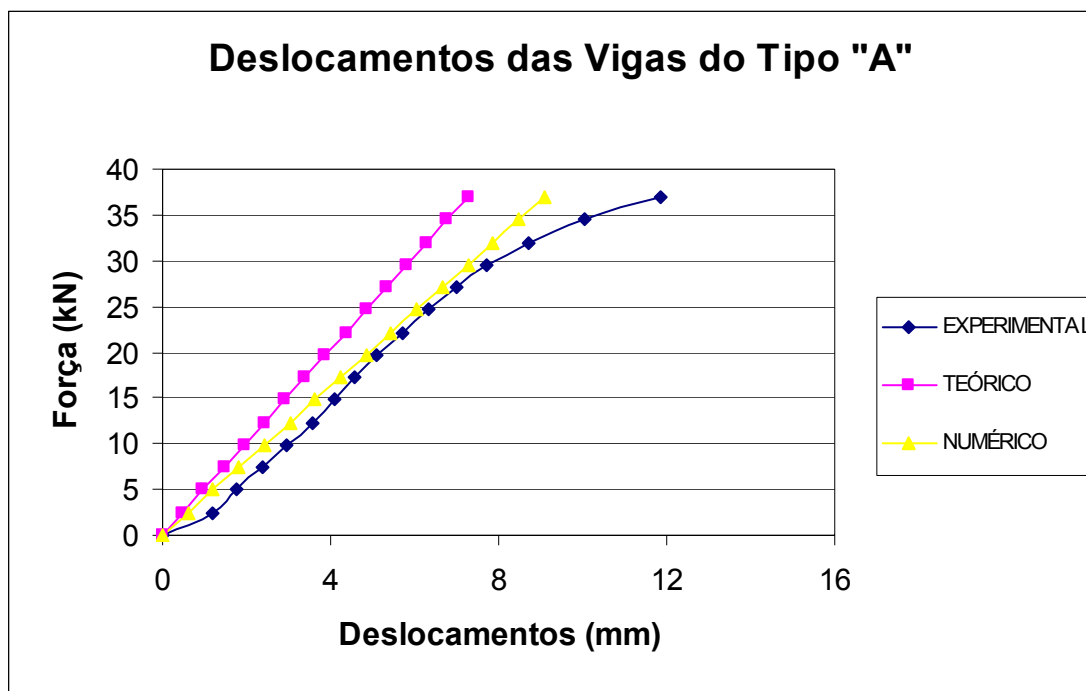


FIGURA 6.1 – Gráfico dos deslocamentos verticais teóricos, experimentais e numéricos para vigas do tipo “A”

Utilizando-se a Eq. 3.42 para determinação dos deslocamentos verticais e o valor médio experimental destes deslocamentos para uma força de 12,30kN, obteve-se o valor da rigidez experimental, EI_{exp} , igual a 15550415kN.cm².

TABELA 6.1 - Deslocamentos verticais e rigidez das Vigas do Tipo “A”

VIGA	FORÇA = 12,30 kN	
	$v_{(L/2)}$ (mm)	EI_{exp} (kN.cm ²)
“A”	3,57	15550415

O valor da rigidez experimental representa 80% do valor recomendado pelas expressões do EUROCODE 5. Essa diferença é coincidente com a o diferença obtida por STAMATO (2000).

6.1.2 – Vigas do Tipo MA

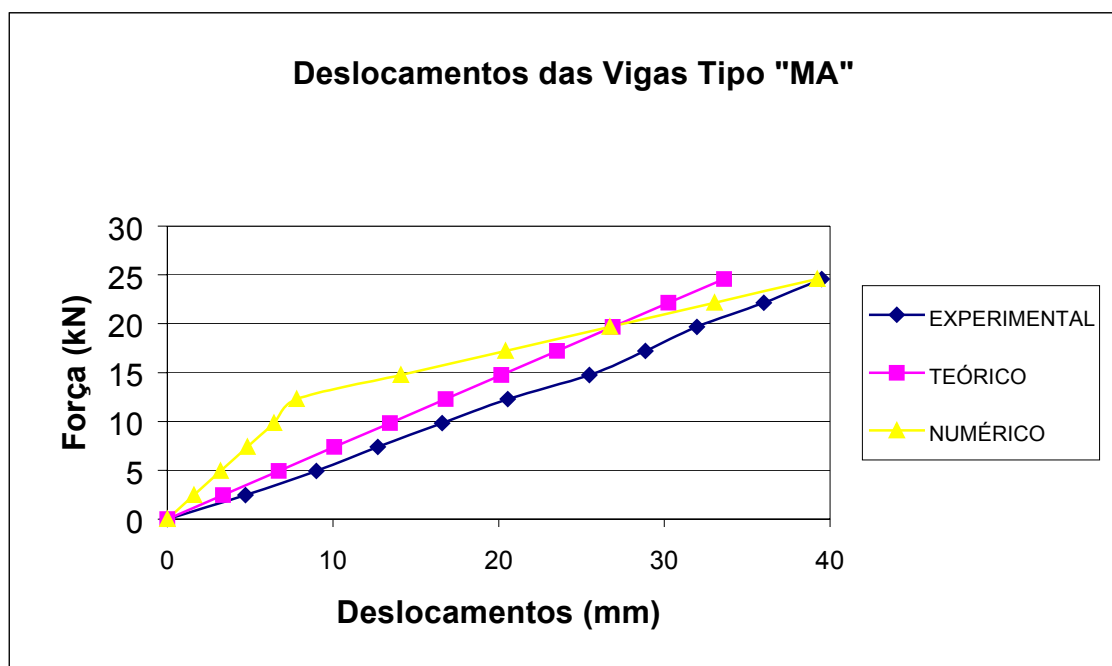


FIGURA 6.2 – Gráfico dos deslocamentos verticais teóricos, experimentais e numéricos para as vigas do tipo “MA”

Utilizando-se a Eq. 3.42 para a determinação dos deslocamentos verticais e o valor médio experimental destes deslocamentos para as forças de 7,38kN e de 12,30kN, obteve-se o valor da rigidez experimental média das vigas, EI_{exp} , igual a 14705511kN.cm².

TABELA 6.2 – Rigidez experimental das vigas de emendas transpassadas

PROTÓTIPOS	FORÇA= 7,38kN		FORÇA = 12,30kN	
	$v_{(L/2)}$ (mm)	EI (kN.cm ²)	$v_{(L/2)}$ (mm)	EI (kN.cm ²)
“MA”	12,72	14297425	20,55	15113597

O valor da rigidez experimental representa 65,5 % do valor recomendado pelas expressões do EUROCODE 5.

6.1.3 – Vigas do tipo “MP”

Com os poucos dados disponíveis para estas vigas, calculou-se a rigidez experimental para a carga de 7,38 kN.

TABELA 6.3 – Rigidez experimental das Vigas do tipo “MP8” e “MP12”

VIGAS	FORÇA = 7,38 kN	
	$v_{(L/2)}$ (mm)	EI (kN.cm ²)
MP8	32,40	3838189
MP12	22,78	5974723

6.1.4 – Comparação entre os resultados Teóricos e experimentais

As TAB. 6.4, 6.5 e 6.6 apresentam uma comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e teoricamente para uma força aplicada de 14,76kN para as vigas do tipo A, tipo M, e tipo MA, respectivamente. Os resultados teóricos foram calculados utilizando-se a equação 3.42 considerando interação completa, com as características geométricas e mecânicas das vigas.

TABELA 6.4 - Deslocamentos verticais experimentais e teóricos para vigas do tipo A para força de 14,76kN – $v(L/2) = 0,013 P$

Viga	Deslocamento Vertical experimental (mm)	Deslocamento Vertical teórico (mm)	Deslocamento Vertical devido ao cisalhamento e abertura da ligação (mm)
1A	3,0	2	1,0
2A	5,5	2	3,5
3A	3,0	2	1,0
4A	3,8	2	1,8
5A	5,0	2	3,0
6A	4,0	2	2,0

TABELA 6.5 - Deslocamentos verticais experimentais e teóricos para vigas do tipo M para força de 14,76 kN – $v_{(L/2)} = 0,045 P$

Viga	Deslocamento Vertical experimental (mm)	Deslocamento Vertical devido à flexão (mm)	Deslocamento Vertical devido ao cisalhamento e abertura da ligação (mm)
1M	13,0	6	7
2M	19,0	6	13
3M	34,0	6	28
4M	29,0	6	23
5M	32,0	6	26
6M	36,0	6	30

TABELA 6.6 - Deslocamentos verticais experimentais e teóricos para vigas do tipo MA para força de 14,76 kN – $v_{(L/2)} = 0,045 P$

Viga	Deslocamento Vertical experimental (mm)	Deslocamento Vertical devido à flexão (mm)	Deslocamento Vertical devido ao cisalhamento e abertura da ligação (mm)
7MA	24,0	6	18
8MA	20,0	6	14
9MA	24,0	6	18
10MA	30,0	6	24
11MA	33,0	6	27
12MA	14,0	6	8

A última coluna das TAB. 6.4, 6.5, e 6.6, mostram a diferença entre os valores experimentais e teóricos decorrentes da inexistência de elementos para combater as tensões de cisalhamento e a abertura da ligação entre os módulos, isto é, inexistência de elementos para combater a força cortante.

6.2 – Tensões normais nas Vigas do Tipo “MA”

Aplicando-se a Lei de Hooke aos dados de deformações normais na flexão obtidos nos ensaios e considerando a análise numérica apresentada no

capítulo 5, foram determinados os diagramas de tensões normais na seção distante 15 cm do meio do vão.

Considerando as expressões do EUROCODE 5, para a determinação de tensões normais apresentadas no capítulo 2, calcularam-se os valores das tensões:

$$\sigma_i = \gamma_i \cdot E_i \cdot a_i \cdot M / (EI)_{ef} \text{ ----- no centro de gravidade das mesas}$$

$$\sigma_{m,i} = 0,5 \cdot E_i \cdot h_i \cdot M / (EI)_{ef} \text{ ----- nas bordas das mesas da viga}$$

$$\sigma_i = 0,604 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{m,i} = 2,117 \text{ kN/cm}^2$$

As FIG. 6.3 e 6.4 apresentam os diagramas de tensões normais na flexão para as vigas 11MA e 12MA obtidos através das deformações medidas experimentalmente. A FIG. 6.5 apresenta o diagrama de tensão normal na flexão obtido pela análise numérica da viga do tipo “MA”.

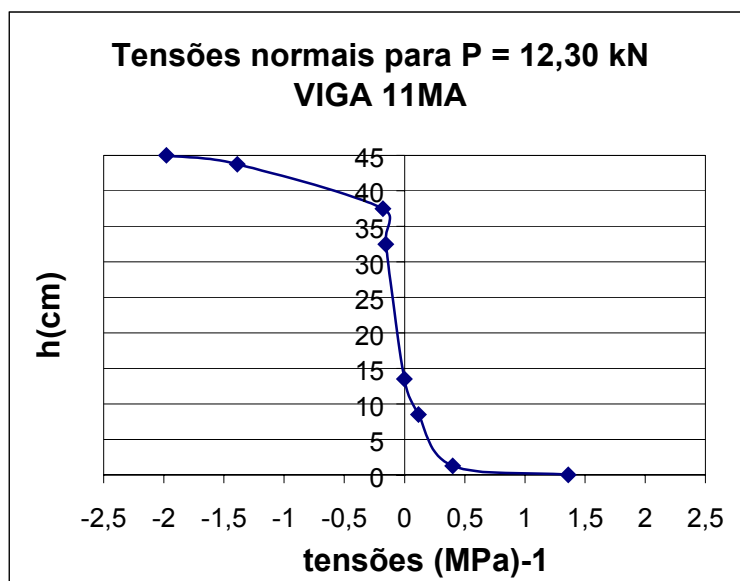


FIGURA 6.3.-Tensões normais da Viga11MA

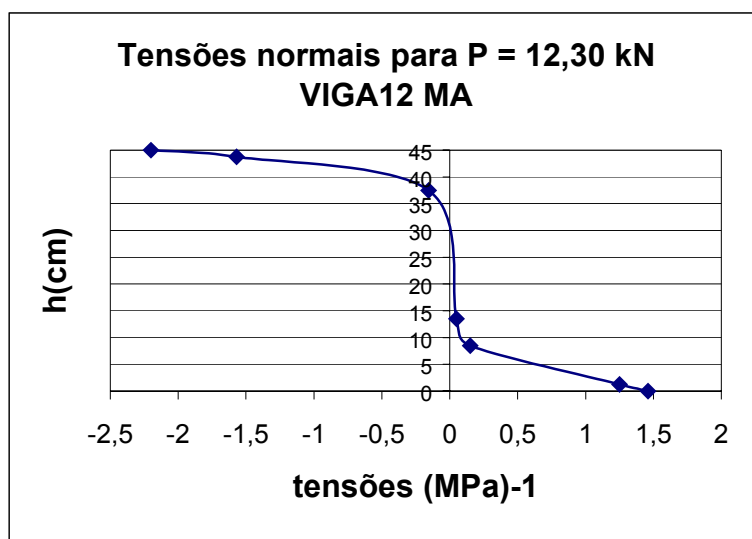


FIGURA 6.4.-Tensões normais da Viga 12MA

Os diagramas de tensões normais na flexão apresentam formas semelhantes entre os obtidos experimental e numericamente. Os valores máximos apresentam a mesma ordem de grandeza, mas com os valores teóricos superiores aos demais.

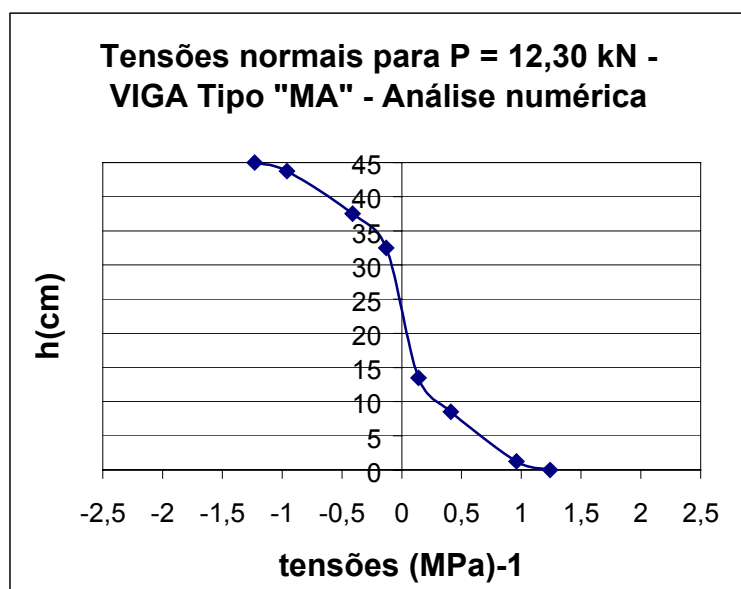


FIGURA 6.5.-Tensões normais numéricas – Viga tipo - MA

Os valores médios das tensões normais experimentais estão mais próximos dos valores numéricos, a TAB. 6.7 ilustra esta afirmação.

TABELA 6.7 – Tensões normais na flexão

TENSÃO MÁXIMA	TEÓRICA MPa	NUMÉRICA MPa	EXPERIMENTAL MPa
Compressão	21,2	12,3	20,9
Tração	21,2	12,4	14,1

6.3 – Ruptura das VCMC

Ressalta-se a alta resistência apresentada pelas vigas do tipo A, em relação ao baixo peso próprio das mesmas, 0,23 kN. Tendo essas vigas apresentado uma força de ruptura média de 51,25 kN, o peso representa apenas 0,44% da força de ruptura e 0,63% da carga de serviço da mesma. Analogamente, as vigas do tipo M com 0,46 kN de peso próprio e força de ruptura média de 35 kN, representa 1,31% da ruptura e 2,3% da carga de serviço desta.

6.4 – Considerações Gerais

Através de análises gerais e dos resultados obtidos das expressões, tabelas e gráficos apresentados, algumas considerações podem ser enfatizadas:

- O cálculo de vigas compostas utilizando o método da seção transformada é bem aceito para a análise do fenômeno da flexão;
- Um fenômeno que a literatura e os ensaios realizados mostraram ser de fundamental importância para o projeto de vigas compostas de madeira e compensado é a instabilidade lateral, que não foi objeto deste estudo;
- A literatura analisada apresentou poucas referências sobre o comportamento das vigas compostas de madeira e compensado quando executadas com emendas submetidas a momento fletor na região central;

- Os resultados experimentais de caracterização dos 3 tipos de compensado (compensado de virola de 15 mm, compensado de virola de 18 mm e compensado naval de 18 mm) aliados ao custo das chapas, mostraram que o compensado de virola de 18 mm é o mais adequado para a pré-fabricação das VCMC;
- A utilização da madeira da espécie *Eucalliptus grandis* como mesas das VCMC não apresentou nenhum problema de trabalhabilidade apresentando comportamento mecânico compatível com a necessidade de peças estruturais. Esses fatos comprovam que a utilização em grande escala de madeiras de reflorestamento não só é possível como necessária para o crescimento do usadas estruturas de madeira no país;
- A ruptura característica das VCMC ocorreu por tração da chapa de compensado. Esta ruptura foi localizada na parte do compensado próxima ao encontro das peças de madeira que consistem nas mesas inferiores do dois módulos;
- Os diagramas de deformações longitudinais obtidos experimentalmente para as vigas 11MA e 12MA apresentam formas compatíveis com os diagramas teóricos;
- Os valor experimental da rigidez das vigas do tipo A foi 20 % menor que os valores teóricos propostos pelo EUROCODE 5;
- O valor experimental da rigidez das vigas do tipo MA foi 34,5 % menor que os valores teóricos propostos pelo EUROCODE 5. A redução do valor da rigidez é devido à emenda ser por trespasse e não apresentar elementos de ligação no encontro das duas peças de compensado;
- A análise numérica realizada apresentou valores de deformações verticais e de tensões normais muito próximas dos valores obtidos

experimentalmente. Esse fato mostra que o modelo adotado está próximo do real comportamento da viga composta madeira/compensado;

- As expressões propostas pelo EUROCODE 5 apresentam valores de tensões normais superiores aos obtidos experimentalmente, levando a um dimensionamento mais conservador.

7

PROPOSTA PARA DIMENSIONAMENTO DAS VCMC

Para efeito de dimensionamento das VCMC, propõe-se um procedimento baseado no Eurocode 5, alterado por coeficientes obtidos através dos resultados experimentais.

Nos itens subseqüentes estão apresentadas as expressões para determinação das tensões normais na flexão, tensões tangenciais na flexão e do deslocamento vertical no meio do vão. Os valores máximos das tensões e dos deslocamentos devem ser limitados conforme apresentado na NBR-7190.

7.1. Rigidez das VCMC

Considerando a perda de rigidez das VCMC de 440 cm de vão, em função das emendas por transpasse das mesas, sugere-se que a rigidez destas vigas possa ser determinada baseada na expressão do EUROCODE 5. Esta expressão deve ser reduzida por um coeficiente (β) para determinação de

deslocamentos e o módulo de deslizamento deve ser determinado experimentalmente.

Expressão da rigidez das VCMC:

$$EI_{(VCMC)} = (EI)'_{ef} \cdot \beta \quad (7.1.)$$

Sendo:

$$(EI)'_{ef} = (E_m I_m + \gamma_m E_m A_m a_m^2) \times 2 + E_c I_c + \gamma_c E_c A_c a_c^2 \quad (7.2)$$

Com:

$$\gamma_m = \left[1 + \left(\frac{\pi^2 E_m A_m \cdot s}{k \cdot \ell^2} \right) \right]^{-1} \quad (7.3)$$

E_m = módulo de elasticidade da madeira;

I_m = momento de inércia da madeira;

A_m = área da seção transversal da madeira;

E_c = módulo de elasticidade do compensado

I_c = momento de inércia do compensado

s = espaçamento entre os parafusos

ℓ = vão livre da viga

K = módulo de deslizamento experimental

β = coeficiente de redução para VCMC de 440 cm, $\beta = 0,655$ (esse valor é válido para as condições de ensaio apresentadas)

Assim, a expressão (7.1) fica:

$$EI_{(VCMC)} = 0,655 (EI)'_{ef} \quad (7.4)$$

7.2. Tensões Normais e de Cisalhamento

Em função dos valores obtidos experimentalmente, comparados aos valores teóricos de tensões provenientes das expressões do EUROCODE 5, propõe-se a seguinte expressões para tensão normal máx.:

$$\sigma_{(VCMC)_{\max}} = 0,5 E_m \cdot h \cdot \frac{M_{\max}}{(EI)_{ef}'} \quad (7.5)$$

Sendo:

M= momento fletor máx.

h= altura da seção transversal

Uma vez comprovado que, para as espécies brasileiras de madeira, o módulo de deslizamento k não pode ser determinado em função das densidades das mesmas, sugere-se manter o k experimental para a determinação de tensões.

Em relação às tensões de cisalhamento, o EUROCODE 5 apresenta formulações conforme descrito no capítulo 2 deste trabalho. Como não faz parte deste estudo ensaios experimentais para determinação destas tensões, propõe-se a mesma formulação do EUROCODE 5.

$$\tau_{\max} = (\gamma_m E_m A_m a_m + 0,5 E_c b_c h_c) \cdot \frac{V}{b_c (EI)_{ef}'} \quad (7.6)$$

Com:

b_c = espessura da chapa de compensado

h_c = altura da alma de compensado

V= força cortante máxima

Finalmente, aplicadas as expressões de cálculo acima citadas, recomenda-se a verificação da segurança das mesmas para resistirem aos esforços solicitantes de tração, compressão e cisalhamento.

Na situação onde as VCMC são fletidas, a segurança fica garantida pela observância simultânea das seguintes condições:

$$\sigma_{(VCMC)_{\max}}^t \leq f_{t0,d}$$

$$\sigma_{(VCMC)_{\max}}^c \leq f_{c0,d}$$

$$\tau_{\max} \leq f_{v0,d}$$

7.3 - Deslocamentos Verticais

Conforme visto nos capítulos 2 e 3, para a determinação dos deslocamentos verticais, deve-se levar em consideração o efeito de força cortante nas VCMC, além do efeito de momento fletor. A flecha deve ser limitada para atender os estados limites de utilização estabelecido pela NBR 7190/97 e a expressão para dimensionamento recomendada é dada por:

$$v_{\max} = v_m + v_v$$

Sendo:

v_m = flecha devido ao momento fletor;

v_v = flecha devido ao cisalhamento.

Para as construções correntes o item 9.2.1 da NBR 7190/97 limita a flecha oriunda de carga permanente associada à acidental para vigas bi-apoiadas à:

$$v \leq L / 200$$

7.4 – Exemplo de Dimensionamento das VCMC

Como exemplo de aplicação, foi determinada a ação de cálculo (F_d) a ser aplicada na viga ilustrada na FIG. 7.1.

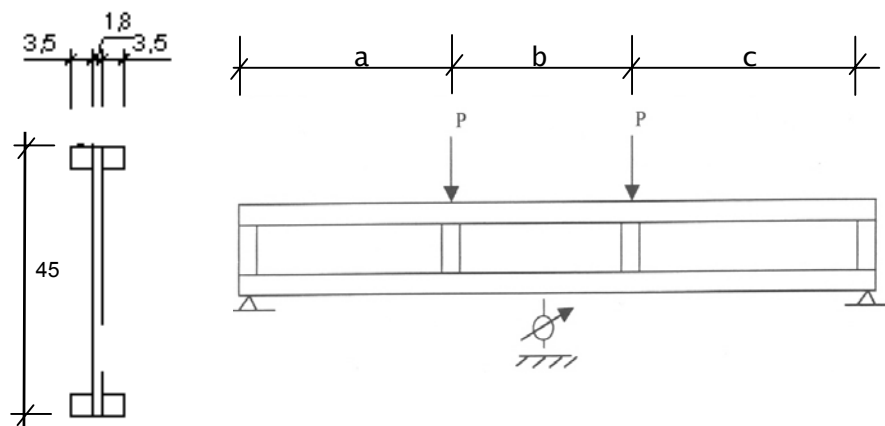


FIGURA 7.1 – Esquema de solicitações e geometria da VCMC

Sendo:

- $a = c = 141,5 \text{ cm}$
- $b = 147 \text{ cm}$
- $F_d = P$

7.4.1 Características dos Materiais

- **Madeira - *Eucalliptus Grandis* (U=12%)**

- resistência característica à compressão paralela:

$$f_{c0,k} = 5,38 \text{ kN/cm}^2$$

- resistência de cálculo à compressão paralela:

$$f_{c0,d} = k_{\text{mod}} \cdot f_{c0,k} / \gamma_c = 2,13 \text{ KN / cm}^2$$

Onde:

$$k_{\text{mod}} = 0,7 \cdot 1,0 \cdot 0,8 = 0,56 \text{ e } \gamma_c = 1,4$$

Os coeficientes correspondem respectivamente às condições de carregamento de longa duração, classe de umidade 1 e madeira serrada de 2ª categoria. As demais resistências quando não houver resultados experimentais podem ser obtidas pelas correlações:

- resistência característica à tração paralela:

$$f_{t0,k} = \frac{f_{c0,k}}{0,77} = 6,98 \text{ kN/cm}^2$$

- resistência de cálculo à tração paralela da madeira:

$$f_{t0,d} = \frac{0,56 \cdot 6,98 \text{ kN/cm}^2}{1,8} = 2,17 \text{ kN/cm}^2$$

- resistência característica ao cisalhamento da madeira:

$$f_{v0,k} = 0,12 \cdot f_{c0,k} = 0,64 \text{ KN / cm}^2$$

- resistência de cálculo ao cisalhamento da madeira:

$$f_{vo,d} = 0,56 \cdot \frac{0,64}{1,8} = 0,20 \text{ KN} / \text{cm}^2$$

- **Compensado – virola (18mm)**

Os valores de resistência do compensado forem obtidos experimentalmente e as relações para a determinação dos valores de cálculo das resistências seguem as recomendações da NBR7190.

- resistência de cálculo à compressão do compensado:

$$f_{c,d} = 0,54 \text{ KN} / \text{cm}^2$$

- resistência de cálculo à tração do compensado:

$$f_{t,d} = 0,94 \text{ KN} / \text{cm}^2$$

- resistência de cálculo ao cisalhamento do compensado:

$$f_{v,d} = 0,09 \text{ KN} / \text{cm}^2$$

- **Parafusos (d = 11mm, s = 20cm)**

O espaçamento e o diâmetro dos parafusos apresentam valores acima do necessário, uma vez que essas variáveis (s,d) não foram objeto da análise deste trabalho. Por este fato, foram utilizadas dimensões à favor da segurança e mantidas constantes nos ensaios. A verificação dos valores mínimos deve seguir, em projeto, a normalização vigente.

7.4.2 - Parâmetros da Viga

A seguir estão apresentados os principais parâmetros a serem considerados no dimensionamento.

$$A_m = 24,5 \text{ cm}^2$$

$$A_c = 81 \text{ cm}^2$$

$$I_m = 25 \text{ cm}^4$$

$$I_c = 13669 \text{ cm}^4$$

$$a_m = 20,75 \text{ cm}$$

$$a_c = 0$$

$$\gamma_m = 0,2853$$

$$\gamma_c = 1$$

$$K_{\text{exp}} = 27,50 \text{ KN/cm}^2$$

Determinação do $(EI)'_{ef}$

$$(EI)'_{ef} = (E_m I_m + \gamma_m \times E_m \times I_m \times a_m^2) \times 2 + E_c \cdot I_c \cdot \gamma_c$$

$$(EI)'_{ef} = 22465207 \text{ KN} / \text{cm}^2$$

Determinação do $EI_{(VCMC)}$

$$EI_{(VCMC)} = \beta \cdot 22465207 = 14714710 \text{ KN} / \text{cm}^2$$

Sendo $\beta = 0,655$

7.4.3 - Determinação de P através da Tensão Normal na Flexão

Impondo-se que as solicitações de cálculo sejam menores que as resistências de cálculo, têm-se:

$$S_d \leq R_d$$

De acordo com a expressão (7.5) as tensões normais são determinadas:

$$\tau_{(VCMC)\text{max}} = 0,5 \cdot E_m \cdot h \cdot \frac{M}{(EI)'_{ef}} \quad (7.5)$$

Tensão Normal de Tração

$$\tau_t \leq 2,15 \text{ KN} / \text{cm}^2$$

$$P = 6,32 \text{ KN}$$

Tensão Normal de Compressão

$$\tau_c \leq 2,13 \text{ KN} / \text{cm}^2$$

$$P = 6,26 \text{ KN}$$

Tensão de Cisalhamento

Utilizando a expressão (7.6) temos:

$$\tau_{\max} = (\gamma_m E_m A_m a_m + 0,5 E_c b_c h_c) \cdot \frac{P}{b_v (EI)_{ef}'}$$

$$\tau_{\max} \leq 0,09$$

$$P = 9,22 \text{ kN}$$

7.4.4 - Determinação de P através da expressão de deslocamentos verticais

Conforme apresentado no capítulo 3, as expressões (3.43) e (3.44) representam o deslocamento vertical máximo para VCMC com força ilustrada na figura 7.1.

$$V_{\max} = \frac{P}{6EI} \left[\frac{4a^4 + 8a^3c + 4,5a^2c^2 + 0,75ac}{c+2a} \right]^3 + f \frac{Pa}{GA}$$

$$V_{\max} = \frac{2798227P}{EI_{(VCMC)}} + 0,149P$$

Para construções correntes: $V_{\max} \leq \ell / 200$

$$V_{\max} \leq 2,15$$

$$P < 6,31 \text{ kN}$$

Sendo assim, neste exemplo o máximo valor de F_d que pode atuar na VCMC é igual a 6,26kN.

7.5 – Considerações sobre o dimensionamento

A formulação matemática apresentada mostrou-se aplicável ao tipo de viga (VCMC), como demonstrado no exemplo de dimensionamento. Muitos dos parâmetros envolvidos não são contemplados pela NBR7190/97, devendo ainda ser objeto de experimentação, visto ser necessário um dimensionamento mais realista. Posteriormente, uma proposta de alteração desta norma deverá ser formulada com a absorção desses parâmetros com um maior aprofundamento neste tema.

O fator de redução β é um coeficiente que aproxima os valores teóricos de rigidez de vigas (VCMC de 440cm) com os valores experimentais, que são os valores reais das mesmas. A determinação deste coeficiente possibilitará a utilização das expressões do EUROCODE 5 pela NBR7190/97 com resultados menos conservadores.

8

CONCLUSÕES

Utilizando-se como referência o estudo do estado da arte sobre vigas compostas de madeira e compensado (VCMC) e nas análises, teórica, experimental e numérica realizadas, apresentam-se as conclusões deste trabalho:

- A proposta do dimensionamento apresentada neste trabalho para as vigas de 220cm mostrou-se adequada. Os deslocamentos verticais e a rigidez experimental representam 80% do valor recomendado pelo EUROCODE 5. Estes resultados demonstram que esta norma está a favor da segurança e suas expressões podem ser utilizadas para o dimensionamento, inclusive para tensões normais;
- Para o dimensionamento das vigas de 440cm não se pode utilizar a proposta apresentada neste trabalho pois um estudo aprofundado sobre as perturbações e as características das emendas devem ser realizados;

- A proposta da não execução de emenda no encontro das duas chapas de compensado (emenda da alma) deve ser reavaliada e não deve ser utilizada em obra, pois fica claro que a inexistência de elementos de ligação nesta região, para combater as tensões de cisalhamento, compromete a eficiência do comportamento das vigas.

O presente trabalho mostra ainda, uma lacuna existente na literatura sobre esse tipo de viga, tornando muito importante a implementação de novas pesquisas. Além disso, as VCMC apresentaram-se como um elemento estrutural de fácil execução e resistência comprovada para determinados projetos de estruturas de madeira.

9

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O resultados obtidos no presente trabalho proporcionam as seguintes sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros:

- realização de ensaios com outros tipos de conectores, na ligação das mesas com o compensado, para vigas com emendas por trespasse;
- realização de ensaios com vigas executadas com 3 módulos (vão de 660 cm - 3 módulos de 220 cm de comprimento);
- determinação experimental do real diagrama de tensões normais na flexão para vigas de 2 e 3 módulos;
- estudos sobre outros tipos de elementos para a análise numérica das VCMC, visando uma melhor aproximação com os resultados experimentais;
- realização de estudos teórico, numérico e experimental sobre a estabilidade lateral das VCMC de 2 e 3 módulos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Pedro. A “Estruturas de Madeira de Grande Porte”.1990. 293 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

ALMEIDA, Pedro. A. “Uniões Pregadas de Madeira” 1987. 174 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

ALMEIDA, P. A., CALIL JR., C., FUSCO, P. B.. “Determinação das Propriedades das Madeiras para Projeto de Estruturas” 1996 . Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP, São Paulo.

ALVIM, R.C.. “A Resistência dos Pilares de Madeira Composta.”. 206 p. Tese (Doutorado) - São Paulo, 2002 – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

AMERICAN FOREST AND PAPER ASSOCIATION – AF&PA & AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS –ASCE. Standart for Load and Resistance factor Design (LRFD) for engineered wood construction. AF&PA-16-95. Virginia, 1996.

AMERICAN FOREST AND PAPER ASSOCIATION – AF&PA. Curse: “The wood connection session”. 26 Feb. 2002. Disponível em:<http://www.awc.org/HelpOutreach/eCourses/DES110/WSF2002Connections/ppframe.htm>>

AMERICAN PLYWOOD ASSOCIATION Design and Fabrication of Plywood Lumber Beams — Supplement 2, 1983.

AMERICAN PLYWOOD ASSOCIATION Design and Fabrication of All Plywood Beams — Supplement 5, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS “Norma Brasileira para Cálculo e Execução de Estruturas de Madeira” NBR 7190 da Associação de Normas Técnicas, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS “Compensado- Determinação da resistência à flexão estática- método de ensaio” NBR 9533 da Associação de Normas Técnicas, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS “Compensado – Determinação do teor de umidade – método de ensaio” NBR 9484 da Associação de Normas Técnicas, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS “Compensado – Determinação da massa específica aparente– método de ensaio” NBR 9485 da Associação de Normas Técnicas, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS “Compensado – Determinação da absorção de água– método de ensaio” NBR 9486 da Associação de Normas Técnicas, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS “Amostragem de Compensado para ensaio” NBR 9488 da Associação de Normas Técnicas, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS “Condicionamento de Corpos de prova de compensados para ensaios” NBR 9489 da Associação de Normas Técnicas, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS “Lâminas e Compensados - Terminologia” NBR 9490 da Associação de Normas Técnicas, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS “Chapas de Madeira Compensada - Classificação” NBR 9531 da Associação de Normas Técnicas, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS “Chapas de Madeira Compensada -Especificação” NBR 9532 da Associação de Normas Técnicas, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS “Compensado-Determinação da resistência à flexão estática- método de ensaio” NBR 9533 da Associação de Normas Técnicas, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS “Compensado-Determinação da resistência da colagem ao esforço de cisalhamento – método de ensaio” NBR 9534 da Associação de Normas Técnicas, 1985.

ASTM. Standard test methods for mechanical fasteners in wood. D 1761-88, Philadelphia, PA, 1988.

BISGEIER, C.. “Rolling your own wood I beams for model railroad benchwork”. Nov., 2003. Construction Journal. www.housatonicrr.com/ibeam.html -

BLASS, H.BIENHAUS, A., KRAMER, V. “Effective bending capacity of dowel-type fasteners”. International council for research and innovation in building and construction – Working commission W18 – Timber structures. Netherlands, 2000.

BLASS, H. e SCHMID, M.. “Nail plate reinforced joints with dowel-type fasteners”. Proceedings of the 6 Word Coference on Timber Engineering, Wihistler Resort, British Columbia, Canadá, 2000.

BRITISH STANDARD –Structural Use of Timber. Part 2. Code of practice for permissible stress design, materials and workmanship, 1991.

CALIL, C. e STAMATO, G.. "Plywood in Brazil: Properties and Structural Utilization" -World Conference on Timber Engineering- Suíça, 1998.

CALIXTO J. M.e WHEAT D. L.. "Nonlinear Analysis of two-layered wood members with interlayer slip". Journal of Structural Division, v. 120, n. 6, p. 1909-1929, June, 1994.

CONSEIL INTERNATIONAL DU BÂTIMENT. Structural Timber Design Code. 1980.

DEUTSCHE INSTITUTE FÜR NORMUNG. DIN 1052 – Hoja 1; "Construcciones de madera: Cálculo y Ejecución". Bilbao, 1973.

EHLBECK, J., LARSEN, H.J. Eurocode 5 - "Design of Timber Structures: joints". 1992.

EHLBECK, J. e WERNER, H. "Bolted and dowelled joints I. Timber Engineering. STEP1. C6/1-C6/6 .1995.

ENGINEERING DESIGN IN WOOD. "Limit States Design" Canadá, 1994.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, EUROCODE 5; "Design of Timber Structures"–Common Unified Rules for Timber Structures, Brussels – 1993.

FALK, R. H. e WOLFE R. W. "State-of-the-art structural modeling of light frame assemblies and buildings" Forest Products Laboratory, Madison, 1989.

FOREST PRODUCTS LABORATORY."Wood Handbook: wood as an engineering material". General Technical Report (FPL-GTR-113). 1999, 463 p. Madison.

Available from:<<http://198.150.87.8/documnts/fplgrt/fplgrt113/fplgrt113.htm>>.

GEHRI, Ernest. "Light trusses with screwed joints. Proceedings of the International RILEM Symposium, Stuttgart, Germany, Sept 12-14, 2001, p. 143-152.

GENDRON, G. "A review of four PC packages for FE structural analyses. Finite Elements in Analysis and Design, v. 28, p. 105-14.

GOES, Jorge L. N. e DIAS A.A.; "Avaliação experimental de vigas de madeira com seção composta" In: Encontro brasileiro em Madeira e em Estruturas de Madeira, 8., (VIII EBRAMEM)Uberlândia, MG, 2002.

GOES, Jorge L. N. e DIAS A.A.; "Influência da rigidez da ligação no comportamento de vigas de madeira de seção composta" In: Encontro brasileiro em Madeira e em Estruturas de Madeira, 8., (VIII EBRAMEM)Uberlândia, MG, 2002.

HANSEN, H. "Design of Plywood I Beams" American Society of Civil Engineers, USA, 1946.

HOYLE, R. J.. "BEHAVIOUR OF WOOD I BEAMS BONDED WITH ELASTOMERIC ADHESIVES. RES. BULL.3328, COLLEGE OF ENGINEERING, WASHINGTON STATE UNIVERSITY, PULLMAN, WA, 1973.

HUNT, R. e BRYANT, A.. "Stability of Plywood Webs of Box Girder Beams" World Conference on Timber Engineering, Canadá, 2000.

HWANG K.O.e LEE W.. "Research Bulletin of the wood" Institute Kyoto University. Sept, 2002.

INOUE, M. et al. "Structural Behaviour of Composite Beams Composed of Sugi Lumber" World Conference on Timber Engineering, Canadá, 2000.

KARLSEN, G. G. "Wooden Structures". Mir Publishers. Moscow. 1967. p. 638-227.

KUENZI, E. W. "Theoretical Design of a Nailed or Bolted Joint under Lateral Load" Madison: Forest Products Laboratory, Forest Service, United State Departament Agriculture, 1955. 31p. (Rep. D1951)

KUENZI, E. W. and WILKINSON T. L.. "Composite I Beams: Effect of Adhesive or Fastener Rigidity. USDA Forest Serv. Res. Pap. FPL 152. Foret Products Laboratory, Madison , 1971.

LAUFENBERG, T. L.. "Enhancements to performance: wood composites" Forest Products Laboratory, Madison, 1993:47-56.

LEICHTI, R.J.; FALK, R. e LAUFENBERG, T. L.. "Prefabricated Wood Composite I Beams: A Literature Review" Forest Products Laboratory, 1989.

MCNATT. J. D.. "Hardboard-Webbed Beams:research and application" Forest Products Journal. V 30 N^o 10. 1980.

MISCHLER, A., PRION, H., LAM, F.. "Load-carryng behaviour of steel-to-timber dowel connections". World Conference on Timber Enginnering. 2000. British Columbia, Canadá.

NEWLIN, J. A. e TRAYER, G. W.;"Deflections of beams with special reference to shear deformations". U.S. Forest Products Laboratory. Report N^o 1309, march, 1956.

POOLE, Gene; LIU, Yong-Cheng; MANDEL, "Advanced Analysis capabilities in ANSYS through solver technology, Jan 2001, p. 1-17.

PFEIL, W. "Estruturas de Madeira". 4 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1985.

QUEIROZ, Fernando D.; “Modelos para análise de pilares mistos pelo método dos elementos finitos”. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2003.

RACHER, P. “Moment resisting connections” STEP lecture C16, cust Civil Engineering, Blais Pascal University, 1996.

RAMARKER, T. e DAVISTER, M... “ Predicting Performance of Hardboard in I Beams”.Forest Products Laboratory, USA, 1997.

RAMMER, Douglas R; WINISTOFER, Steve G. “Effect of moisture content on dowel-bearing strength”. Wood and Fiber Science. 2001. p. 126-139.

RAMMER, Douglas R; WINISTOFER, Steve G. BENDER, Donald A. “Withdrawal strength of threaded nails”. Journal of Structural Engineering, Apr. 2001, p.442-449.

RAMSKILL, Thomas E. “Effect of cracking on Lag Bolt Performance”. Dissertation (PhD), Virginia Polytechnic Institute and State University, Aug. 2002, 280p.

RIBEIRO, G. “Determinação de Propriedades Elásticas e de Resistência dos Compensados Estruturais” Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, 1986.

RODD P. D. e HILSON B.O.. “The ultimate shearing strength of timber I-beams with hardboard webs”1979. The Structural Engineer, vol. 57B/N2/June.

SAMSON, M..”Influence of flange quality on the load-carryng capacity of composite webbed I-beams in flexure”. Forest Products Research Society. Jan.1983

SANTANA, Cláudia. “Vigas de Madeira de Seção Composta com Alma em Chapa de Compensado” Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Campinas -UNICAMP, Campinas, 1997.

SANTANA, Cláudia. e MASCIA, N.. “Abordagem Teórica e Experimental de Vigas de Madeira com Alma em Chapa de Compensado.” In: Encontro brasileiro em Madeira e em Estruturas de Madeira, 6., (VI EBRAMEM), Florianópolis, SC, 1998.

SANTANA, Cláudia. e MASCIA, N.. “Abordagem Numérica de Vigas de Madeira com Alma em Chapa de Compensado.” In: Encontro brasileiro em Madeira e em Estruturas de Madeira, 7., (VII EBRAMEM), São Carlos, SP, 2000.

SMITH, Ian; FOLIENTE, Greg. “Load and resistance factor design of timber Joints: International practice and future direction”. Journal of Structural Engineering, Jan. 2002, p. 48-59.

SOLTIS, Lawrence A.; WILKINSON, Thomas L. “Chapter 1: Introduction. Chapter 4: Bolts, drift bolts, and pins. In: AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS- ASCE. Manuals and reports on engineering practice No.84. Mechanical Connections in Wood Structures, New York, 1997. Disponível em: <http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/PDF1997/solti97c.pdf> e <http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/PDF1997/solti97b.pdf>>.

STAMATO, G. e CALIL, C.. “Dimensionamento de Estruturas de Madeira compostas por chapas de Madeira Compensada.” Encontro brasileiro em Madeira e em Estruturas de Madeira, 7., (VII EBRAMEM), São Carlos, SP, 2000.

STAMATO G.; “Resistência ao Embutimento da Madeira Compensada” Dissertação (Mestrado). Escola Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo -USP, São Carlos, 1998.

STAMATO G.; "Ligações em estruturas de madeira compostas por chapas de madeira compensada". Tese (Doutorado). Escola Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo -USP, São Carlos, 2002.

STANDARDS ASSOCIATION OF AUSTRALIA. "Australian Standart Timber Structures: PART 1 – Design Methods.

STIEDA, C.K.A.; "A shear stiffness factor for plywood box beams" Forest Products Laboratory" VP-X-31. Vancouver, British Columbia. Dec.1967

SUPERFESKY, M. J. e RAMARKER T.J..1976."Hardboard-webbed I beams subjected to short-term loading. USDA Forest Serv. Res. Pap. FPL 264, Forest Products Laboratory, Madison, Wis.

SZUCS, C. e PRADA, O.. "Pré fabricação de Componentes em Madeira: Viga Composta com Seção I." In: Encontro brasileiro em Madeira e em Estruturas de Madeira, 7.,(VII EBRAMEM), São Carlos, SP, 2000.

SZUCS, C. e outros. "Chapas de Vedação Industrializadas em Madeira de Reflorestamento para Edificações." In: Encontro brasileiro em Madeira e em Estruturas de Madeira, 7., (VII EBRAMEM), São Carlos, SP, 2000.

TIMOSHENKO, S. P., GERE, J. M. "Theory of Elastic Stability"New York: McGraw-Hill, 1961.

VELOSO, L.A.C.M.; ALVIM, R.C.;ALMEIDA, P. A. O. "Avaliação numérica do modelo de cálculo das ligações mecânicas de NBR-7190/97. In: Encontro brasileiro em Madeira e em Estruturas de Madeira, 7., (VII EBRAMEM) São Carlos, SP, 2000.

VELOSO, L.A.C.M.; MARTINEZ, M. A.B. ALVIM, R.C.;ALMEIDA, P. A. O. "Estudo comparativo das expressões da NBR-7190/97 e do EUROCODE 5 para ligações pregadas de madeira. In: Encontro brasileiro em Madeira e em Estruturas de Madeira, 8., (VIII EBRAMEM)Uberlândia, MG, 2002..

WILKINSON, Thomas L. "Analysis of nailed joints with dissimilar members". Journal of Structural Engineering, 1972.p 2005-2013.

WILKINSON, Thomas L. "Theoretical lateral resistance of nailed joints". Journal of Structural Engineering, 1971. p.1381-1398.

WILKINSON, Thomas L. "Dowel bearing strength". Forest Products Laboratory, Research Paper (FPL-RP-505). Madison. Oct. 1991. 9 p. Disponível em: <http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplrp/fplrp505.pdf>

WOOD DESIGN MANUAL. "Plywood Stressed-skin Panels" Canadá 1995.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

AUNE, P. e PATTON-MALLORY, M. "Lateral load-bearing capacity of nailed joints based on the yield theory: Experimental Verification. Research paper FPL 470. Madison. W.I.U.S. Departament of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 1986.

CHENG, S. e LIU, J.. "Analysis of Orthotropic Beams" Forest Products Laboratory. USA 1979.

COCHRAN, W. e COX, G. M. "Experiment Designs" 2 ed. New York, John Wiley e Sons, 1975. 611p. (A Wiley Publications in Statistics).

FRANÇA, J.L.; VASCONCELOS, A. C.; MAGALHÃES, M.H.A.; BORGES, S. M. 'Manual para publicações Técnico Científicas". 6. ed. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2003. 230P.

FUSCO, P. B.. "Estruturas de concreto: Fundamentos estatísticos da segurança das estruturas. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, EDUSP, 1976. 274 p.

HOFFMAN, R. E VIEIRA, S.. "ANÁLISE DE REGRESSÃO: UMA INTRODUÇÃO À ECONOMIA. SÃO PAULO, HUCITEC, EDUSP, 1977. 399P.

KREUZINGER, H. "Mechanically jointed Beams and Columns." In Timber Engineering Step 1. Blass, H. J., Aune. P., Choo, B.S. et al. 1995.

LEHTINEN, M. et all.. "Warping and Deformations of Plywood Panels in Constructions" -World Conference on Timber Engineering - Suíça, 1998.

LISTER, P., e LAU, K.. "Panel MSR – an on line stiffness tester for engineering wood panels." World Conference on Timber Engineering, Canadá, 2000.

NANAMI, N. et al. "Durability Assessment of Wood-framed Walls and Mechanical Properties of Plywood in Use" World Conference on Timber Engineering, Canadá, 2000.

OKABE, S.. M. et al, "Experimental Analyses for Estimating Strength and Stiffness of Shear Walls in Wood framed Construction" World Conference on Timber Engineering, Canadá, 2000.

OLIVEIRA, J. & FREITAS A.. "Painéis à Base de Madeira" Boletim Técnico do Departamento de Construção Civil. Escola Politécnica – USP. São Paulo, 1995.

OLIVEIRA, Marcos A. M. "Ligações por pinos metálicos em estruturas de madeira. 2001. 119 p. Dissertação "Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, São Paulo.

PATTON-MALLORY, Márcia; PELLICANE, Patrick J.;smith, Frederick W. "Modeling bolted connections in wood: Review". Journal of Structural Engineering, Aug. 1997, p 1054-1061.

PLERCE, J.. "Boardwalks-An Australian Perspective" -World Conference on Timber Engineering- Suíça, 1998.

SILVA; F.Jr. Jayme. "Resistência dos Materiais". Edições Engenharia e Arquitetura. ed 5. 456 p.Belo Horizonte, 1982.

SORIANO, J. "Estruturas Mistas em Concreto e em Madeira: Análise de vigas e painéis e aplicações na construção civil" Tese de Doutorado – Faculdade de Engenharia Agrícola –Universidade Estadual de Campinas, SP, 2001.

SNEDECOR, G. W.. "Statistical methods: applied to experiments in agriculture and biology". 5. ed. Aes, Iowa, The Iowa States University, 1965. 534 p.

STECK, G.. "Wood based Panels – Plywood" Timber Engenering STEP 1. 1995.

STECK, G.. “Wood based Panels – Fibreboard, particleboard and OSB” Timber Engenering STEP 1. 1995.

SUZUKI, S.. “Effects of Strand Length and Orientation on Strength Properties of OSB mada from Japanese Cedar.” World Conference on Timber Engineering, Canadá, 2000.

VAZ, J. . “Silos Verticais de Madeira Compensada” Dissertação de Mestrado. EESC – USP, São Carlos, 1997.