

**LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS DE
MADEIRA COMPOSTAS POR CHAPAS DE
MADEIRA COMPENSADA**

Guilherme Corrêa Stamato

Tese apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos, da Universidade de São
Paulo, como parte dos requisitos para
obtenção de título de Doutor em
Engenharia de Estruturas

ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlito Calil Junior

São Carlos

2002

Agradecimentos

À Universidade de São Paulo, pela minha formação e pela infra-estrutura utilizada nesse trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo suporte financeiro.

Ao professor e amigo Carlito Calil Junior, pela orientação a esse trabalho e pelos anos de companheirismo.

Ao professor Francisco Antonio Rocco Lahr e ao professor Antônio Alves Dias, pelas contribuições e pelo coleguismo nesses anos.

À todos os funcionários e colegas do LaMEM, que em todos os momentos me ajudaram na execução deste trabalho.

À indústria VIMASA, pela doação das chapas de compensado.

À BATISTELLA Indústria e Comércio LTDA, pela doação das peças de madeira maciça.

Aos meus pais e irmãos, pelo apoio e pela alegria de tê-los como família.

À Marina, pela paciência, pelo apoio e, principalmente, por tê-la a meu lado.

SUMÁRIO

Lista de figuras	i
Lista de tabelas.....	iv
Lista de abreviaturas e siglas	vii
Lista de símbolos	viii
Resumo	xi
Abstract.....	xii
1. Introdução	1
1.1. Justificativas.....	4
1.2. Objetivos.....	5
2. A Madeira Compensada.....	6
2.1. Produção do compensado	8
2.2. Propriedades do Compensado.....	9
2.3. Aplicações estruturais	15
2.4. Conclusões	17

3. Ligações por Pinos Metálicos	19
3.1. Modelos teóricos	21
3.1.1. Modelo de JOHANSEN (1949)	21
3.1.2. Método de MÖLLER (1951), apud ALMEIDA (1987).....	23
3.1.3. Método da NBR 7190:1997	24
3.2. Comportamento das ligações alma/mesa em vigas de seção composta.....	25
3.2.1 Teoria de KREUNZINGER (1995)	27
3.3. Ligações rígidas ao momento	33
3.4. Conclusões.....	42
4. Dimensionamento de vigas de seção composta com chapas de compensado	44
4.1. Dimensionamento segundo o EUROCODE 5	44
4.2. Dimensionamento segundo o Plywood Design Specifications, PDS, Supplement 2 (AMERICAN PLYWOOD ASSOCIATION, APA, 1983).....	45
4.3. Outros códigos normativos	49
5. Materiais e Métodos	51
5.1. Caracterização dos materiais	52
5.1.1. Madeira Maciça	52
5.1.2. Madeira Compensada	54
5.1.3. Pinos Metálicos.....	59
5.1.4. Ligações por pinos metálicos.....	59
5.2. Planejamento estatístico.....	62
5.2.1. Planejamento estatístico para os ensaios de vigas compostas.....	63
5.2.2. Planejamento estatístico dos os ensaios nós de pórtico	65
5.3. Ensaios de vigas compostas.....	68
5.3.1. Esquema estático dos ensaios	69
5.3.2. Instrumentação das vigas compostas.....	72
5.4. Ensaios de rigidez de ligações.....	74
5.4.1. Esquema estático dos ensaios:	77
5.4.2. Instrumentação dos CPs de nós de pórtico	77
5.4.3. Cálculo da rigidez rotacional K_r	78

6. Resultados e Discussões	79
6.1. Caracterização da madeira maciça.....	79
6.1.1. Ensaios de tração paralela.....	79
6.1.2. Ensaios de embutimento	80
6.1.3 Ensaios de compressão paralela:.....	81
6.2. Caracterização do compensado.....	83
6.2.1. Ensaios de compressão nas chapas de compensado	83
6.2.2. Tração nas chapas de compensado	86
6.2.3. Cisalhamento nas chapas de compensado.....	90
6.2.4. Embutimento nas chapas de compensado.....	92
6.3. Ensaios de ligações pregadas	96
6.4. Ensaios de vigas compostas.....	97
6.4.1. Resultados de carga×deslocamento	98
6.4.2. Resultados dos ensaios de flexão: tensões internas.	105
6.4.3. Ruptura	110
6.4.4. Conclusões dos ensaios em vigas compostas.....	113
6.5. Ensaios de nó de pórtico.....	114
6.5.1. Rigidez dos nós de pórtico.....	114
6.5.2. Modos de ruptura	130
6.5.3 Conclusões sobre os ensaios de nó de pórtico.	133
7. Conclusões.....	134
8. Bibliografia	137

Lista de figuras

Figura 1 - Posicionamento das lâminas no compensado.	7
Figura 2 - Etapas de produção das chapas de compensado - fonte - HPMA	9
Figura 3 - Composição de duas lâminas transversais - fonte: BODIG & JAYNE (1982)	12
Figura 4 - esq. Estrutura em pórtico utilizando madeira compensada - fonte: INTERNATIONAL PANEL&LUMBER (IPL). Dir .Estrutura em cúpula utilizando madeira compensada - fonte: FPI	16
Figura 5 - esq.: Estrutura de residência utilizando madeira compensada - fonte: IPL. Dir.: Pórtico composto de madeira maciça e almas em compensado construído pela CASEMA em Guaratinguetá - SP - fonte: do autor.	16
Figura 6- Esq. Hangar no Campo de Marte, São Paulo - SP, construído pela TEKNO S/A. Dir. Ginásio de esportes do São Carlos Clube, São Carlos - SP, construído pela TEKNO S/A - fonte: do autor	17
Figura 7 - Ligação com pino rígido e uma seção de corte (esq.) e ligação com pino flexível e uma seção de corte (dir.) - fonte: JOHANSEN (1949)	22
Figura 8 - Deslocamento e força de cisalhamento entre os elementos da seção composta. Fonte: KREUNZINGER (1995)	28
Figura 9 - Simbologia utilizada no desenvolvimento das equações para vigas compostas. Fonte: KREUNZINGER (1995)	29
Figura 10 - Deformações nas seções que compõem a viga. Fonte: KREUNZINGER (1995)	30
Figura 11 - Distribuição de tensões na seção transversal da viga. Fonte: KREUNZINGER (1995)	31
Figura 12 - a) Geometria do pórtico e b) e c) variações da eficiência das ligações.	34
Figura 13 - Ligações resistentes ao momento a) ligação de peças paralelas. b) ligação de peças inclinadas c) definições geométricas e forças nos pinos.	35
Figura 14 - Geometria dos modelos mais comuns de ligações rígidas ao momento, a) ligação tipo A, b) ligação tipo B.	36
Figura 15 - Ilustração do conceito de "anel de pregos". Fonte: MILNER&WOODARD(1995)	38

Figura 16 - Distribuição das tensões na cobrejunta segundo BATCHELAR, apud WOODARD (1995)	39
Figura 17 - Arranjo de ensaio de nó de pórtico. Fonte: MILNER&WOODARD (1995)	40
Figura 18 - Seções típicas de vigas compostas com compensado. Fonte: PDS (1983), suplemento2.	46
Figura 19 - Diagrama tensão×deformação específica de embutimento. Fonte: NBR 7190/97.	53
Figura 20 - Corpo-de-prova de compressão paralela em compensado. Fonte: RIBEIRO (1986)	55
Figura 21 - Corpo-de-prova de tração de compensado. Fonte: ASTM D 3500-76.	56
Figura 22 - Dispositivo para ensaios de cisalhamento em chapas de compensado. Fonte: ASTM D 2719	58
Figura 23 - Foto do dispositivo para ensaios de cisalhamento em chapas de compensado. Fonte: do autor.	58
Figura 24 - Corpos-de-prova de ligações pregadas.	60
Figura 25 - Fotos de corpos-de-prova de ligações pregadas	61
Figura 26 - Corpo-de-prova de ligação posicionado na DARTEC.	62
Figura 27 - Dimensões das vigas ensaiadas	70
Figura 28 - Montagem das vigas compostas	71
Figura 29 - Esquema estático do ensaio de vigas compostas	71
Figura 30 - Esquema estático dos ensaios de flexão nas vigas compostas.	71
Figura 31 - Montagem do ensaio em vigas compostas para a determinação do deslocamento no meio do vão.	73
Figura 32 - Posicionamento dos extensômetros elétricos e rosetas(nas fotos) nas vigas instrumentadas	73
Figura 33 - Esquema do ensaio de rigidez de ligação proposto.	74
Figura 34 - Dimensões dos corpos-de-prova de nó de pórtico	75
Figura 35 - Montagem dos corpos-de-prova de nó de pórtico.	76
Figura 36 - Dispositivos de ensaios de nó de pórtico	77
Figura 37 - Instrumentação dos CPs de nó de pórtico.	78
Figura 38 - Corpo-de-prova para a determinação do Poisson na compressão.	85
Figura 39 - Corpo-de-prova para a determinação do Poisson na tração.	89
Figura 40 - Corpo-de-prova posicionado para ensaio de cisalhamento	90
Figura 41 - Modo de ruptura característico observado no ensaio	91

Figura 42 - Gráficos comparando os valores dos primeiros carregamentos nos ensaios e os valores obtidos segundo formulações do EC5.	100
Figura 43 - Gráficos comparando os valores do segundo carregamento nos ensaios e os valores obtidos segundo formulações do EC5.	101
Figura 44 - Valores das tensões normais máximas nas vigas	107
Figura 45 - Valores das tensões de cisalhamento máximas nas vigas	108
Figura 46 - Modo de ruptura de 8 das 9 vigas rompidas	111
Figura 47 - Curva de ensaio de embutimento em chapa de compensado.	113
Figura 48 - Curva padrão deslocamento×carga	117
Figura 49 - Curva padrão tensões×carga	117
Figura 50 - Curvas carga×deslocamento referente ao relógio comparador 1.	118
Figura 51 - Figura esquemática da região de compressão entre as mesas inferiores das vigas que compõem o nó de pórtico.	120
Figura 52 - Ruptura de nó de pórtico apresentando o centro de rotação relativa entre as vigas.	120
Figura 53 - Valores do módulo de rigidez experimental e calculado.	122
Figura 54 - Modo de ruptura típico dos CPs "-1"	123
Figura 55 - Curvas de $R_M \times L/hv$	127
Figura 56 - Modos de ruptura dos corpos-de-prova 0,0a; 0,0b; 0,0c; 0,0d; 0,0e; 0,0f; +1,-1b; -1,+1.	131
Figura 57 - modos de ruptura dos corpos-de-prova +1,+1; +1,-1a; +1,-1ex; meia mísula; 0,col; -1,col e +1,col	132

Lista de tabelas

Tabela 1 - Atribuição dos valores das variáveis nos corpos-de-prova	62
Tabela 2 - Relação das características das vigas compostas ensaiadas.	65
Tabela 3 - Características dos nós de pórtico ensaiados.	68
Tabela 4 - Valores das variáveis utilizadas no cálculo da resposta (R_M) para o pórtico hipotético.	69
Tabela 5 - Resultado dos ensaios de tração	79
Tabela 6 - Resistência ao embutimento paralelo	80
Tabela 7 - Módulo de Rigidez no embutimento paralelo	80
Tabela 8 - Resistência ao embutimento normal	80
Tabela 9 - Módulo de Rigidez no embutimento normal	81
Tabela 10 - Resultados dos ensaios de compressão paralela nas peças utilizadas nas mesas das vigas compostas	82
Tabela 11 - Resultados dos ensaios de compressão paralela nas peças utilizadas nos nós de pórtico	83
Tabela 12 - Resistência à compressão paralela	84
Tabela 13 - Módulo de Elasticidade na compressão paralela	84
Tabela 14 - Resistência à compressão normal	84
Tabela 15 - Módulo de Elasticidade na compressão normal	85
Tabela 16 - Resultados dos ensaios para a determinação do Coeficiente de Poisson	85
Tabela 17 - Resistência à tração paralela	86
Tabela 18 - Módulo de Elasticidade na tração paralela	87
Tabela 19 - Resultado dos ensaios de tração paralela	87
Tabela 20 - Resistência à tração normal	88
Tabela 21 - Módulo de Elasticidade na tração normal	88
Tabela 22 - Resultados dos ensaios para a determinação do Coeficiente de Poisson	89
Tabela 23- Valores obtidos em ensaio para cálculo da resistência ao cisalhamento das chapas de compensado.	91

Tabela 24 - Valores obtidos em ensaio para cálculo do módulo de cisalhamento das chapas de compensado	91
Tabela 25 - Resistência ao embutimento paralelo	93
Tabela 26 - Módulo de deslizamento no embutimento paralelo.	93
Tabela 27 - Resistência ao embutimento normal às fibras	94
Tabela 28 - Módulo de deslizamento no embutimento normal	95
Tabela 29 - Rigidez das ligações referentes às vigas de seção I (Vigas 1 e 2)	96
Tabela 30 - Rigidez das ligações referentes às vigas de seção caixão, com alma de 8,5x4cm (Vigas 3 e 4)	96
Tabela 31 - Rigidez das ligações referentes às vigas de seção caixão, com alma de 11,3x4cm (Vigas de 5 a 10)	96
Tabela 32 - Rigidez e resistência de ligações com pregos de 3,0mm (V3mm e nós de pórtico)	97
Tabela 33 - Valores das flechas obtidas nos ensaios de vigas composta	98
Tabela 34 - Flechas teóricas para a segunda condição.	100
Tabela 35 - Variação proporcional entre as flechas dos ensaios e as flechas teóricas.	102
Tabela 36 - Correlações para variações entre as flechas calculadas considerando rigidez K_i e os ensaios (carregamentos iniciais).	102
Tabela 37 - Correlações para variações entre as flechas calculadas considerando rigidez K_e e os ensaios (segundo carregamentos).	103
Tabela 38 - Correlações para variações entre as flechas calculadas considerando rigidez K e os ensaios (segundo carregamento).	103
Tabela 39 - Correlações para variações entre as flechas calculadas considerando rigidez K_{lig} e os ensaios (segundo carregamento).	104
Tabela 40 - Resultado das tensões atuantes dos ensaios e teóricas	106
Tabela 41 - Valores de tensões e flechas calculados segundo os critérios do EUROCODE 5.	107
Tabela 42 - Variação proporcional entre os resultados teóricos e experimentais.	109
Tabela 43 - Resultados da vigas V3mm	110
Tabela 44 - Cargas de ruptura nos ensaios e valores das tensões estimadas pelo EC5 para esse carregamento	111
Tabela 45 - Valores de carga, deslocamentos e tensões atuantes obtidos nos ensaios de nó de pórtico.	115
Tabela 46 - Valores das deformações nos nós de pórticos lidas nos extensômetros elétricos.	116

Tabela 47 - Módulos de rigidez rotacional obtidos nos ensaios	119
Tabela 48 - Valores dos módulos de rigidez, carga de ruptura, módulo de rigidez rotacional calculados e de ensaio.	121
Tabela 49 - Valores de β_r referentes a cada ligação de nó de pórtico ensaiada.	125
Tabela 50 - Valores de R_M referentes a cada ligação de nó de pórtico ensaiada.	126
Tabela 51 - Combinação de variáveis e resposta para análise estatística, considerando valores de R_M referentes à $L/H = 10$.	127
Tabela 52 - Valores obtidos na análise de regressão múltipla.	129

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

APA – American Plywood Association

BS – British Standards

AS – Australian Standard

ASTM – American Society for Testing And Materials

CCA – Cobre-Cromo-Arsênico

CP – Corpo-de-prova

DIN - Deutesch Institut für Normung (instituto alemão de normalização)

EC5 – Eurocode 5

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations

FPI – Finnish Plywood International,

HPMA – Hardwood Plywood Manufacturers Association

LaMEM – Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira

LVL – Laminated Veneer Lumber

NBR – Norma Brasileira Registrada

OSB – Oriented Strand Board

PAA – Plywood Association of Australia

PDS – Plywood Design Specifications

SAA – Standards Association of Australia

SET – Departamento de Engenharia de Estruturas

Lista de símbolos

Letras Maiúsculas

A – área.

A_{mesa} – área de mesa.

C – matriz de flexibilidade.

E – módulo de Elasticidade Longitudinal.

E_{c0} – módulo de Elasticidade Longitudinal na compressão paralelo às fibras da madeira

E_{c90} – módulo de Elasticidade Longitudinal na compressão normal às fibras da madeira

$E_{\perp 0}$ – módulo de Elasticidade Longitudinal na tração paralelo às fibras da madeira

$E_{\perp 90}$ – módulo de Elasticidade Longitudinal na tração normal às fibras da madeira

EI_{ef} – módulo de rigidez efetiva.

F_i – Força no pino.

$F_{M,j}$ – força no pino j.

F_t – resistência à tração de cálculo do compensado.

G – Módulo de Elasticidade Transversal.

G_C – comprimento da cobrejunta ao longo da coluna.

G_L – comprimento da linha das tensões críticas.

G_R – comprimento da cobrejunta ao longo da viga.

H_c – altura da coluna do pórtico.

I – inércia.

I_{ef} – inércia efetiva.

I_t – inércia total.

K – módulo de deslizamento ou módulo de rigidez.

K_e – módulo elástico de rigidez ao embutimento.

K_{emb} – módulo de rigidez elástico no embutimento.

K_i – módulo inicial de rigidez ao embutimento.

K_{lig} – módulo de rigidez obtido nos ensaios de ligação.

K_{NBR} – módulo de rigidez no embutimento segundo o anexo B da NBR 7190:1997.

K_r – rigidez à rotação da ligação.

- K_s – módulo básico.
 K_{ser} – módulo de rigidez em serviço (para estado limite de utilização).
 L – vão da viga, comprimento de cisalhamento de uma das arestas do CP (cm).
 L_C – altura da coluna.
 L_N – comprimento da mesa sob a cobrejunta.
 M – momentos, momento total de cálculo na ligação.
 M_{cs} – momento de cálculo na interface da alma cobrejunta com a viga.
 M_j – momento na ligação real.
 M_{ics} – momento ao longo da seção das tensões críticas.
 M_{np} – momento fletor de plastificação do prego.
 M_∞ - momento referente a uma ligação hipotética de rigidez infinita.
 N – força normal.
 N_{pregos} – número de pregos necessário para cada mesa, para cada lado da ligação.
 Q – máxima força resistida pelo prego.
 R – força resistida pela ligação.
 R_H – reação horizontal na ligação.
 R_M – relação entre M_j e o momento de uma ligação perfeitamente rígida.
 $R_{vd,1}$ – resistência de um pino.
 S – matriz de rigidez.
 T – matriz de transformação para rotação dos eixos x e y em torno de z .
 V – forças cortantes.
 $X1, X2, X3$ – variáveis consideradas na análise estatística.
 Z – razão de deformação no cisalhamento, tomada v - velocidade do carregamento no ensaio.

Letras Minúsculas

- a – direção local de cada lâmina que compõe a chapa paralelo à direção das fibras, distância entre os eixos de massa dos elementos que compõem a seção.
 a_b – flecha devida à flexão.
 a_s – flecha devida ao cisalhamento.
 a_t – flecha total.
 b – direção local de cada lâmina que compõe a chapa perpendicular à direção das fibras.
 c – distância das cargas em relação aos apoios.
 d – diâmetro do pino metálico, altura total da seção da viga, altura da seção composta.
 d_N – distância entre as linhas de pregos das mesas.

- f_{c0} – resistência à compressão paralela às fibras
 f_{c90} – resistência à compressão normal às fibras
 f_e – resistência ao embutimento da madeira.
 f_{e0} – resistência ao embutimento da madeira paralelo às fibras.
 f_{e90} – resistência ao embutimento da madeira normal às fibras.
 f_{ed} – resistência ao embutimento da madeira, valor de cálculo.
 $f_{e,est}$ – resistência ao embutimento estimada.
 f_{t0} – resistência à tração paralela às fibras
 f_{t90} – resistência à tração normal às fibras
 f_y – resistência ao escoamento.
 h_0 – altura da lâmina na direção paralela às fibras da lâmina de face.
 h_{90} – altura da lâmina na direção perpendicular às fibras da lâmina de face.
 h_{mesa} – distância entre centros geométricos das mesas.
 h_v – altura das vigas.
 k – coeficiente para cálculo das deformações da viga devidas ao cisalhamento (PDS).
 p – carga distribuída.
 q – carga uniformemente distribuída.
 q_u – carga distribuída última.
 r_j – distância do pino j ao centro de rotação.
 s – espaçamento entre pinos metálicos.
 t – espessura da peça interna da ligação, espessura total da alma.
 t_{alma} – espessura da alma.
 t_{eff} – espessura efetiva de uma cobrejunta.
 t_f – espessura das mesas da viga.
 u – deslocamento relativo entre os elementos da seção no contato entre a mesa e a alma.
 u_1, u_2 – deslocamentos longitudinais nos eixos das peças 1 e 2, x – direção longitudinal, distância do ponto de cortante máxima à face livre da ligação (Johansen).
 v – força cisalhante.
 w' – inclinação na seção devido à flexão.
 w_i – deformação inicial.
 $w_{i,mod}$ – deformação inicial modificada.
 w_e – deformação elástica.
 y – direção transversal.
 z – distância do ponto de cortante zero à interface da ligação (Johansen).

Resumo

As estruturas de madeira compostas com alma em compensado já vem sendo amplamente utilizadas em diversos países onde as estruturas de madeira estão tecnologicamente mais desenvolvidas, oferecendo aos engenheiros civis mais uma opção de sistema construtivo eficiente, seguro e duradouro. Nesse trabalho são apresentados estudos teóricos e experimentais referentes às estruturas de madeira compostas utilizando compensado nas almas, e em especial as estruturas cuja ligação alma mesa é feita por pinos metálicos. O objetivo desse trabalho é desenvolver critérios de dimensionamento dessas estruturas para serem aplicados no Brasil. Vários critérios de dimensionamento de elementos compostos foram encontrados na bibliografia, alguns com simplificações que desconsideram efeitos de composição parcial e outros mais completos, que consideram deformações por cisalhamento, composição parcial etc. Com os resultados dos ensaios de vigas compostas pregadas foi possível comparar valores experimentais com resultados teóricos, concluindo-se que os critérios de dimensionamento do EUROCODE 5 são adequados. Os ensaios de rigidez de nó de pórtico de seção composta permitiram o desenvolvimento de metodologia para o cálculo da rigidez dessas ligações, visto que não existe formulação equivalente na bibliografia internacional. Conclui-se que as ligações por pinos metálicos apresentam boa eficiência para serem utilizadas nas seções compostas com alma em compensado. As ligações de nó de pórtico com ligação alma/mesa pregadas podem ser consideradas rígidas na maioria dos casos estudados.

Palavras chave: estruturas de madeira, ligações, rigidez, seções compostas, compensado, normalização.

Abstract

Plywood webbed structures have been applied in at several countries where timber structures are commonly used, giving civil engineers and builders one more option when looking for a safe, efficient and durable construction system. This work presents theoretical and experimental studies about plywood-webbed structures, with emphasis on nailed plywood webbed structures. The aim of this work is to develop design criteria for these structures to be used in Brazil. Several design criteria were found in the bibliography, some of them using simplifications for shear deflexions and joint deformations. Experimental results of nailed plywood webbed beams were compared with theoretical values from formulations found in the bibliography, concluding that EUROCODE 5 gives the best design criteria for nailed composite beams. Based on plywood webbed knee joints tests, a methodology to calculate the joint rigidity was proposed. The conclusions show the efficiency of this system and that nailed plywood webbed knee joints can be considered fixed for the majority of the specimens tested.

Keywords: Timber structures, Joints, Knee joints, Rigidity, plywood webbed beams, plywood, standardization.

1. Introdução

A construção civil no Brasil mostra-se carente de soluções tecnológicas que permitam unir segurança, qualidade, beleza, conforto, custo e durabilidade. Em oposição a esse cenário o Brasil é um dos maiores produtores de madeira compensada do mundo (2,42 milhões de m³ por ano, segundo o FAO Yearbook(2000)), exportando produtos de qualidade para diversos países desenvolvidos utilizarem na construção civil, enquanto a maior utilização estrutural desse material no País se restringe à estruturas provisórias, como por exemplo formas para concreto, desperdiçando o grande potencial das estruturas compostas com compensado como alternativa para outras estruturas de madeira e para algumas estruturas de concreto e aço.

Durante todo o século XX, enquanto a indústria brasileira surgiu e se desenvolveu, as siderúrgicas foram instaladas e delas saíram as estruturas metálicas, que mais adiante se desenvolveram e criaram soluções como as estruturas em chapas dobradas, ou no caso do concreto, que se desenvolveu pelo concreto protendido, pelo concreto pré-moldado e pelo concreto de alto desempenho, entre outras novidades da engenharia.

Já as estruturas de madeira, que têm sido utilizadas no Brasil há muitos anos, muitas vezes sem um correto planejamento, têm carregado o estigma de serem estruturas caras, que demandam grande manutenção, e, devido à sua larga utilização por pessoas sem qualificação, carrega como ônus dessa má utilização a imagem de material que dura pouco, apodrece, é atacado por insetos, etc.. Salvo célebres exceções, as estruturas de madeira ainda são construídas como a cem anos atrás.

Em muitos outros países, junto com o desenvolvimento de soluções estruturais em concreto, aço e outros materiais, surgiram diversas tecnologias para a utilização da madeira como elemento estrutural, seja na sua forma bruta, seja processado industrialmente gerando outros produtos. Entre esses produtos podemos destacar as chapas de madeira bidirecional ou compensado, a madeira laminada colada, as chapas laminadas unidirecionais (Laminated

Veneer Lumber, ou LVL), e mais recentemente os painéis de flocos direcionados (Oriented Strand Board, ou OSB).

No Brasil, porém, poucas são as indústrias que produzem a madeira laminada colada, a produção de OSB está se iniciando e não existem no mercado nacional produtos como o LVL, diminuindo a possibilidade de se utilizar tais tecnologias no País a curto prazo. Por outro lado, o Brasil é um dos maiores produtores de chapas de compensado do mundo, tendo grande participação no mercado externo, inclusive no que se refere a chapas de qualidade para compor elemento de estruturas permanentes, como vigas, painéis de piso, pilares, etc.

Nesse contexto, observando a grande demanda por parte da indústria da construção civil por novas soluções que se enquadrem nos conceitos de industrialização, agilidade na construção, versatilidade, custo, beleza, segurança, durabilidade, etc., as estruturas de madeira e de derivados da madeira possuem um grande potencial para preencher essa lacuna. Dentre esses, o sistema construtivo utilizando elementos compostos com alma em compensado tem um grande potencial para impulsionar as estruturas de madeira dentro dos conceitos mais modernos, tendo a versatilidade de poder ser executado no canteiro de obras ou pré-fabricado em indústrias, possui grande oferta de material no mercado nacional, sua execução é bastante ágil, e, além dessas vantagens, a substituição do compensado nesse sistema construtivo por LVL ou OSB é simples do ponto de vista de dimensionamento, bastando determinar as características de resistência e rigidez desses novos materiais quando esses estiverem disponíveis comercialmente no País.

Para o desenvolvimento desse sistema construtivo, são essenciais a produção e divulgação de critérios de dimensionamento desses elementos para os profissionais da área. Para o desenvolvimento desses critérios, ainda são necessárias pesquisas tanto bibliográficas, já que existem normas estrangeiras que apresentam critérios para esse dimensionamento, quanto experimentais, a fim de se avaliar o comportamento dessas estruturas em algumas situações não apresentadas por tais normas.

Esse trabalho visa fornecer parâmetros para o desenvolvimento desse sistema estrutural em seção composta com madeira maciça e compensado. Dentre as pesquisas mais importantes dentro deste assunto está o estudo do comportamento das ligações, tanto da ligação alma-mesa, quanto das ligações de nós de pórtico.

Devido ao desenvolvimento de novos materiais, sistemas construtivos e sistemas estruturais, os estudos das ligações entre os elementos na estrutura têm sido importante para o aperfeiçoamento dos critérios de dimensionamento, já que a transmissão dos esforços e as deformações na estrutura dependem do comportamento dessas ligações.

Com a evolução dos computadores e das técnicas e programas computacionais o cálculo dos esforços e deformações tornaram-se mais precisos, implementando alguns requintes de cálculo que antes eram aproximados devido à inviabilidade de serem considerados num dimensionamento manual. Com isso tem sido bastante estudada atualmente a rigidez das ligações de nó de pórtico, que antes era considerada no cálculo simplesmente como rótula perfeita ou engastamento perfeito, e que agora já pode ser calculada como semi-rígida, aproximando o cálculo das tensões com o comportamento real da estrutura. Conhecendo-se melhor a distribuição das tensões pode-se dimensionar uma estrutura de modo mais econômico.

Este trabalho apresenta uma ampla pesquisa bibliográfica a respeito do dimensionamento das estruturas compostas com alma em compensado, das ligações por pinos metálicos e da rigidez de ligações. Além de um estudo a respeito da madeira compensada, sua produção e propriedades físicas.

No estudo experimental, foram caracterizados os lotes de madeira e de compensado utilizados na pesquisa segundo as normas brasileiras vigentes, bem como alguns ensaios adaptados da NBR 7190:1997 para determinação de propriedades do compensado e ensaios de cisalhamento de chapa especificado pela ASTM. A madeira maciça utilizada nos ensaios foram doadas pela BATISTELLA Indústria e Comércio de Madeiras e as chapas de compensado foram doadas pela VIMASA .

Foram ensaiados elementos estruturais de vigas e de nós de pórtico a fim de avaliar os critérios de dimensionamento adotados por códigos normativos e de propor soluções para dimensionamento da rigidez de nó de pórticos de estruturas compostas com alma em compensado, já que esse dimensionamento não foi encontrado na bibliografia nacional ou internacional.

Finalmente, com base no estudo bibliográfico teórico e experimental realizados foram propostas recomendações para o projeto e dimensionamento dessas estruturas.

1.1. Justificativas

As estruturas compostas pregadas com alma em compensado consistem em um sistema construtivo simples e eficiente, que utiliza materiais largamente produzidos no País. Esse sistema se apresenta como uma ótima alternativa para a modernização das estruturas de madeira no País, e para isso devem ser utilizados critérios de dimensionamentos específicos para essas estruturas, o que não consta na atual norma brasileira de “Projeto de Estruturas de Madeira” NBR 7190:1997.

Para a compreensão do comportamento das seções compostas é necessário o entendimento das ligações entre os elementos que compõem a seção. Pensando-se na evolução desse tipo de estruturas no Brasil, entende-se que é importante o estudo das ligações alma-mesa pregadas ou parafusadas, pois essas ligações podem ser mais facilmente executadas em canteiros de obra, não necessitando de infra estrutura industrial para sua produção. O estudo do comportamento dessas ligações permite o melhor dimensionamento das deformações finais das peças, portanto essenciais para o dimensionamento nos Estados Limites de Utilização das estruturas.

A ligação de nó de pórtico também precisa ser bastante estudada, já que esse sistema construtivo tem grande potencial para a construção de pórticos industriais, rurais ou residenciais. Para o dimensionamento desses pórticos é importante a escolha do modelo estático (bi-articulado, tri-articulado, etc.), e para a correta análise da distribuição das tensões pela estrutura é importante conhecer a rigidez de cada nó. Além da distribuição de tensões, a rigidez dos nós influencia também as deformações na estrutura. Assim, o comportamento das ligações de nós de pórtico é tão importante na análise dos Estados Limites de Utilização quanto dos Estados Limites Últimos. O estudo da rigidez das ligações vem se intensificando há algum tempo em todos os tipos de materiais; concreto, aço, madeira maciça, MLC, etc., porém essa lacuna ainda é muito grande nas estruturas compostas com compensado mesmo no âmbito internacional, demandando mais estudos a esse respeito.

1.2. Objetivos

Objetivo geral:

Fornecer critérios de dimensionamento de estruturas de madeira compostas com chapas de compensado. Este estudo fornecerá subsídios para a normalização dos critérios de dimensionamento deste tipo de estrutura, ainda não referida na norma da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7190:1997 “Projeto de Estruturas de Madeira”.

Objetivos específicos:

- Definir critérios de dimensionamento de vigas compostas de madeira maciça e compensado pregadas;
- Definir critérios de dimensionamento de rigidez de ligações em pórticos de seção composta de madeira maciça e compensado.

2. A Madeira Compensada

A utilização da madeira compensada como elemento permanente de estruturas de madeira ainda é pouco difundida no Brasil, apesar de possuir um grande parque produtor de chapas de compensado instalado no país. O estudo desse material como alternativa para as construções correntes em madeira ainda é recente no Brasil, porém já se apresenta como uma interessante possibilidade para a atualização dos métodos construtivos aqui empregados, abrindo espaço para a industrialização dessas estruturas e, conseqüentemente, fornecendo novas alternativas para o mercado da construção civil.

Devido ao pequeno número de estudos sobre o uso estrutural da madeira compensada e ao fato de as pesquisas nessa área serem bastante recentes, algumas informações a respeito desse material são apresentadas a seguir. Dentro deste trabalho será muito importante o conhecimento das características estruturais da madeira maciça, porém, julgando que as bases do comportamento da madeira maciça estão suficientemente estudadas e divulgadas nos meios técnicos, esses não serão repetidos nesse texto.

A madeira compensada, ou simplesmente compensado, é um derivado da madeira, composto por finas lâminas unidas por adesivo, sendo uma lâmina posicionada sempre perpendicular à lâmina adjacente. Sua composição com lâminas a 90°, também chamada laminação cruzada, permite uma melhor distribuição das propriedades da madeira, visto que as propriedades de resistência e rigidez da madeira maciça na direção das fibras são muito maiores que na direção normal às fibras. Assim, essa laminação cruzada confere ao compensado altas resistências tanto ao longo quanto através das fibras, tornando-o mais resistente ao cisalhamento, ao fendilhamento e ao impacto do que a madeira maciça.

O produto final obtido é um compósito à base de madeira, com fibras em duas direções perpendiculares entre si, e, portanto, com boa resistência e rigidez nessas duas direções.

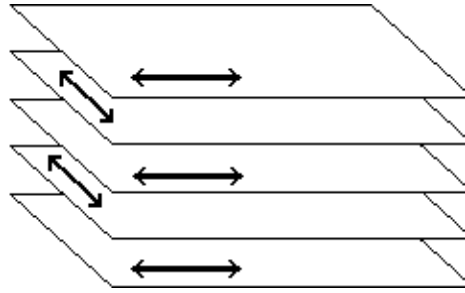


Figura 1 - Posicionamento das lâminas no compensado.

Para se entender o comportamento do compensado é necessário se conhecer o modo como é produzido, ou seja, a madeira utilizada como matéria prima, o adesivo e o processo de produção. O item 2.1 a seguir apresenta reduzidamente os procedimentos de produção do compensado.

O comportamento estrutural do compensado é apresentado no item 2.2., onde é apresentado um desenvolvimento teórico para a determinação das propriedades de rigidez, baseado em estudo na bibliografia, onde os parâmetros elásticos do compensado são determinados em função de parâmetros elásticos conhecidos das lâminas e, conhecidos os parâmetros da chapa nas direções longitudinal e transversal, são determinados os parâmetros para qualquer direção inclinada em relação a esses eixos.

Uma vantagem da utilização de compostos laminados de madeira é que defeitos naturais da madeira maciça, tais como nós, rachaduras e canais de resina, podem ser evitados quando as toras são cortadas em finas lâminas e depois coladas umas sobre as outras, reconstituindo o material. (RANTA-MAUNUS,1995). No item 2.3 são apresentadas as propriedades resultantes das chapas em relação à durabilidade, trabalhabilidade, características de resistência etc.

Outra vantagem do compensado é a possibilidade de se produzir chapas de grandes dimensões, a partir de toras de pequena seção, possibilitando a construção de grandes estruturas a partir de árvores de pequena idade. No item 2.4. são apresentadas algumas aplicações estruturais do compensado, ilustradas com alguns exemplos encontrados na bibliografia.

2.1. Produção do compensado

Os compensados estruturais em geral são produzidos com lâminas de madeiras de baixa ou média densidade, e em geral utilizando apenas lâminas da mesma espécie de madeira na composição das chapas. A figura 2 apresenta esquematicamente a produção de compensado. Resumidamente, o processo de produção do compensado se inicia com a escolha da árvore, que deve fornecer toras cilíndricas, com o mínimo de conicidade e tortuosidade.

Após o corte, a tora é descascada e passa por um banho de vapor ou algum processo semelhante para o amolecimento das fibras da madeira, o que facilita a laminação, diminuindo a ocorrência excessiva de fissuras durante o corte. No caso de compensados estruturais, a laminação da tora é realizada por meio de corte em torno rotativo, onde a tora gira em torno de um eixo e sua borda é cortada por uma faca fixa.

Após esse processo de "desenrolar" a tora, as lâminas são classificadas, sendo eliminadas as regiões defeituosas. As lâminas então são cortadas nas dimensões padronizadas e passam por uma secagem em estufa. Após essa secagem é feita a junção das lâminas (no caso das lâminas internas). As lâminas então recebem o adesivo e são posicionadas nas prensas para a colagem, sendo normalmente essa prensagem feita em alta temperatura devido ao adesivo utilizado e para diminuir o tempo necessário de prensagem. Recomenda-se para o uso em estruturas permanentes a utilização de compensados tratados com preservantes e produzidos com adesivos de base fenólica, que são a prova d'água.

Após a prensagem, a chapa passa por um esquadrejamento para garantir a precisão das medidas comerciais e por lixas para dar acabamento nas bordas e superfície.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) apresenta algumas normas que especificam as dimensões, suas tolerâncias e as condições específicas a serem seguidas para classificação das chapas de compensado. As dimensões comerciais em que devem ser produzidas as chapas de compensado, segundo a NBR 9532/86, "Chapas de madeira compensada – Especificações", é de 2440mm por 1220mm, com as espessuras: 4, 6, 9, 12, 15, 18 e 21. Porém existem algumas medidas já consagradas no mercado e que continuam a ser produzidas:

Compensado de uso geral: 1,60m×2,20m, com espessuras: 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 18, 20, 25, e 30 mm;

Formas para concreto: 1,22×2,44m ou 1,10×2,20m com espessuras: 6,10,12,14,17 e 20 mm.

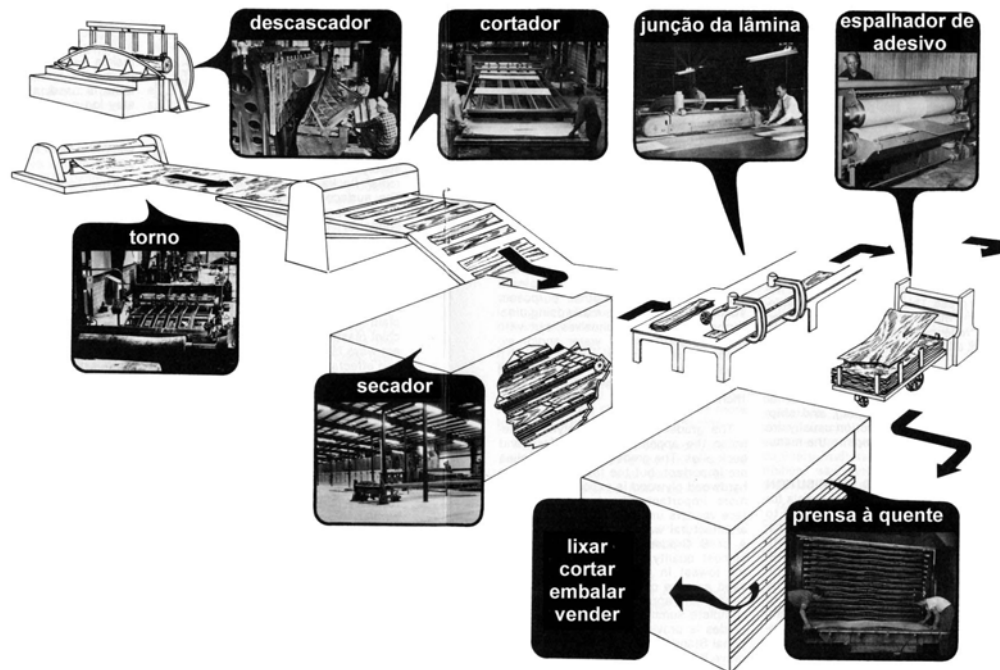


Figura 2 - Etapas de produção das chapas de compensado - fonte - HPMA

2.2. Propriedades do Compensado

Por ser um material composto, as propriedades elásticas do compensado estão diretamente relacionadas com o material que a compõe. BODIG & JAYNE (1982), porém, afirmam que a influência de lâmina de cola nas propriedades elásticas é desprezível, sendo o comportamento do compensado definido exclusivamente pelas propriedades das lâminas de madeira. Cabe ainda ressaltar que a lâmina de cola deve ter resistência igual ou superior à da madeira, pois o comportamento estrutural do compensado depende da perfeita união entre as lâminas.

A seguir são apresentadas as leis constitutivas para as chapas de compensado, obtidas relacionando as propriedades finais da chapa com das lâminas que a compõe. Nesse desenvolvimento foi desprezada a influência da lâmina de cola nas propriedades elásticas do

compensado. Para o desenvolvimento da relação constitutiva das chapas de madeira compensada, partiu-se da lei de Hooke particularizada para o estado plano de tensões:

$$\{\varepsilon\} = [S] \times \{\sigma\} \quad \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{array} \right\} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \left\{ \begin{array}{l} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{array} \right\} \quad (2.1)$$

Sendo a matriz de compliança [S]:

$$S_{11} = 1/E_x \quad S_{22} = 1/E_y \quad S_{66} = 1/G_{xy}$$

$$S_{12} = S_{21} = -\nu_{xy}/E_x = -\nu_{yx}/E_y$$

Nesse texto x e y foram utilizados como índices referentes às direções longitudinal e transversal da chapa de compensado, respectivamente. Em geral a direção longitudinal do compensado é definida como a direção das fibras das lâminas externas da chapa. Os índices \underline{a} e \underline{b} utilizados mais adiante se referem às direções locais de cada lâmina que compõe a chapa, sendo \underline{a} o eixo paralelo à direção das fibras e \underline{b} perpendicular a esse, no plano da lâmina.

Partindo de uma situação onde todas as lâminas em determinada direção são da mesma espécie de madeira, situação essa bastante utilizada, pois é necessário manter a simetria das propriedades elásticas das lâminas em relação ao eixo médio da espessura da chapa, pode-se escrever as matrizes dos coeficientes de elasticidade $[C]^0$ e $[C]^{90}$, que representam as propriedades das lâminas a 0° e a 90° como:

$$[C]^0 = \begin{bmatrix} C_{11}^0 & C_{12}^0 & 0 \\ C_{21}^0 & C_{22}^0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{66}^0 \end{bmatrix} \quad [C]^{90} = \begin{bmatrix} C_{11}^{90} & C_{12}^{90} & 0 \\ C_{21}^{90} & C_{22}^{90} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66}^{90} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Assim, correlacionando-se as propriedades das lâminas com as da chapa de compensado, a matriz [C] apresentada possui as seguintes componentes:

$$C_{11} = \left(\frac{C_{11}^0 h_0 + C_{11}^{90} h_{90}}{h} \right) \quad C_{12} = C_{21} = \left(\frac{C_{12}^0 h_0 + C_{12}^{90} h_{90}}{h} \right)$$

$$C_{22} = \left(\frac{C_{22}^0 h_0 + C_{22}^{90} h_{90}}{h} \right) \quad C_{66} = \left(\frac{C_{66}^0 h_0 + C_{66}^{90} h_{90}}{h} \right) \quad (2.3)$$

Onde h é a espessura total da chapa, h_0 a soma das espessuras das lâminas com fibras paralelas às fibras das lâminas de face e h_{90} a soma das espessuras das lâminas com fibras perpendiculares às fibras das lâminas de face. Algumas simplificações podem ser feitas para os compensados convencionais. Primeiramente, considerando todas as lâminas compostas do mesmo material:

$$C_{11}^0 = C_{22}^{90} \quad C_{22}^0 = C_{11}^{90} \quad C_{12}^0 = C_{21}^0 = C_{21}^{90} = C_{12}^{90} \quad C_{66}^0 = C_{66}^{90}$$

Os valores de $[C]$ passam a ser:

$$\begin{aligned} C_{11} &= \left(\frac{C_{11}^0 h_0 + C_{22}^0 h_{90}}{h} \right) & C_{12} = C_{21} &= \left(\frac{C_{12}^0 h_0 + C_{12}^0 h_{90}}{h} \right) \\ C_{22} &= \left(\frac{C_{22}^0 h_0 + C_{11}^0 h_{90}}{h} \right) & C_{66} &= \left(\frac{C_{66}^0 h_0 + C_{66}^0 h_{90}}{h} \right) \end{aligned} \quad (2.4)$$

Considerando-se agora um compensado “equilibrado”, ou seja, a soma das espessuras das lâminas em uma direção é igual à soma na outra direção ($h_0=h_{90}$) as componentes $[C]$ podem ser escritas por:

$$\begin{aligned} C_{11} &= \left(\frac{C_{11}^0 + C_{22}^0}{2} \right) & C_{22} &= \left(\frac{C_{22}^0 + C_{11}^0}{2} \right) \\ C_{12} = C_{21} &= C_{12}^0 & C_{66} &= C_{66}^0 \end{aligned} \quad (2.5)$$

Aplicando-se os valores das componentes de $[C]$ às lâminas à 0° , considerando a simetria da matriz $[S]$: $\nu_{ba}/E_b = \nu_{ab}/E_a$, os elementos da matriz $[C]$ podem ser simplificados como:

$$[C] = A \times \begin{bmatrix} E_a^0 + E_b^0 & 2\nu_{ba}E_a^0 & 0 \\ 2\nu_{ba}E_a^0 & E_a^0 + E_b^0 & 0 \\ 0 & 0 & 2(1-\nu_{ab}\nu_{ba}) \end{bmatrix} \quad \text{Onde } A = \frac{1}{2(1-\nu_{ab}\nu_{ba})} \quad (2.6)$$

Com esse desenvolvimento, tem-se a matriz de propriedades elásticas $[C]$ da chapa de compensado em função das propriedades elásticas das lâminas que a compõe. Consequentemente encontra-se a matriz de rigidez $[S]$, já que $[S] = [C]^{-1}$. Como já mencionado, essa correlação é um importante instrumento para auxiliar o processo produtivo, permitindo um maior controle das propriedades finais do compensado.

Devido à composição do compensado por lâminas perpendiculares entre si, a variação do módulo de elasticidade em direções inclinadas em relação às fibras não se comporta como na madeira maciça, que possui apenas uma direção de fibras. A figura 3 apresenta, em linha cheia, a variação do módulo de elasticidade médio de composição de duas lâminas de madeira de mesma espécie e espessura, baseada na variação do módulo de elasticidade destas lâminas. Observa-se que os valores mínimos de E ocorrem à 45° com os eixos longitudinal e transversal.

Para a utilização de programas de análise numérica para avaliação do comportamento do compensado, é necessário avaliar se a transformação de coordenadas convencional é capaz de prever esse comportamento.

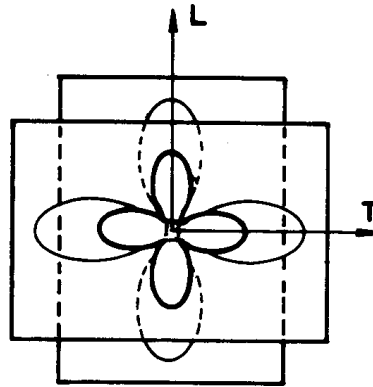


Figura 3 – Composição de duas lâminas transversais – fonte: BODIG & JAYNE (1982)

Considerando que os valores da matriz de rigidez [S] para as diversas inclinações em relação às fibras podem ser obtida utilizando matrizes de transformações convencionais, da transformação das coordenadas têm-se:

$$\{\bar{\sigma}\} = [T]\{\sigma\} \quad \text{e} \quad \{\bar{\varepsilon}\} = [T]\{\varepsilon\} \quad (2.7)$$

Onde [T] é a matriz de transformação para rotação dos eixos x e y em torno de z, dada por: (BODIG & JAYNE, 1982)

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2\sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2\sin \theta \cos \theta \\ -2\sin \theta \cos \theta & 2\sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Desenvolvendo-se esses equacionamentos, obtém-se as seguintes relações entre as propriedades de rigidez na nova direção e as propriedades nas direções originais x,y:

$$\frac{1}{E_{x,\theta}} = \frac{\cos^4 \theta}{E_x} + \left(\frac{1}{G} - \frac{2\nu_{xy}}{E_x} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{\sin^4 \theta}{E_y}$$

$$\frac{1}{E_{y,\theta}} = \frac{\sin^4 \theta}{E_y} + \left(\frac{1}{G} - \frac{2\nu_{yx}}{E_y} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{\cos^4 \theta}{E_x}$$

$$\frac{1}{G_\theta} = \frac{1}{G} + \left(\frac{1+\nu_{xy}}{E_x} + \frac{1+\nu_{yx}}{E_y} - \frac{1}{G} \right) \sin^2 2\theta$$

$$\nu_{xy,\theta} = E_{x,\theta} \left[\frac{\nu_{xy}}{E_x} - \frac{1}{4} \left(\frac{1+\nu_{xy}}{E_x} + \frac{1+\nu_{yx}}{E_y} - \frac{1}{G} \right) \sin^2 2\theta \right]$$

$$\nu_{yx,\theta} = \nu_{xy,\theta} \frac{E_{y,\theta}}{E_{x,\theta}}$$

$$\eta_{x,\theta} = E_{x,\theta} \left[\frac{\sin^2 \theta}{E_y} - \frac{\cos^2 \theta}{E_x} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{G} - \frac{2\nu_{xy}}{E_x} \right) \cos 2\theta \right] \sin 2\theta$$

$$\eta_{y,\theta} = E_{y,\theta} \left[\frac{\cos^2 \theta}{E_y} - \frac{\sin^2 \theta}{E_x} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{G} - \frac{2\nu_{yx}}{E_x} \right) \cos 2\theta \right] \sin 2\theta$$

Onde $E_{x,\theta}$, $E_{y,\theta}$ são os módulos de Young, ν_{xy}, ν_{yx} os coeficientes de Poisson, G_θ o módulo de cisalhamento nas novas direções. η_x e η_y são chamados por LEKHNITSKII (1956) de coeficientes de influência múltipla, e desaparecem nos eixos principais.

Observa-se que para os eixos longitudinal e transversal do compensado, ou seja, quando $\theta = 0^\circ$ ou $\theta = 90^\circ$, resulta em $\sin 2\theta = 0$, conseqüentemente $\eta_x = \eta_y = 0$.

Algumas propriedades do compensado apresentam diferenças em relação às da madeira maciça, além disso, existe algum preconceito no que se refere à utilização do compensado como elemento estrutural permanente em uma estrutura.

As propriedades de resistência e rigidez da madeira compensada podem ser influenciadas pelos seguintes fatores:

- fatores geométricos (número e espessuras das lâminas; composição)
- material (espécie de madeira; teor de umidade)

- fatores de carga (tipo de carregamento; direção das tensões em relação às fibras das lâminas de face do compensado; duração da carga)
- ambientais (fogo)

No caso de flexão, é importante diferenciar flexão perpendicular ao plano do painel de flexão no plano do painel, pois a laminação cruzada confere ao compensado boa resistência à tração e à compressão no plano da chapa, tanto na direção longitudinal quanto na direção normal às fibras da lâmina de face, compensando a baixa resistência à tração e à compressão que a madeira maciça apresenta na direção normal às fibras, porém tensões de tração perpendiculares ao plano do painel devem ser evitadas. Tensões de compressão perpendiculares ao plano do painel de compensado resultam em deformações menores que na madeira maciça da mesma espécie utilizada como matéria prima da chapa, devido à contribuição do adesivo.

A resistência ao cisalhamento no plano da chapa de compensado é superior à resistência ao cisalhamento da madeira maciça, pois, devido à laminação cruzada, esforços tangenciais sempre serão resistidos por fibras em duas direções, ortogonais entre si. Na madeira maciça existe uma única direção das fibras, ocorrendo uma direção preferencial de ruptura por cisalhamento onde há menor resistência. Além disso, o comportamento do modo de ruptura muda de frágil para dúctil.

Segundo OLIN (1990), as múltiplas camadas de finas lâminas de madeira, posicionadas ortogonalmente resulta em grande resistência ao fendilhamento, o que permite menores espaçamentos no caso de ligações por pinos.

Tensões resultantes de impacto e de cargas concentradas são distribuídas sobre grandes áreas devidas ao posicionamento cruzado das fibras das lâminas de madeira. Esta é uma propriedade importante para algumas utilizações do compensado, tais como painéis de piso, parede, etc. (OLIN,1990)

Assim como a madeira maciça, o compensado também está sujeito a variações dimensionais devido à variação do teor de umidade, da temperatura e de outros fatores, como descrito por OLIN (1990). Com relação à expansão e contração higroscópica, no compensado, esta tendência à expansão na direção perpendicular é minimizada pelo cruzamento das lâminas que formam o compensado.

No compensado, a expansão térmica perpendicular ao plano das faces é grande se comparada à do plano das faces; isto se deve ao posicionamento das lâminas que formam o painel. Assim como na expansão e contração higroscópica, a expansão ou contração térmica é minimizada pelo cruzamento das lâminas que formam o compensado

Quanto à trabalhabilidade, o compensado permite ser cortado em qualquer dimensão, o que permite a execução de elementos fletidos, formando curvas com raios bem definidos. Além disso, o compensado é facilmente conectado pelos meios mecânicos usuais (pregos, parafusos e grampos) e por cola. O posicionamento das lâminas de compensado permite a colocação de pregos e parafusos mais próximos às bordas e extremidades se comparado com a madeira maciça. (FINISH PLYWOOD INTERNATIONAL, FPI, sd.)

Com relação à durabilidade, pode-se afirmar que, sendo utilizado o adesivo especificado para compensados de uso exterior, a linha de cola utilizada para unir as lâminas é tão durável quanto a própria madeira. Compensados classificados como uso exterior podem ser expostos ao tempo sem uma pintura extra ou tratamento, sem que isto afete a durabilidade da linha de cola ou da vida útil do painel. Usualmente, contudo, o compensado e outros produtos derivados da madeira são pintados ou selados quando expostos às intempéries, a fim de garantir ou prolongar a vida útil do material.

Um alto grau de resistência, tanto ao apodrecimento quanto ao ataque de insetos, pode ser dado ao compensado através de tratamento por impregnação sob pressão semelhante ao utilizado para as madeiras maciças. Apenas chapas de compensado com adesivos à prova d'água, classificados como uso exterior, podem ser tratados sob pressão, pois outros tipos de adesivo podem ser afetados pela impregnação por pressão. (OLIN,1990)

2.3. Aplicações estruturais

De acordo com OLIN (1990), o desenvolvimento da indústria de construções pré-fabricadas abriu um grande espaço para a madeira maciça e compensada. As características de resistência da madeira compensada: resistência à tração, compressão, cisalhamento, fendilhamento, estabilidade dimensional e resistência ao impacto, tornam este material bastante adequado para fechamentos e coberturas, sendo utilizado, em composição com madeira maciça, em vários elementos estruturais.

Entre as principais aplicações do compensado, apresentadas por FPI, para a indústria de compensado Finlandesa estão:

- paredes externas;
- fechamento de telhados;
- pisos;
- painéis de parede;
- paredes divisórias internas;
- fachadas;
- vigas compostas;
- pórticos;
- ligações em treliças;
- painéis de piso;
- fôrmas para concreto;
- coberturas em arco;

Este trabalho concentra os estudos nas estruturas em vigas compostas, arcos, pórticos, etc. As figuras 4 e 5 ilustram algumas dessas utilizações.



Figura 4 - esq. Estrutura em pórtico utilizando madeira compensada - fonte: INTERNATIONAL PANEL&LUMBER (IPL). Dir. Estrutura em cúpula utilizando madeira compensada - fonte: FPI



Figura 5 – esq.: Estrutura de residência utilizando madeira compensada - fonte: IPL. Dir.: Pórtico composto de madeira maciça e almas em compensado construído pela CASEMA em Guaratinguetá - SP - fonte: do autor.

As maiores estruturas construídas no Brasil utilizando a madeira compensada como material estrutural permanente foram executadas pela TEKNO S/A, nas décadas de 50 e 60. Segundo PERILLO (1997)¹, essa empresa construiu nesse período 30 estruturas em arco, 8 em pórtico, 6 em vigas, além de outros tipos de estruturas, tais como tesouras e shed, utilizando essa tecnologia. Em seu trabalho, CESAR (1991) cita duas estruturas de cobertura construídas com madeira compensada e madeira maciça, sendo uma de 22,00 metros de vão, construída em Ituitaba-MG, para a firma CASENG, em 1960 e outra de 40,00 metros de vão, construída na cidade de São Paulo, no Campo de Marte, para a empresa Camargo Corrêa, na década de 50, apresentado na figura 6.

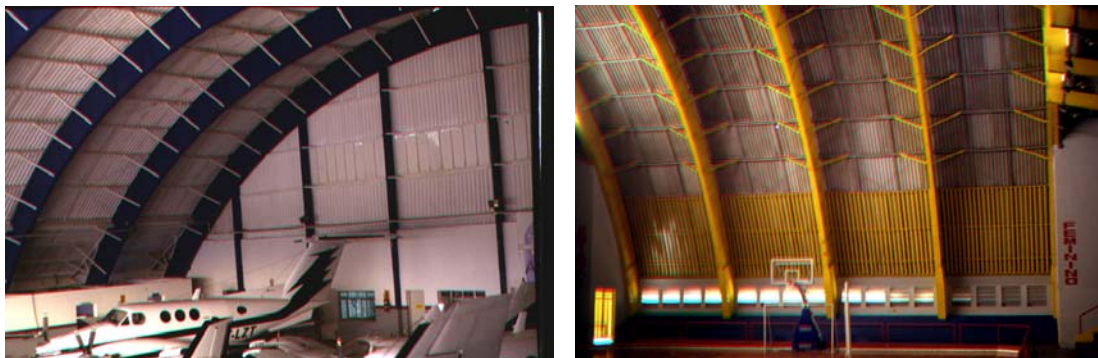


Figura 6– Esq. Hangar no Campo de Marte, São Paulo - SP, construído pela TEKNO S/A. Dir. Ginásio de esportes do São Carlos Clube, São Carlos - SP, construído pela TEKNO S/A – fonte: do autor

Dentre as estruturas mais recentes utilizando elementos compostos com alma em compensado pode-se citar a estrutura em pórtico do anfiteatro construído pela Indústria CASEMA em 1999, em Guaratinguetá-SP, com 9,00 metros de vão, apresentada na figura 5.

2.4. Conclusões

Da pesquisa bibliográfica sobre o compensado pode-se concluir que:

1) O compensado é um derivado da madeira que tem sido largamente utilizado em estruturas compostas em vários países, apresentando-se como uma possibilidade interessante para a atualização dos métodos construtivos utilizados no Brasil, tendo potencial para alavancar a industrialização das estruturas de madeira no país e fornecer novas alternativas para o setor da construção civil ainda bastante carente.

¹ PERILLO, E. Empresa TEKNO S/A. *Comunicação pessoal*

2) O compensado apresenta algumas vantagens em relação à madeira bruta e a outros materiais, entre essas vantagens pode-se citar: controle de qualidade das lâminas, evitando nós, falhas e rachaduras e resultando num material mais homogêneo; possibilidade de produção de elementos compostos de grandes dimensões a partir de toras de pequenos diâmetros; grande resistência ao cisalhamento, à compressão e a tração normal (no plano da chapa), devido à laminação cruzada; trabalhabilidade e; a grande produção dessas chapas no país. Essas particularidades fazem do compensado um material bastante adequado para a utilização como almas de vigas compostas. Entre as desvantagens do compensado pode-se citar: comprimento comercial reduzido (2,44m), que demanda ligação entre as peças da alma; a falta de classificação das chapas segundo sua resistência, existindo apenas classificação segundo a aparência das lâminas externas e internas e o adesivo utilizado; e a existência de muitas empresas produtoras de compensado que não seguem as recomendações e controles de qualidades previstos pelas normas ABNT. Isso pode ser resolvido com a classificação mecânica das chapas de compensado.

3) Dezenas de estruturas utilizando compensado foram construídas entre as décadas de 40 e 60 no Brasil, e muitas dessas estruturas ainda estão em operação, o que comprova a durabilidade do compensado e a aplicabilidade desse sistema construtivo no país. A construção de estruturas modernas, versáteis e seguras utilizando seção composta com alma em compensado é facilmente observada em países como Alemanha, Finlândia, Austrália, Nova Zelândia, Estados Unidos entre outros que já dominam a tecnologia da construção desse tipo de estrutura. A existência de indústrias especializadas na produção dessas estruturas mostra a viabilidade desse sistema e a competitividade deste contra outros materiais.

3. Ligações por Pinos Metálicos

As ligações por pinos metálicos na madeira já vêm sendo estudadas há algum tempo no Brasil. No primeiro trabalho no país a tratar das ligações levando-se em conta a resistência ao embutimento da madeira maciça, ALMEIDA (1987), apresentou um estudo aprofundado a respeito dos modelos teóricos até então desenvolvidos para prever o comportamento das ligações. STAMATO (1998), que trabalhou especificamente com embutimento em madeira compensada também apresenta alguns desses modelos, que serão sucintamente comentados neste texto.

Segundo JOHANSEN (1949), a resistência das ligações por pinos, depende da resistência da madeira ao embutimento do parafuso (f_e) e da resistência do pino à flexão (f_y). Tanto o embutimento quanto à flexão do pino são plásticos, portanto a capacidade de carga de um pino metálico pode ser formulada com base nesse comportamento. Essa teoria é base para vários códigos normativos atuais, tais como EUROCODE 5 (COMITE EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO, 1993) e DIN 1052 (DEUTCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 1969).

O dimensionamento de ligações por pinos segundo a NBR 7190:1997 também se baseia nesse conceito. É a relação entre a espessura da peça de madeira, o diâmetro do pino, a resistência ao embutimento da madeira e a tensão limite de escoamento do pino que determina o comportamento da ligação, pois, em função destes valores, a força máxima se dará pela flexão do pino ou pelo embutimento na madeira.

ALMEIDA (1987) faz um estudo das ligações pregadas, onde apresenta conceitos básicos de resistência ao embutimento e afirma que a pressão de contato aplicada pelo pino à parede do furo causa um estado múltiplo de tensões na região do entorno do furo, que tende a embutir o pino na madeira. As tensões de embutimento podem decorrer da própria cravação do pino no ato da construção ou de uma ação externa, induzida pelo comportamento solidário das peças de madeira.

De acordo com ALMEIDA (1987), quando a ligação é solicitada por carregamento externo, ocorre uma alteração de esforços, com concentração de tensões na região comprimida da parede do furo, cuja intensidade depende do diâmetro do prego e das propriedades da madeira utilizada.

Este estado de tensões depende da deformabilidade da madeira, tanto na direção paralela às fibras quanto na direção normal às mesmas. A resistência normal às fibras também pode condicionar essa distribuição de tensões, caso ocorra um início de fendilhamento, mesmo que microscópico, por tração normal às fibras.

ALMEIDA (1987) afirma que a resistência à ruptura localizada da madeira, causada pela pressão do prego na parede do furo, denominada de resistência de embutimento (do prego na madeira), representada por f_{we} , ou simplesmente f_e , depende da resistência da madeira num estado múltiplo de tensões.

Esse parâmetro de resistência da ligação foi definido como a razão entre a força determinada no ensaio, realizado de acordo com o método proposto pelo autor, e a área diametral da parede do furo. O valor desta área é dado por: $A = t \times d$, onde t corresponde à espessura da peça interna da ligação e d ao diâmetro do prego. Esta é a definição adotada por JOHANSEN (1949), que observou em curvas resultantes de ensaios realizados em vários tipos de madeira, que estas terminam em linhas retas horizontais, o que representa um comportamento plástico na ruptura.

Segundo HILSON (1995), que comenta as recomendações do EUROCODE 5 (1993), as equações de Johansen são geralmente aplicáveis para qualquer combinação de materiais derivados da madeira, desde que conhecidas as propriedades do material. Cita ainda que equações empíricas para a determinação da resistência característica de embutimento foram desenvolvidas experimentalmente para alguns painéis a partir dos resultados de um grande número de ensaios de embutimento. Devido a essa fácil aplicação para novos materiais é que foi adotada a formulação de Johansen para dimensionamento de ligações no EUROCODE 5, segundo HILSON (1995)

HILSON (1995) ainda comenta que, para ligações de madeira maciça com compensado e para aço com madeira maciça, as ligações podem ser adaptadas em relação ao recomendado para as ligações de madeira maciça com madeira maciça. Explica que, geralmente, ocorre

uma menor tendência para o fendilhamento durante a pregação em painéis derivados de madeira, e, na maioria dos casos, os pregos são utilizados com seção de corte simples, em que não penetram totalmente na madeira maciça, reduzindo, desta maneira, a tendência ao fendilhamento da peça.

3.1. Modelos teóricos

3.1.1. Modelo de JOHANSEN (1949)

Em seu desenvolvimento teórico, JOHANSEN (1949) afirma que para um grande deslocamento, em uma ligação com apenas uma seção de corte e um pino de rigidez suficiente para que seja desprezada a deformação por flexão, ocorrerá uma pressão $f_e \cdot d$ praticamente sobre todo o pino, e uma distribuição das pressões, forças cortantes V e momentos M . Para as ligações onde o pino tem rigidez suficiente para não fletir, JOHANSEN (1949) obtém os seguintes equacionamentos, sendo R a resistência de um pino:

$$R = f_e \cdot d \cdot z \quad (3.1)$$

$$M_{\max} = f_e \cdot d \cdot x^2 = \frac{1}{2} f_e \cdot d \cdot z^2 \quad (3.2)$$

$$\text{no qual } x = z \sqrt{\frac{1}{2}}, \quad t_1 = z + 2x = z(1 + \sqrt{2}) \quad (3.3)$$

$$z = t_1(\sqrt{2} - 1) = 0,414t_1 \quad x = 0,293t_1 \quad (3.4)$$

$$R = 0,414f_e \cdot t_1 \cdot d \quad (3.5)$$

Se o pino não for suficientemente rígido, ele será fletido, no limite de escoamento do pino na flexão, o momento é $\frac{\pi}{32} f_y \cdot d^3$ e a força transversal é zero. Entre as curvaturas, o embutimento é tão grande que a pressão é praticamente $f_e \cdot d$. Considerando a porção do pino onde $M=M_{\max}$ e $V=0$, obtêm-se, para essa ligação onde o pino é considerado flexível:

$$R = f_e \cdot d \cdot z \quad (3.6)$$

$$M_{\max} = \frac{1}{2} R \cdot z = \frac{1}{2} \frac{R^2}{f_e \cdot d} = f_y \frac{\pi}{32} d^3 \quad (3.7)$$

$$\text{onde } R = 0,442d^2 \sqrt{f_y \cdot f_e} \quad (3.8)$$

Em uma conexão com dois planos de corte e um pino rígido, as fórmulas resultantes são:

$$R = f_e \times d \times t_2 \quad \text{quando } t_2 \leq 2t_1;$$

$$R = 2 \times f_e \times d \times t_1 \quad \text{quando } t_2 > 2t_1.$$

O pino com baixa rigidez deve fletir na peça de madeira do centro. Isto geralmente ocorre em dois pontos e a madeira deve se encontrar em estado plástico de deformação, a ruptura se caracteriza pela flexão do pino.

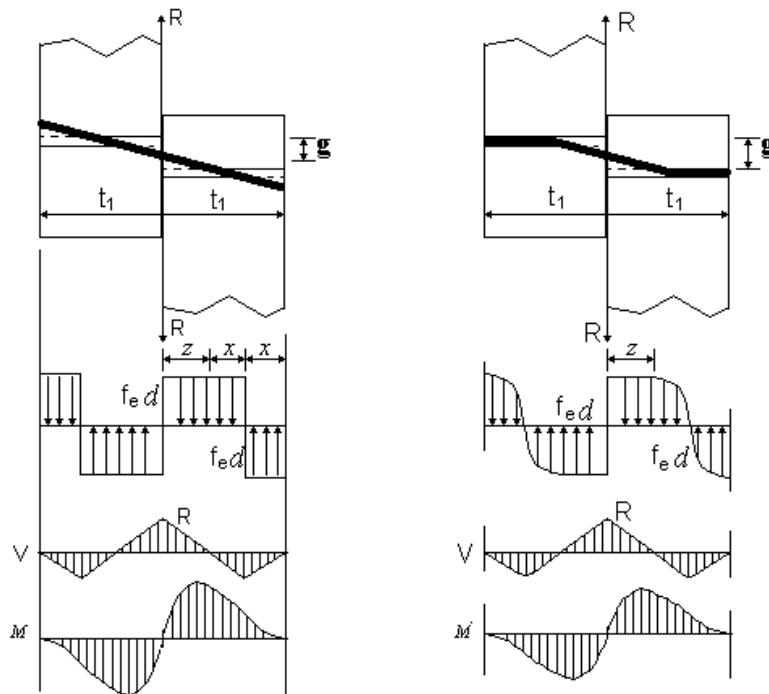


Figura 7 - Ligação com pino rígido e uma seção de corte (esq.) e ligação com pino flexível e uma seção de corte (dir.) - fonte: JOHANSEN (1949)

A teoria de Johansen, como apresentado acima, é baseada na teoria da plasticidade, e considera o comportamento dos materiais como sendo elasto-plástico perfeito. DAUDEVILLE et al (1999), porém, afirmam que deve-se considerar a fratura da madeira para se obter resultados confiáveis no dimensionamento dessas ligações, já que em grande parte das ligações mecânicas pode ocorrer ruptura frágil da madeira, especialmente em situações onde há carregamento perpendicular às fibras da madeira.

STAMATO (1998), já observou que o modo de ruptura de ligações por pinos metálicos em compensado se dá por deformação excessiva, ou seja, embutimento no compensado. Deve-se então ficar atento aos modos de ruptura das peças de madeira maciça durante a análise experimental neste trabalho, evitando-se, com espaçamentos suficientes, a ocorrência de fendilhamento.

3.1.2. Método de MÖLLER (1951), apud ALMEIDA (1987)

Em seu trabalho, ALMEIDA (1987), reuniu estudos sobre o comportamento teórico das ligações em peças de madeira por pinos metálicos encontrados na literatura. Dos métodos relatados por ele, o desenvolvido por Möller mostra-se o mais consistente para a determinação da força última, R , da ligação pregada, pois determina a resistência da ligação considerando a resistência de embutimento da madeira e plastificação do prego.

Baseado na consideração do prego como uma viga apoiada sobre a parede do furo, MÖLLER (1951), apud ALMEIDA (1987) propôs uma expressão para determinar a resistência das ligações pregadas, admitindo que o valor do carregamento por unidade de comprimento do prego seja igual à resistência ao esmagamento, multiplicada pelo diâmetro do prego. Admitiu também que no ponto de momento máximo haveria a formação de uma rótula plástica. Outros parâmetros considerados por Möller foram: a espessura das peças de madeira, o momento fletor de plastificação do prego (M_{np}) e a carga distribuída última (q_u) necessária para provocar o esmagamento da madeira pela haste do prego.

O método de Möller considera que o estado limite último do corpo-de-prova seja determinado pela plastificação do prego por flexão ou pelo esmagamento da madeira. Qualquer acréscimo de resistência além deste estado último é devido ao efeito de segunda ordem que ocorre no corpo-de-prova.

Möller deduziu uma expressão, da força última R da ligação, em corte simples, em função do momento de plastificação do prego (M_{np}) e do carregamento último (q_u) que provoca o esmagamento da madeira pela haste do prego, dada por:

$$R = \sqrt{2M_{np}q_u} \quad (3.9)$$

Substituindo o valor de $q_u=f_c d$ na equação (3.9) tem-se:

$$R = \sqrt{2M_{np} f_e d} \quad (3.10)$$

De acordo com a teoria da plasticidade o momento de plastificação de uma seção circular é dado por: $M_y = f_y \times d^3 / 6$. Substituindo o valor de $M_y = M_{np}$ na equação (3.10) obtém-se :

$$R = 0,6d^2 \sqrt{f_y f_e} \quad (3.11)$$

Onde f_y : é a resistência de escoamento do prego, que deve ser determinada diretamente a partir do ensaio de tração ou indiretamente através do ensaio de flexão do prego.

A equação obtida por Möller é semelhante à usada por Stoy (1943), apud ALMEIDA (1987), que fornece a força admissível da ligação pregada, para pregos solicitados a corte simples, sendo que:

$$R_{adm} = 0,8d^2 \sqrt{\sigma_{s,adm} \sigma_{w,adm}} \quad (3.12)$$

Onde $\sigma_{s,adm}$: é a tensão admissível de tração do prego;

$\sigma_{w,adm}$: é a tensão admissível de compressão da madeira.

3.1.3. Método da NBR 7190:1997

Segundo os critérios de dimensionamento de ligações por pinos metálicos da norma da ABNT, NBR 7190:1997, o valor de cálculo da resistência de um pino metálico correspondente a uma única seção de corte é determinado em função do valor do parâmetro β , sendo:

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

Onde t é a espessura convencional da madeira (figura 18), e d o diâmetro do pino, e estabelece como valor limite:

$$\beta_{lim} = 1,25 \sqrt{\frac{f_{yd}}{f_{ed}}}$$

Onde f_{yd} é a resistência de cálculo ao escoamento do pino metálico, permitindo que seja admitida igual à resistência nominal característica de escoamento f_{yk} , e f_{ed} a resistência de cálculo de embutimento.

O valor de cálculo $R_{vd,1}$ da resistência de um pino, correspondente a uma única seção de corte, é dada pelas expressões seguintes:

I. Embutimento na madeira

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

II. Flexão do pino

$$\beta \geq \beta_{lim} \quad R_{vd,1} = 0,625 \frac{d^2}{\beta_{lim}} f_{yd}$$

tomando-se $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$ sendo $\gamma_s = 1,1$

3.2. Comportamento das ligações alma/mesa em vigas de seção composta.

O dimensionamento de estruturas de madeira considerando as ligações simplesmente flexíveis ou rígidas pode levar a diferenças entre o comportamento previsto em tal dimensionamento e o comportamento real da estrutura pronta, já que grande parte das ligações se comporta como algo intermediário entre o rígido e o flexível. Em algumas estruturas, como as seções I ou Caixão com alma em compensado, ou nos pórticos, a rigidez das ligações deve ser diretamente computada no dimensionamento, sendo a distribuição dos esforços na estrutura dependente do comportamento dessas ligações.

Da mesma forma, tratando de seções compostas, KREUZINGER (1995) menciona que no caso de estruturas compostas unidas por ligações mecânicas tais como pregos, parafusos, cavilhas ou chapas com dentes estampados, cada conector é solicitado por forças de cisalhamento, que causam algum deslocamento. A relação entre o carregamento aplicado e o

deslocamento entre os elementos de madeira que compõem a seção é chamado de módulo de deslizamento K .

A norma brasileira para Projeto de Estruturas de Madeira, NBR 7190:1997 não faz menção específica ao detalhamento das ligações em estruturas compostas, no entanto, apresenta critérios que consideram essa diminuição da rigidez efetiva $(EI)_{ef}$ de dada seção composta devido ao efeito de composição parcial. Essa diminuição é feita reduzindo-se a inércia da peça em:

$$I_{ef} = \alpha_r I_t$$

Onde $\alpha_r = 0,95$ para as seções T e $\alpha_r = 0,85$ para as seções I ou caixão

Utilizando essa inércia efetiva a seção composta pode ser dimensionada como sendo uma seção maciça, com área igual à soma das áreas dos elementos que compõem a seção. Como pode-se observar, essa consideração independe do diâmetro e do espaçamento entre conectores.

Em contraposição a essa consideração da norma brasileira, o EUROCODE 5:1993 apresenta critérios de dimensionamento específicos para seções compostas, seja de madeira maciça, com almas em compensado, com laminado colado, etc. No desenvolvimento das expressões a serem utilizadas nesse dimensionamento é considerada a influência do deslizamento relativo entre as peças que compõem a seção devido às deformações nas ligações, calculando-se um módulo de rigidez efetivo $(EI)_{ef}$ em função das propriedades de rigidez de cada elemento que compõe a seção, da geometria da seção, do módulo de deslizamento K da ligação e do espaçamento entre conectores.

SANTANA (1997) apresentou uma pesquisa teórica e experimental a respeito das vigas de seção I e caixão com alma em compensado. Em seu trabalho, foi feito um estudo teórico investigando o comportamento da viga composta, tendo sido incluídos os efeitos que influenciam em sua rigidez, particularmente a deformação das ligações. Uma abordagem segundo equações de equilíbrio foi feita e foram desenvolvidas expressões para o cálculo dos deslocamentos e das tensões. A partir da revisão de códigos normativos e outras pesquisas sobre o assunto, SANTANA (1997) observou que o efeito da composição parcial da seção é amplamente considerada, justificando a sua inclusão na análise da viga.

A partir de uma análise teórica do efeito da composição parcial, SANTANA (1997) observou que a influência deste nos deslocamentos da viga pode chegar a até 20%, sendo os parâmetros influentes, além da rigidez da ligação, a área da mesa e seu distanciamento do eixo da seção e o comprimento do vão. Quanto maiores esses parâmetros, maior a influência da composição parcial.

SANTANA (1997) conclui, a partir dos resultados dos estudos teórico e experimental, que o cálculo das tensões em vigas de madeira com alma em chapa de compensado pode ser feito segundo as expressões clássicas para flexão, pois o efeito da composição parcial é desprezível nas tensões, observando que quanto menos rígida for a ligação, mais as almas serão sobrecarregadas. Entretanto, no cálculo dos deslocamentos esse efeito deve ser considerado, e recomenda para tal as expressões apresentadas em seu trabalho.

Em seu estudo para o dimensionamento de pontes em vigas de seção compostas, FERREIRA (1999) avaliou os critérios de dimensionamento da NBR 7190:1997 e do EUROCODE 5:1999, comparando os valores teóricos com resultados de ensaios em laboratórios em vigas de seção I composta por elementos de madeira maciça. De acordo com os resultados, FERREIRA (1999) observou que os valores de α_r recomendados pela norma brasileira resultam em valores maiores que os determinados pelo EUROCODE e pelos obtidos experimentalmente, verificando também que o método de dimensionamento do EUROCODE 5 leva a valores próximos dos experimentais, concluindo que no dimensionamento de ligações compostas pregadas, no cálculo do momento de inércia e das tensões, devem ser utilizadas as expressões fornecidas pelo EUROCODE 5.

3.2.1 Teoria de KREUNZINGER (1995)

O equacionamento apresentado pelo EUROCODE 5 para o dimensionamento de estruturas de seção composta é genérico, sendo aplicado à várias configurações de seção. KREUNZINGER (1995) apresenta a dedução desse equacionamento, partindo de uma seção T. Dada sua importância é apresentada a seguir esta teoria.

A ligação entre os elementos que compõem as almas e as mesas é feita mecanicamente por conectores tais como pregos, parafusos, etc. Cada elemento de ligação é submetido a esforços cisalhantes que deformam os conectores e provocam deslocamentos relativos entre

as peças. A figura 8 apresenta o deslocamento relativo u e o fluxo de cisalhamento v para uma seção composta.

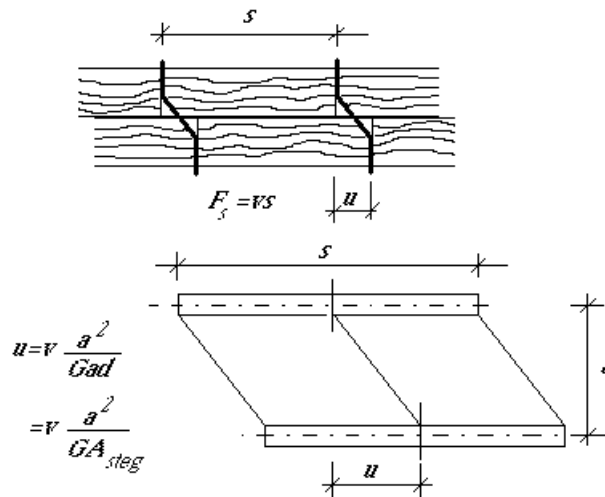


Figura 8 – Deslocamento e força de cisalhamento entre os elementos da seção composta.

Fonte: KREUNZINGER (1995)

Para o cálculo, e para o desenvolvimento de outras equações, é necessário que as ligações sejam distribuídas continuamente ao longo da viga, gerando com isso uma força de cisalhamento contínua, representada por:

$$v = \frac{F_s}{s} \quad k = \frac{K}{s} \quad v = ku \quad (3.13)$$

KREUNZINGER (1995) explica que se a distância entre os conectores for muito grande ou se os conectores estiverem concentrados em alguns pontos, o modelo de cálculo aqui desenvolvido não é válido, e um novo modelo mecânico deve ser desenvolvido.

Para o dimensionamento de vigas os seguintes parâmetros devem ser analisados: tensões σ e τ em todos os elementos, esforços nos conectores e deslocamentos. Para vigas compostas com elementos unidos mecanicamente, a teoria de flexão para vigas tradicionais não pode ser aplicada diretamente devido às deformações causadas pela semi-rigidez das ligações. Essa teoria deve ser aplicada separadamente para cada elemento da viga.

Foram desenvolvidas soluções analíticas utilizando equações diferenciais de equilíbrio (Möhler, 1956; Heimeshoff, 1987 apud KREUNZINGER, 1995) ou considerando a energia

elástica. O desenvolvimento de equações diferenciais para seção T é apresentado a seguir: (figura 9):

Os equacionamentos necessários para os elementos individualmente são baseados na teoria de flexão simples, e as deformações devidas ao cisalhamento das almas e das mesas não serão consideradas para o desenvolvimento dessas equações. As ligações são consideradas como sendo continuamente distribuídas ao longo da viga, e a seção e a rigidez das ligações são constantes ao longo do eixo da viga.

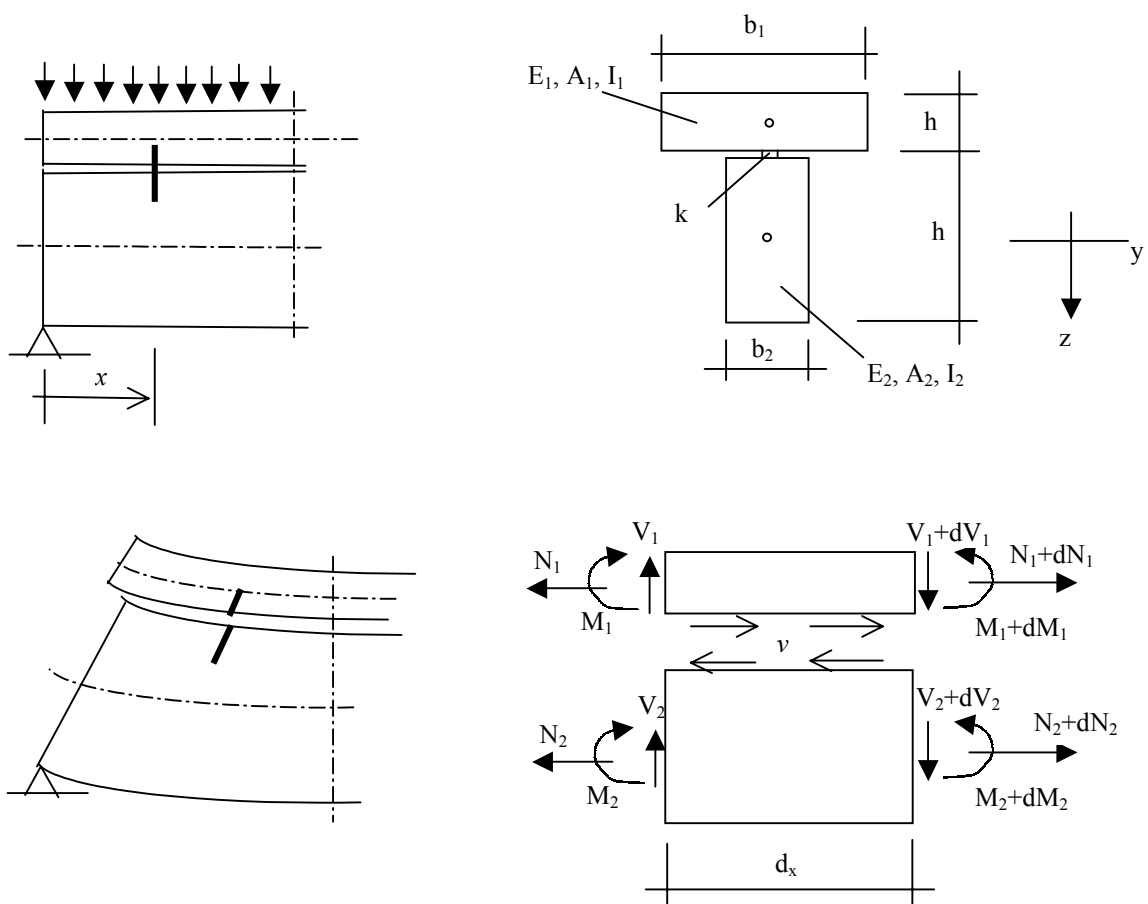


Figura 9 - Simbologia utilizada no desenvolvimento das equações para vigas compostas.

Fonte: KREUNZINGER (1995)

Denominando u_1 , u_2 os deslocamentos longitudinais nos eixos das peças 1 e 2, e w a inclinação na seção devido à flexão, considerando que as seções permanecem planas e com a mesma inclinação, u é o deslocamento relativo entre os elementos da seção no contato entre a mesa e a alma. (Figura 10)

$$u = u_2 - u_1 + w' \left(\frac{h_1}{2} + \frac{h_2}{2} \right) = u_2 - u_1 + w' a \quad (3.14)$$

Sendo que u é independente da posição das ligações. Uma dimensão crítica nesse equacionamento é a distância a entre os eixos de massa dos elementos que compõem a seção. As equações diferenciais não são válidas somente para seções com os elementos posicionados um sobre o outro, como na seção T apresentada, mas também são aplicáveis às seções com os elementos posicionados lado a lado, como é o caso da seção caixão e da seção I, sendo válidas apenas se as deformações devido ao cisalhamento forem desconsideradas.

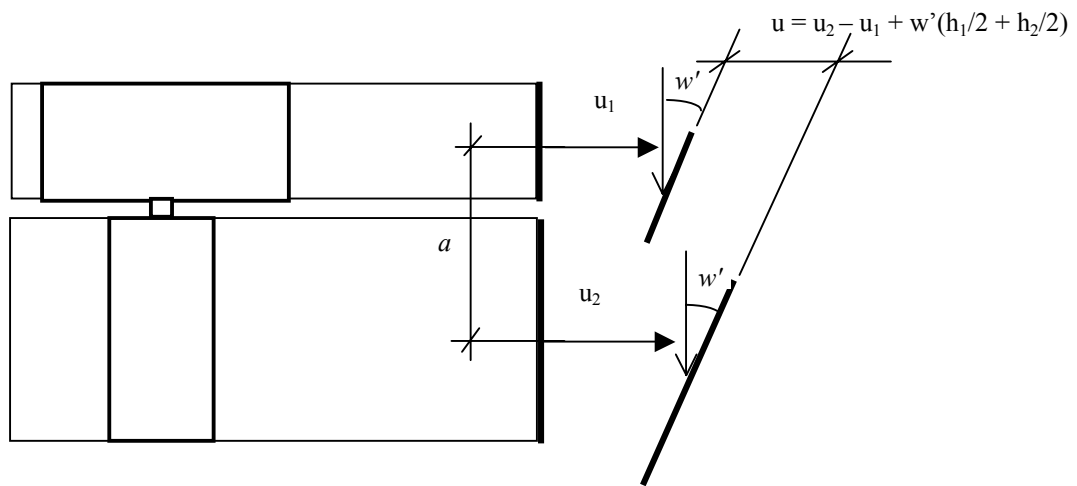


Figura 10 - Deformações nas seções que compõem a viga. Fonte: KREUNZINGER (1995)

Combinando as equações da teoria da elasticidade com teoria da flexão simples:

$$N_1 = E_1 A_1 u'_1 \quad N_2 = E_2 A_2 u'_2 \quad (3.15)$$

$$M_1 = -E_1 I_1 w''_1 \quad M_2 = -E_2 I_2 w''_2 \quad (3.16)$$

$$V_1 = -E_1 I_1 w'''_1 \quad V_2 = E_2 I_2 w'''_2 \quad (3.17)$$

$$v = ku_t = k(u_2 - u_1 + w'a) \quad (3.18)$$

Pelo equilíbrio de dois elementos nas direções x e em z : [$p_x = 0$, $(N_1 + N_2)' = 0$]

$$N_1' + v = 0 \quad (3.19)$$

$$N_2' + v = 0 \quad (3.20)$$

$$M_1' = V_1 - v \frac{h_1}{2} \quad (3.21a)$$

$$M_2' = V_2 - v \frac{h_2}{2} \quad (3.21b)$$

$$V_1' + V_2' = -p = V' \quad (3.21c)$$

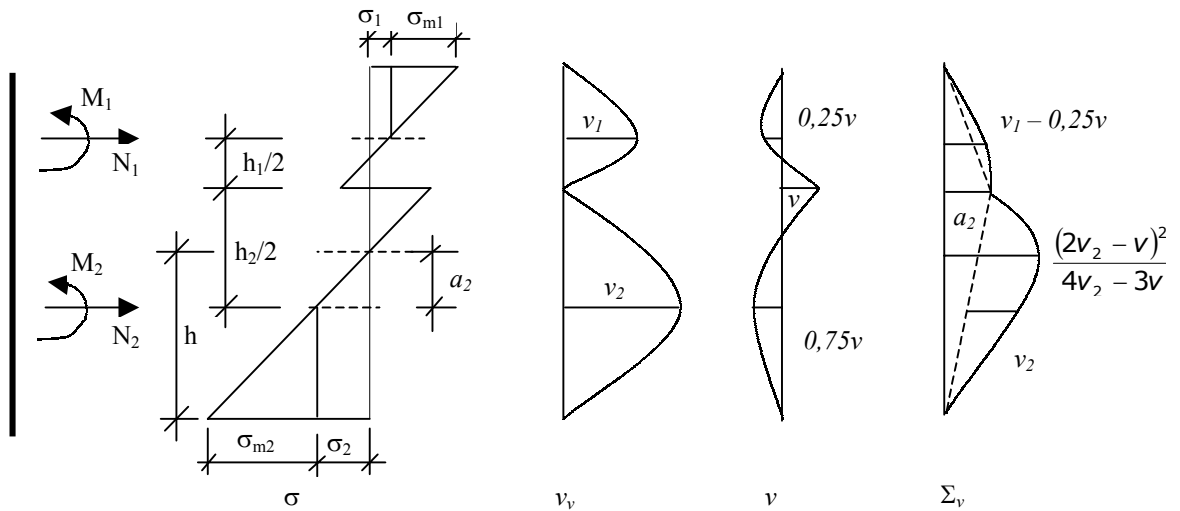


Figura 11 - Distribuição de tensões na seção transversal da viga. Fonte: KREUNZINGER (1995)

Somando-se (3.21a) e (3.21b) e derivando em relação a x , e substituindo-se V' por $-p$ tem-se:

$$M_1'' + M_2'' + v'a + p = 0 \quad (3.22)$$

Substituindo-se as equações da elasticidade pelas forças e momentos internos encontra-se o seguinte sistema de equações diferenciais:

$$E_1 A_1 u_1'' + k(u_2 - u_1 + w'a) = 0 \quad (3.23)$$

$$E_2 A_2 u_2'' - k(u_2 - u_1 + w'a) = 0 \quad (3.24)$$

$$(E_1 I_1 + E_2 I_2) w'''' - k(u_2 - u_1 + w'a) a = p \quad (3.25)$$

Para vigas biapoiadas com distribuição senoidal do carregamento, uma solução analítica simples pode ser dada pois a forma da deformação na direção do eixo da viga corresponde à uma função senoidal ou cossenoidal. Apesar de a solução ser baseada na distribuição senoidal do carregamento, a solução é aplicável a muitas outras distribuições.

$$p = p_0 \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{l} x\right) \quad (3.26)$$

E a solução fica:

$$w_0 = \rho \frac{l^4}{\pi^4} \frac{1}{E_1 I_1 + E_2 I_2 + \frac{E_1 A_1 \gamma_1 a^2}{1 + \gamma_1 \frac{E_1 A_1}{E_2 A_2}}} = \rho_0 \frac{l^4}{\pi^4} \frac{1}{(EI)_{ef}} \quad (3.27a)$$

$$u_{10} = w_0 \frac{\pi}{l} \frac{a \gamma_1 E_2 A_2}{\gamma_1 E_1 A_1 + E_2 A_2} \quad (3.27b)$$

$$u_{20} = -w_0 \frac{\pi}{l} \frac{a \gamma_1 E_1 A_1}{\gamma_1 E_2 A_2 + E_1 A_1} \quad (3.27c)$$

$$k_1 = \frac{\pi^2}{l^2} \frac{E_1 A_1}{k} \text{ e } \gamma_1 = \frac{1}{(1 + k_1)} \quad (3.28a, b)$$

Com essas deformações, e aplicando as equações da elasticidade, as tensões normais no elemento 1 da seção pode ser calculada por: (figura 11)

$$\sigma_1 = E_1 u'_{11} (x = l/2) = -E_1 u_{10} \frac{\pi}{l} \quad (3.29)$$

Usando os termos:

$$w_0 = \rho_0 \frac{l^4}{\pi^4} \frac{1}{(EI)_{ef}}; \quad M_0 = \rho_0 \frac{l^2}{\pi^2}; \quad (3.30 a, b)$$

$$a_2 = \frac{a \gamma_1 E_1 A_1}{\gamma_1 E_1 A_1 + E_2 A_2} \quad a_1 = a - a_2 \quad (3.30 c, d)$$

E a tensão σ_1 pode ser escrita como:

$$\sigma_1 = \frac{\gamma_1 E_1 a_1 M_0}{(EI)_{ef}} \quad (3.31)$$

Essa equação é semelhante à equação de tensão normal para vigas simplesmente apoiadas.

No Brasil, as únicas publicações que apresentam um significativo método de dimensionamento de estruturas em compensado são: PERILO (sd), que trata-se de uma apostila de notas de aula para o curso de Estruturas de Madeira da Faculdade de Arquitetura da Universidade Mackenzie. Nessa apostila, sem data de publicação definida, porém, segundo o autor¹, é da década de 60, são apresentados critérios de dimensionamento de estruturas compostas utilizando compensado nas almas. Nesses critérios não são consideradas as deformações devidas às ligações no dimensionamento dessas estruturas. Tão pouco são consideradas as deformações devidas ao cisalhamento no cálculo da flecha da estrutura. Segundo o próprio autor, esses critérios foram baseados em sua larga experiência

em construção de arcos em estruturas compostas com compensado entre as décadas de 50 e 60 pela Empresa TEKNO S.A., de São Paulo, tendo se baseado nos métodos de dimensionamento disponíveis na época. Grande parte das estruturas construídas por essa empresa está em operação ainda hoje, mais de 40 anos após sua construção. Alguns exemplos visitados foram: Ginásio do São Carlos Clube (São Carlos-SP), Ginásio Municipal de Sorocaba (Sorocaba-SP) e três hangares no Campo de Marte (São Paulo-SP). Essas estruturas estão apresentadas no Item 2.3. PFEIL (1985) é outra publicação brasileira que trata do dimensionamento de estruturas compostas com alma em compensado. Essa publicação apresenta alguns critérios de dimensionamento para essas estruturas baseados nos critérios da DIN 1052.

3.3. Ligações rígidas ao momento

No dimensionamento de uma estrutura, a rigidez das ligações devem ser consideradas tanto na análise local quanto na análise global da estrutura, pois a rigidez afeta tanto a distribuição de tensões internas da estrutura quanto os deslocamentos. Os critérios de dimensionamento atuais normalmente assumem que uma ligação é engaste perfeito ou rótula perfeita. Segundo STAMATO (1998), como as deformações por embutimento na madeira produzem grandes deformações nas ligações, a rigidez da ligação deveria ser considerada no dimensionamento o que alteraria os cálculos dos deslocamentos da estrutura e a distribuição de tensões internas no caso de estruturas hiperestáticas. RACHER (1995) apresenta um estudo sobre a rigidez de ligação, onde desenvolve os conceitos utilizados pelo EUROCODE 5:1993 no cálculo de estruturas com ligações resistentes ao momento.

Para a elaboração de cálculos precisos, a ligação deve ser classificada, segundo RACHER, considerando-se o coeficiente β_r , referente à rigidez:

$$K_r = \beta_r \frac{EI}{L} \quad (3.32)$$

Onde K_r é a rigidez à rotação da ligação, como será definido a seguir, e EI é o módulo de rigidez à flexão da peça conectada com um vão L .

A classificação de uma ligação como rígida, semi-rígida ou rotulada esta apresentada a seguir utilizando como modelo um pórtico com duas ligações (figura 12a), onde foram

¹ Comunicação pessoal

desconsideradas as deformações devido aos esforços normais e de cisalhamento ao longo dos elementos por serem pequenas em relação às deformações devidas ao embutimento. O momento na ligação para esse pórtico considerado é então dado por:

$$M_j = \frac{q \times L^2}{8} \cdot \frac{1}{1,5 + \alpha \frac{H_c}{L} + \frac{3}{\beta_r}} \quad (3.33)$$

Onde q é a carga uniformemente distribuída aplicada na peça horizontal do pórtico e α a relação entre os módulos de rigidez da viga e da coluna.

A eficiência da ligação é medida pela razão R_M , que relaciona o momento M_j com o momento de uma ligação perfeitamente rígida, correspondente a um $K_r = \infty$. A figura 12b e 12c apresentam a influência da rigidez da ligação na razão R_M para diferentes configurações de pórticos.

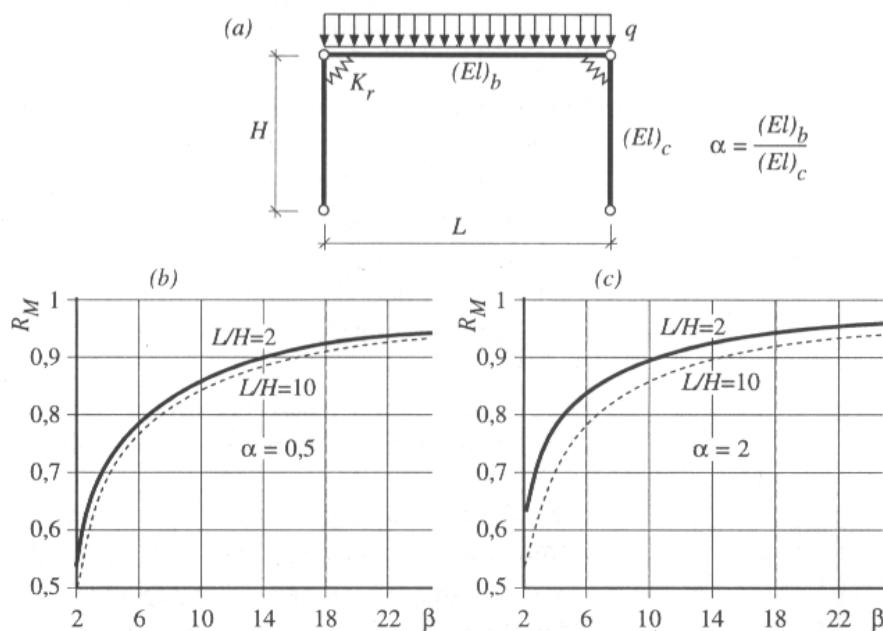


Figura 12 - a) Geometria do pórtico e b) e c) variações da eficiência das ligações.

Uma diminuição substancial do momento na ligação ocorre quando o coeficiente de rigidez β_r é menor que 6. Considerando essa variação, a ligação pode ser considerada como rígida nos cálculos quando $R_M \geq 0,85$, o que requer valores de β_r superiores a 8 e 12. No outro extremo, as ligações podem ser consideradas rotuladas se $R_M \leq 0,20$, relativo a um valor médio de $\beta_r = 0,5$. Em todos os outros casos a estrutura deve ser dimensionada considerando ligações semi-rígidas. Considerando-se efeito de segunda ordem, essa classificação é relativa

a estruturas contraventadas. Para estruturas não contraventadas, EC5 especifica um valor mínimo de 25 para β_r para se considerar a ligação como rígida. (RACHER,1995)

Além disso, a consideração de ligações semi-rígidas permite avaliar a distribuição do momento na estrutura. Assim, os valores relativos ao momento na ligação e a ao momento no meio do podem ser definidos para propiciar um dimensionamento mais econômico, otimizando as relações da razão L/H_c do pórtico e do coeficiente β_r ,

RACHER apresenta um desenvolvimento das equações utilizadas pelo EUROCODE 5 para o dimensionamento de ligações rígidas. Nesse desenvolvimento RACHER (1995) baseia-se no comportamento de uma ligação entre peças de seção maciça retangular. Aplicável para estruturas em madeira maciça, madeira laminada colada e LVL.

Para a análise da ligação, as peças de madeira devem ser suficientemente rígidas e resistentes para que suas deformações não afetem a análise das deformações da ligação. Portanto, a rotação da ligação é o resultado da translação do pino que causa a rotação ω da ligação (figura 13c). Definindo o centro de rotação C como o centro geométrico da ligação, a condição de equilíbrio é dada por:

$$M = \sum_{j=1}^n F_{M,j} r_j \quad (3.34)$$

Onde $F_{M,j}$ é a força no conector j, e r_j sua distância ao centro de rotação.

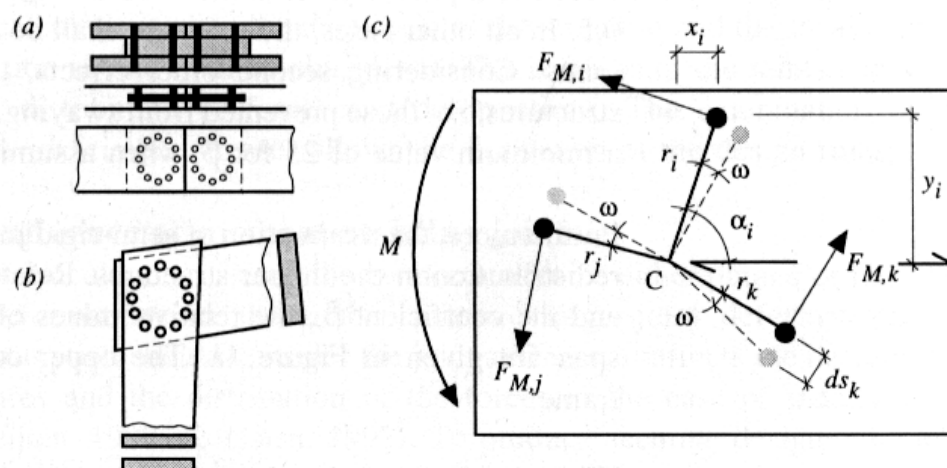


Figura 13 - Ligações resistentes ao momento a) ligação de peças paralelas. b) ligação de peças inclinadas c) definições geométricas e forças nos pinos.

Com seu desenvolvimento, RACHER (1995) afirma que a rigidez rotacional K_r pode ser determinada por:

$$K_r = \sum_{j=1}^n K_{a_j} r_j^2 \quad (3.35)$$

Segundo esse desenvolvimento, para ligações por pinos, a rigidez rotacional é calculada utilizando o módulo de deslizamento K_{ser} especificado no EC5. Esse valor pode ser adotado como sendo a média dos valores para as direções paralela e perpendicular às fibras, desde que a ligação seja feita com apenas um tipo de pino. A equação (3.35) apresenta a rigidez rotacional de cálculo como:

$$K_{r,ser,d} = K_{ser} \sum_{j=1}^n r_j^2 \quad \text{e} \quad K_{r,u,d} = \frac{2}{3} K_{r,ser,d} \quad (3.36)$$

Considerando a ligação apresentada na figura 14, a rigidez rotacional no estado último de utilização é (Kessel, 1991, apud RACHER, 1995):

$$K_{r,ser,d} = K_{ser} (n_1 r_1^2 + n_2 r_2^2) \quad \text{para ligações tipo (a)} \quad (3.37)$$

$$K_{r,ser,d} = K_{ser} (\mu_x e_x^2 + \mu_y e_y^2) \quad \text{para ligações tipo (b)} \quad (3.38)$$

$$\text{onde: } \mu_x = 4m_y \sum_{i=1}^{m_x} (i - 0,5)^2 \quad \mu_y = 4m_x \sum_{j=1}^{m_y} (j - 0,5)^2$$

$$m_x = \text{mod} \left[\frac{n_x + 1}{2} \right] \quad m_y = \text{mod} \left[\frac{n_y + 1}{2} \right]$$

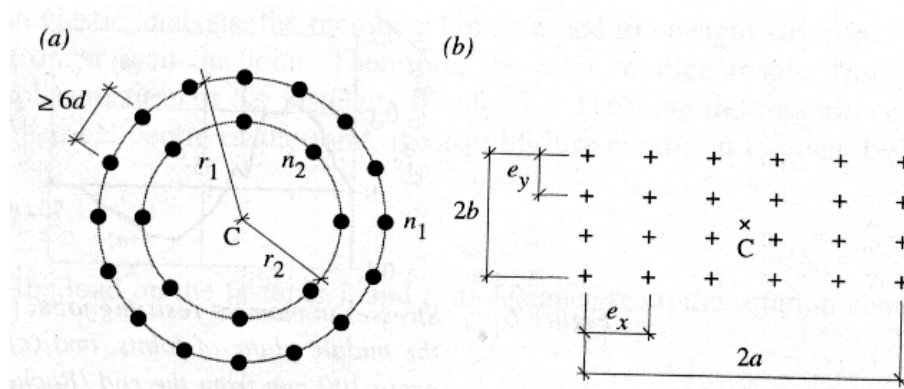


Figura 14 - Geometria dos modelos mais comuns de ligações rígidas ao momento, a) ligação tipo A, b) ligação tipo B.

Essas teorias apresentadas por RACHER são baseadas em ligações entre elementos de seção cheia, como madeira maciça, madeira laminada colada, etc. e segundo MILNER&WOODARD (1995) vem sendo utilizadas por calculistas para estruturas compostas com compensado com ligações pregadas. A utilização desses critérios desenvolvidos para seção retangular cheia é questionável no caso de seções compostas, devido principalmente à natureza diferente dos elementos que compõem a seção e dos mecanismos de transferência de tensão entre esses elementos. Pesquisa detalhada realizada por WOODARD (1995) em ligações pregadas de nós de pórtico de estruturas de elementos seção caixão com alma em compensado confirmaram que as teorias existentes para ligações rígidas em peças maciças não são aplicáveis para pórticos de seção caixão.

MILNER&WOODARD (1995) descrevem um método de dimensionamento específico para ligações rígidas ao momento em pórticos de seção composta com almas em compensado. Segundo eles, as pesquisas com elementos de seção maciça têm se concentrado na distribuição de tensões na cobrejunta e na quantidade de pregos necessários para a ligação e a partir desses resultados foram propostos vários procedimentos de cálculo por Pneuman (1964), Burgess (1970), Batchelar (1982, 1983, 1984), Pierce (1982), Milner (1988), Walford (1988a&b), Bier (1989), Hutchings (1989) e Kermani&Lee (1991) , apud MILNER&WOODARD (1995). Embora Walford (1988b) e Milner (1988) tenham recomendado seções caixão como alternativa aos pórticos de viga e coluna maciças, seus respectivos procedimentos de cálculo estão de acordo somente com seções de laminado colado.

Na Austrália, segundo MILNER&WOODARD (1995), as ligações pregadas normalmente são dimensionadas utilizando a equação (3.39) rotacional não linear, dada no AS1720.1-1988, SAA Timber Structure Code, apud MILNER&WOODARD (1995), e geralmente se utiliza o modelo de distribuição retangular com centro vazio, chamado de configuração de "anel de pregos", apresentado na figura 15.

$$M_n = Qr_{m\acute{a}x} \sum_{i=1}^n (r_i / r_{m\acute{a}x})^{2/3} \quad (3.39)$$

A equação (3.39) depende de se assumir que a ligação por pregos conecta dois elementos totalmente rígidos que não deformam durante o carregamento, preferencialmente todos os deslocamentos da ligação ocorrem nos pregos.

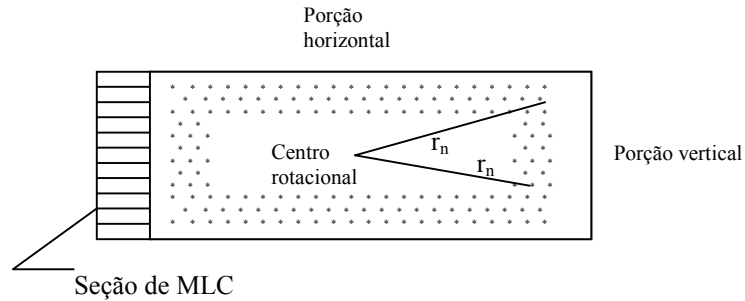


Figura 15 - Ilustração do conceito de "anel de pregos". Fonte: MILNER&WOODARD(1995)

Essa teoria supõe que um prego na porção horizontal do anel de pregos e um prego na porção vertical do anel de pregos estarão sujeitos a esforços da mesma magnitude se eles tiverem a mesma distância radial ao centróide do conjunto de pregos, o que não é diretamente aplicável às estruturas compostas.

Para a cobrejunta com compensado, os procedimentos de cálculo mais utilizados são baseados na teoria de Batchelar (1984), apud MILNER&WOODARD (1995) idealizada a partir da distribuição de tensões ao longo da linha de tensões críticas. Ele sugere que a linha das tensões críticas é uma linha horizontal passando pela interseção entre a linhas de eixo da coluna e o banzo inferior da viga e perpendicular à borda externa da cobrejunta, conforme a figura 16. Fórmulas para o dimensionamento das espessuras dos compensados da cobrejunta podem ser encontradas MILNER & WOODARD (1995).

Para o estudo sobre nós rígidos em elementos de seção caixão WOODARD (1995) utilizou três métodos complementares de análises. Em primeiro lugar, análises fotoelásticas foram utilizadas para fornecer uma visão geral da distribuição de tensões na cobrejunta, a seguir, análises em elementos finitos forneceram dados para o posicionamento dos extensômetros elétricos e confirmaram as medidas de deformação dos ensaios experimentais e por fim quatro nós de pórtico em escala real deram maiores detalhes sobre os mecanismos de transferência de forças internas dos membros da ligação.

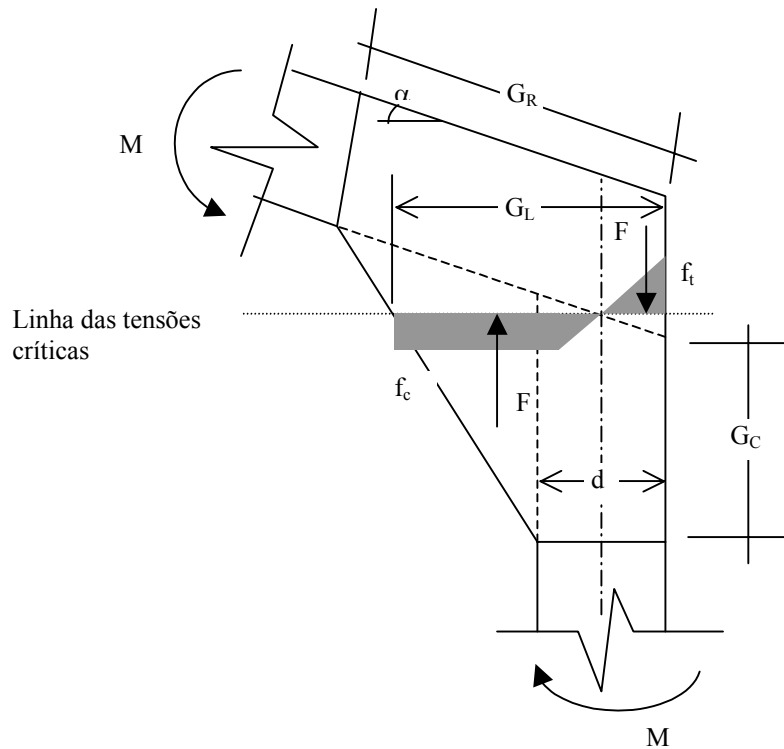


Figura 16 - Distribuição das tensões na cobrejunta segundo BATCHELAR, apud WOODARD (1995)

Em todos os casos, as ligações foram construídas com a viga passando sobre o topo da coluna, conforme a figura 17. Esta é a configuração mais utilizada na Austrália e na Nova Zelândia por permitir uma montagem mais simples e mais eficiente, na qual as colunas com os compensados de cobrejuntas já ligados são posicionadas e contraventadas e então são montadas as vigas e os contraventamentos, por fim, as terças são posicionadas com ajuda de guindastes e pregadas no local.

Os nós de pórticos testados compreendem a porção do pórtico entre o apoio da coluna e o ponto de contraventamento da viga, como apresentado na figura 17, carregada com a combinação força/momento que representa as cargas nos pórticos construídos atualmente na Austrália. Devido à natureza leve das estruturas em seção caixão com alma em compensado o carregamento nas ligações foi feito com anéis especialmente construídos para ensaios de abertura e de fechamento do nó. A figura 17 apresenta a configuração de carregamento de fechamento do nó.

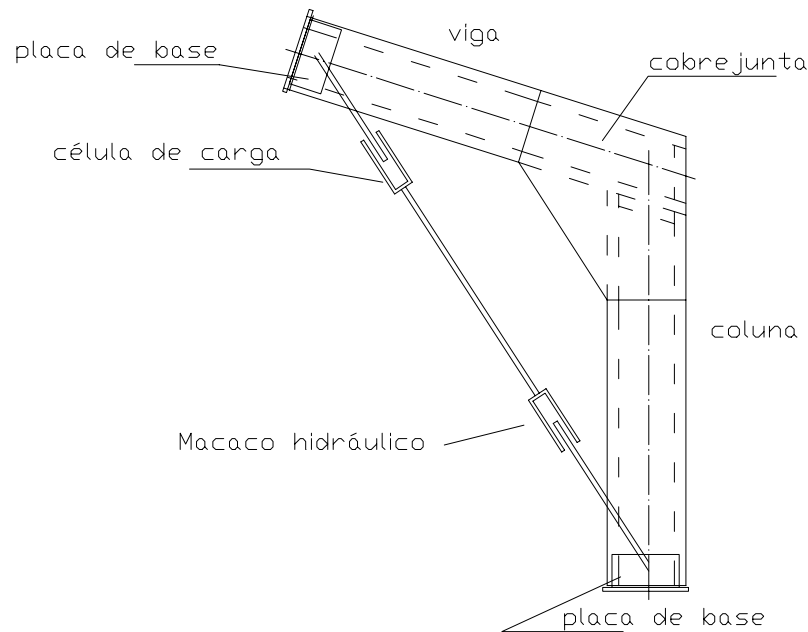


Figura 17 - Arranjo de ensaio de nó de pórtico. Fonte: MILNER&WOODARD (1995)

Em resumo, os resultados desses estudos apresentados por MILNER&WOODARD (1995) conduzem as seguintes conclusões referentes ao método de dimensionamento de ligações pregadas :

- As ações devidas ao momento na ligação são transferidas diretamente da cobrejunta para as mesas pelos pregos, com a pregação nos enrijecedores promovendo pequena contribuição à resistência ao momento. Portanto, o modelo de distribuição de pregos retangular com centro vazio, no qual se assume que todos os pregos têm capacidade para contribuir com a força relacionada à distância ao centro de rotação, não é aplicável para uso no dimensionamento de ligações em pórticos de seção caixão.
- Na construção da ligação, porém, a pregação entre cobrejunta e enrijecedores é necessária, devido à contribuição dos pregos na transferência das forças horizontais na interseção cobrejunta/viga caixão.
- A fórmula para dimensionamento de ligações pregadas baseada nos conceitos rotacionais (Equação (3.39)), tem aplicabilidade limitada quando se dimensiona elementos de seção caixão. Essa fórmula é baseada nas condições de que a ligação pregada conecta dois elementos totalmente rígidos os quais não deformam com o carregamento. Isto limita a aplicação nos elementos de seção caixão que, em geral, são altamente flexíveis em comparação com as cobrejuntas rígidas.

Com base nos resultados experimentais, WOODARD (1995) propôs duas formulações alternativas para o cálculo de cobrejuntas pregadas para estruturas compostas com almas em compensado, em substituição da Equação (3.39), visto que essa não se aplica a essas estruturas. Uma das formulações, chamada por Woodard “Development Length Procedure”, calcula o número de pregos necessários para as mesas na cobrejunta, dado pela equação (3.40), sendo esse método é indicado quando as dimensões da cobrejunta ainda não estão estabelecidas. O outro método, chamado de “Simplified Rotational Joint Procedure” calcula o espaçamento entre pregos ao longo das mesas na cobrejunta, dado pela equação 3.41, e é aplicável quando as dimensões da cobrejunta já foram estabelecidas.

$$No_{pregos} = \frac{0.5 \times M_{cs}}{(d - t_r) \times Q} \quad (3.40)$$

Onde No_{pregos} é o número de pregos necessário para cada mesa, para cada lado da ligação;
 M_{cs} é o momento de cálculo na interface da alma cobrejunta com a viga;
 d é a altura total da seção da viga;
 Q é a máxima força resistida pelo prego;
 t_r é a espessura das mesas da viga.

$$s = \frac{2Q}{3M} \left[\frac{L_N^2 + 3d_N^2}{\sqrt{1 + \left(\frac{d_N}{L_N}\right)^2}} \right] \quad (3.41)$$

Onde: s é o espaçamento entre pregos ao longo da mesa;
 M é o momento total de cálculo na ligação;
 d_N é a distância entre as linhas de pregos das mesas;
 L_N comprimento da mesa sob a cobrejunta.

Para o dimensionamento das peças de madeira e compensado da cobrejunta, WOODARD (1995) apresenta as equações (3.42) a (3.44)

$$G_L = d + (G_R \times \cos(\alpha) - d) \times \left[\frac{G_C + \frac{d}{2} \times \tan(\alpha)}{G_C + G_R \times \sin(\alpha)} \right] \quad (3.42)$$

$$M_{lcs} = R_H \times L_C - R_V \times \frac{(G_L - d)}{2} \quad (3.43)$$

$$t_{eff} = \frac{M_{lcs}}{0.15 \times G_L^2 \times F_t} \quad (3.44)$$

Onde: G_L é o comprimento da linha das tensões críticas;

d é a altura da seção composta;

G_C é o comprimento da cobrejunta ao longo da coluna;

G_R é o comprimento da cobrejunta ao longo da viga;

α é a inclinação do telhado;

M_{lcs} é o momento ao longo da seção das tensões críticas;

R_H é a reação horizontal na ligação;

L_C é a altura da coluna;

t_{eff} é a espessura efetiva de uma cobrejunta;

F_t é a resistência a tração de cálculo do compensado.

É importante observar que os trabalhos de WOODARD (1995) e MILNER&WOODARD (1995) são direcionados para a resistência das ligações em nó de pórtico de estruturas compostas com alma em compensado, não tendo referência à rigidez de tais ligações.

3.4. Conclusões

Do estudo sobre ligações realizado na bibliografia, conclui-se que:

1) O claro entendimento do comportamento das ligações é essencial para a implantação de métodos mais racionais de cálculos estruturais. Sem esse conhecimento, a aplicação dos métodos dos Estados Limites pode ser corrompida, afastando os resultados teóricos do comportamento real.

2) A resistência de uma ligação em madeira por pino metálico é função da resistência ao escoamento do pino e da resistência ao embutimento da madeira. Tanto na flexão do pino quanto no embutimento na madeira o comportamento é plástico. O efeito do atrito entre as peças é desprezível.

3) Nos elementos compostos de seção I ou caixão com alma em compensado com ligação alma mesa pregada ou parafusada, a rigidez das ligações deve ser diretamente computada no dimensionamento, sendo a distribuição dos esforços na estrutura dependente do comportamento dessas ligações. Assim, no desenvolvimento das expressões a serem utilizadas nesse dimensionamento deve ser considerada a influência do deslizamento relativo entre as peças que compõem a seção devido às deformações nas ligações, calculando-se um módulo de rigidez efetivo $(EI)_{ef}$ em função das propriedades de rigidez de cada elemento que compõe a seção, da geometria da seção, do módulo de deslizamento K da ligação e do espaçamento entre conectores.

4) Entre os critérios de dimensionamento apresentados por códigos normativos pesquisados, os do EUROCODE 5 são os mais indicados, pois consideram os efeitos da composição parcial da seção, levando em consideração o número de pinos e o módulo de deslizamento da ligação. Da pesquisa bibliográfica observou-se também que o método de dimensionamento do EUROCODE 5 resulta em valores próximos de valores obtidos em ensaios de vigas compostas realizados por alguns autores.

5) O comportamento das ligações deve ser avaliado tanto na análise local, da própria ligação, quanto na análise global da estrutura, pois a rigidez das ligações pode afetar a distribuição de tensões internas e os deslocamentos da estrutura. Os critérios de dimensionamentos atuais normalmente assumem que uma ligação é ou engaste perfeito ou rótula perfeita, porém, como o embutimento na madeira produz grandes deformações nas ligações, a rigidez da ligação deve ser analisada no dimensionamento.

6) As teorias para a determinação da rigidez das ligações encontradas atualmente são baseadas em ligações entre elementos de seção cheia, como madeira maciça, madeira laminada colada, etc. Porém, utilização desses critérios é questionável no caso de seções compostas devido principalmente à natureza diferente dos elementos que compõem a seção e dos mecanismos de transferência de tensão entre esses elementos. MILNER&WOODARD (1995) relatam que na resistência o comportamento dessas ligações em estruturas com alma em compensado é bastante diferente do comportamento de ligações em seção cheia. Com relação à rigidez das ligações, não foi encontrada nenhuma referência em elementos compostos com alma em compensado.

4. Dimensionamento de vigas de seção composta com chapas de compensado

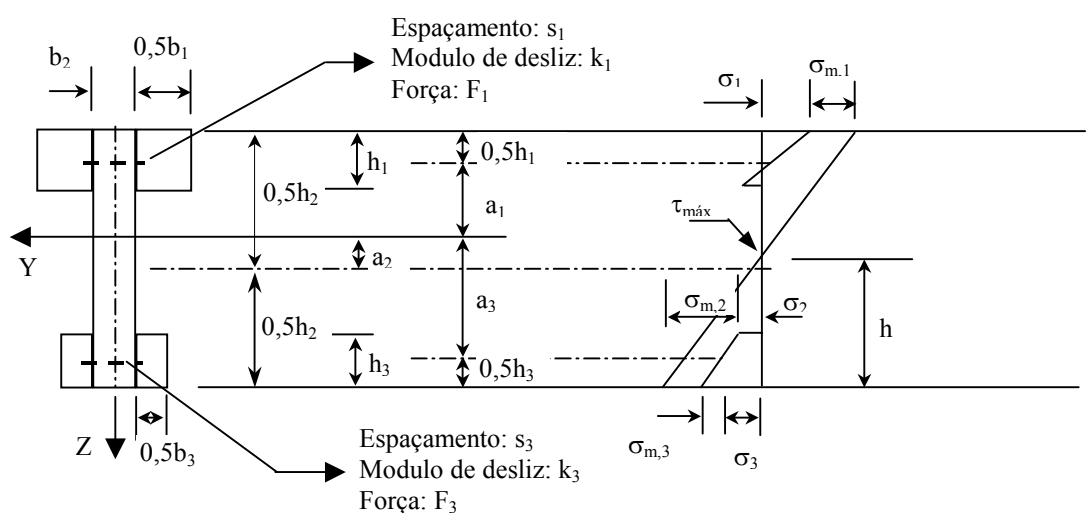
Vários códigos normativos internacionais apresentam critérios de dimensionamento de vigas de seção composta com almas em compensado. SANTANA (1997) fez um estudo sobre esses códigos e comparou com resultados de ensaios em corpos de prova de seção I. Entre esses, os critérios apresentados pelo EUROCODE 5 foi o que resultou em valores mais próximos dos obtidos nos ensaios. Por considerar os efeitos das ligações por pinos metálicos na rigidez efetiva da seção, os critérios do EUROCODE 5 são os que mais se adequam ao propósito deste trabalho. Outros métodos de dimensionamento também pesquisados são apresentados nesse capítulo a fim de acrescentar informações àquelas fornecidas pelo EC 5.

4.1. Dimensionamento segundo o EUROCODE 5

A seguir são apresentados sucintamente os critérios de dimensionamento de viga composta de seção I ou caixão utilizando chapas de compensado como almas, segundo o EUROCODE 5. As bases para o desenvolvimento das equações a seguir são apresentadas por KREUNZINGER (1995), e estão reproduzidas no item 3.2 desta monografia

Geometria da seção.

Para as seções em questão: I ou caixão, os seguintes parâmetros são importantes:



A rigidez ao momento efetiva pode ser dada por:

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

Considerando os valores médios de E e onde:

$$A_i = b_i h_i$$

$$I_i = b_i h_i^3 / 12$$

$$\gamma_2 = 1$$

$$\gamma_i = \left[1 + \pi^2 E_i A_i s_i / (K_i l^2) \right]^{-1}$$

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

para seções T, $h_3 = 0$

tensões normais:

As tensões normais podem ser calculadas por:

$$\sigma_i = \gamma_i E_i a_i M / (EI)_{ef}$$

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

Tensão máxima de cisalhamento:

A máxima tensão de cisalhamento ocorre onde as tensões normais são zero. A máxima tensão de cisalhamento na parte 2 da seção transversal pode ser tomada como:

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

Carga no pino:

A carga no conector (F_i) pode ser tomada como:

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

Com $i = 1$ e 3 , onde $s_i = s_i(x)$ é o espaçamento dos pinos e $V = V(x)$.

4.2. Dimensionamento segundo o Plywood Design Specifications, PDS, Supplement 2 (AMERICAN PLYWOOD ASSOCIATION, APA, 1983)

Segundo o PDS (1983), suplemento 2, publicação da American Plywood Association, que especifica os critérios de dimensionamento de vigas compostas com compensado, a flecha

resultante do cisalhamento deve ser considerada no cálculo da flecha total da estrutura. Especificando como flechas limites os valores:

Vigas de piso:

Somente cargas variáveis: $l/360$

Peso próprio mais cargas variáveis: $l/240$

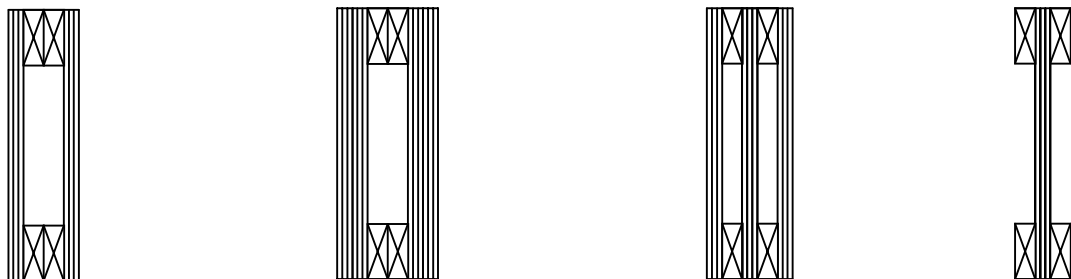
Vigas de cobertura:

Somente cargas variáveis: $l/240$

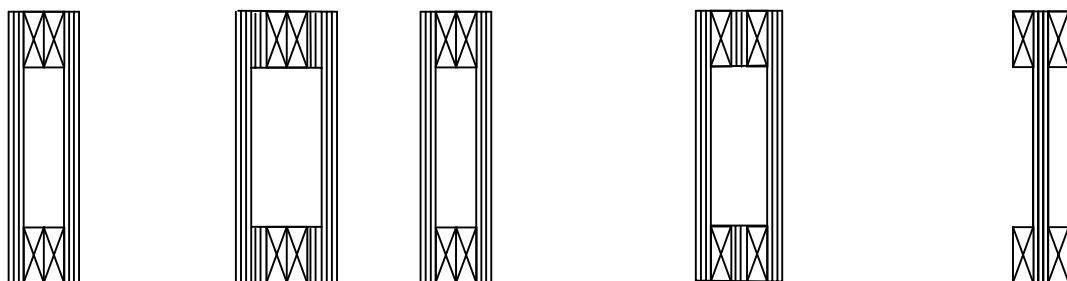
Peso próprio mais cargas variáveis: $l/180$

Ainda no PDS (1983), suplemento 2, estão apresentadas algumas seções típicas de elementos compostos com madeira compensada. Considerando-se que as tensões cisalhantes são maiores próximas dos apoios, o consumo de madeira compensada deve ser maior nesta região, podendo ser diminuído no centro do vão. O PDS apresenta algumas alternativas para a composição das seções destes elementos, apresentados na figura 18.

Segundo HOYLE (1973), enrijecedores verticais de madeira devem ser colocados entre as mesas para prevenir a flambagem da alma e transferir cargas e forças entre as mesas.



Seções típicas na região dos apoios



Seções típicas no meio do vão

Figura 18 – Seções típicas de vigas compostas com compensado. Fonte: PDS (1983), suplemento2.

Os critérios de dimensionamento do PDS são apresentados por HOYLE (1973), que detalha os procedimentos de um projeto de uma viga composta da madeira compensada para um conjunto de cargas, vão e deslocamento, o procedimento de cálculo apresentado por HOYLE (1973), esses procedimentos consistem em:

1. Estimar a dimensão aproximada da viga necessária;
2. Determinar os momentos de flexão, momentos de inércia e módulo de elasticidade necessários à seção;
3. Determinar o cisalhamento horizontal e espessura necessária do compensado;
4. Determinar o cisalhamento na junção entre a mesa e a alma, escolher as dimensões da mesa e da alma e estudar o arranjo para fornecer área suficiente para resistir ao cisalhamento;
5. Calcular o deslocamento baseado nas propriedades da seção e compará-lo ao critério de dimensionamento, alterando, se necessário, as propriedades da seção para encontrar este critério;
6. Determinar as dimensões dos enrijecedores e seus espaçamentos.
7. Determinar os detalhes das emendas para almas e mesas.

A princípio, pode-se observar que não consta neste procedimento o dimensionamento das ligações. Em seu texto, HOYLE (1973) apresenta um exemplo para dimensionamento deste tipo de estrutura, onde dimensiona apenas ligações coladas, considerando a seção como monolítica.

Acompanhando estes procedimentos, no primeiro passo, onde é feito um pré-dimensionamento da seção, Hoyle utiliza uma tabela onde, a partir das relações entre vão e carregamento linear na viga, encontra-se uma seção inicial a ser adotada nos cálculos. Em se tratando de madeiras e compensados de características de rigidez e resistência muito diferentes, como é o caso dos encontrados no Brasil, esta tabela certamente não é um bom parâmetro, necessitando de estudos para aferir seus resultados para a utilização dos produtos nacionais.

No segundo passo, na determinação do momento de inércia e de flexão, a consideração da semi-rigidez das uniões pregadas pode levar a momentos de inércia e de flexão inferiores aos considerados nas seções monolíticas. Estas considerações também são válidas para o terceiro passo.

Para o quarto passo, Hoyle apresenta apenas o método de dimensionamento de uniões entre mesa e alma por meio de adesivo, não apresentando nenhuma consideração sobre uniões por pinos metálicos.

A não abrangência das ligações por pinos deixa uma lacuna muito grande também no quinto passo, pois a deformação devido à composição parcial da seção é significativa, não podendo ser desconsiderada no cálculo da flecha total.

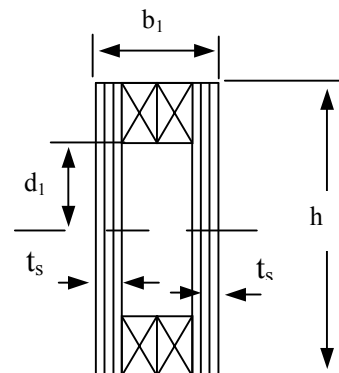
Ainda no quinto passo, HOYLE utiliza um ábaco, extraído do PDS, suplemento 2, para encontrar um coeficiente k , usado no cálculo da flecha devido às deformações por cisalhamento. Este ábaco, para cálculo simplificado da flecha por cisalhamento, é baseado nas características geométricas do elemento estrutural e no tipo de carregamento. Observando o texto do PDS, suplemento 2, este apresenta a formulação completa para o cálculo do coeficiente k , transcrita abaixo:

$$k = \frac{\frac{9}{2} \left[\frac{1}{P} (1-s) + s \right] \left\{ \frac{1}{P^2} \left[\frac{s^5}{2} - s^3 + \frac{s}{2} \right] + \frac{1}{P} \left[-s^5 \left(\frac{3}{30\beta} + \frac{2}{3} \right) + s^3 \left(\frac{1}{3\beta} + \frac{2}{3} \right) - \frac{s}{2\beta} + \frac{8}{30\beta} \right] + \frac{8s^5}{30} \right\}}{\left[\frac{1}{P} (1-s^3) + s^3 \right]^2}$$

sendo: $s = \frac{2d_1}{h}$;

$$p = \frac{\sum t_s}{b}$$
 ;

$$\beta = \frac{G_{\text{mesas}}}{G_{\text{almas}}}$$



onde G é o módulo de elasticidade transversal.

Para a construção do ábaco, considerou-se $G_{\text{almas}} = G_{\text{mesas}}$. No caso das madeiras brasileiras, onde existe uma grande variedade de classes de resistências, a utilização deste ábaco pode levar a resultados insatisfatórios.

Não existem estudos sobre a deformação por cisalhamento em vigas compostas utilizando madeiras maciças e compensadas brasileiras, sendo necessária a avaliação da aplicabilidade do ábaco e das formulações apresentadas para o dimensionamento de vigas utilizando os produtos nacionais.

Os passos sexto e sétimo não apresentam detalhes no dimensionamento que possam influenciar na eficiência do elemento quando composto por materiais com características diferentes das utilizadas por HOYLE.

4.3. Outros códigos normativos

Como já mencionado anteriormente, a NBR 7190:1997 não apresenta muitos detalhes para o dimensionamento de estruturas compostas com chapas de compensado. A respeito dessas estruturas afirma apenas que na flexão essas devem ser dimensionadas considerando apenas a contribuição das mesas tracionadas e compridas no cálculo das tensões normais, sem redução das suas áreas, e as almas e ligações devem ser dimensionados em função do cisalhamento, considerando-se a viga como plenamente composta.

A norma DIN 1052 apresenta os critérios de dimensionamento semelhantes aos do EUROCODE 5, com algumas equações trabalhadas de outra maneira, sendo o seu desenvolvimento o mesmo das equações do EC 5. Como diferenças, nota-se que a Norma DIN apresenta no seu equacionamento considerações sobre a área e a inércia da seção total e descontando os furos dos pregos.

A norma britânica BS 5268 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 os fatores de modificação K_{27} , K_{28} e K_{29} , referentes às características geométricas das mesas e os módulos de elasticidade das mesmas.

O Structural Timber Design Code, do CONSEIL INTERNATIONAL DU BÂTIMENT, apud SANTANA (1997) 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 do

módulo de deslizamento das ligações em função do módulo de elasticidade da madeira e do diâmetro do pino metálico.

No Brasil, poucas publicações trataram do dimensionamento de seções compostas por chapas de madeira compensada, entre essas pode-se citar PERILLO (sd) e PFEIL (1985). Perillo apresenta os critérios de dimensionamento desenvolvidos por ele, baseados em normas estrangeiras da época (década de 40), onde não são consideradas nem as deformações por cisalhamento nem pela deformabilidade das ligações, sendo apenas consideradas a teoria de flexão para o dimensionamento das seções. Já Pfeil apresenta em seu trabalho os mesmos critérios de dimensionamento da DIN 1052.

5. Materiais e Métodos

Para o estudo do comportamento de vigas compostas e suas ligações se fez necessária, além do estudo teórico, a realização de ensaios de laboratório para aferir modelos matemáticos ou para obter parâmetros para serem usados em tais modelos.

Para o estudo proposto nesse trabalho foram inicialmente caracterizados todos os materiais envolvidos nos ensaios. Entendendo-se por caracterização a determinação das propriedades físicas, de resistência e rigidez dos elementos que compuseram os corpos-de-prova de vigas, ligações e do pórtico.

Para aferir os modelos teóricos de comportamento das vigas compostas encontradas na bibliografia foram realizados ensaios em vigas compostas pregadas e coladas. Da pesquisa bibliográfica realizada, concluiu-se que o comportamento dessas vigas já está suficientemente estudado e registrado na bibliografia internacional, porém alguns ensaios foram realizados para verificar a utilização dos critérios de dimensionamento encontrados na bibliografia.

Diferentemente do conhecimento do comportamento das vigas compostas, não foram encontradas referências sobre o estudo da rigidez de ligações de nós de pórtico em estruturas compostas com compensado e madeira maciça, criando uma lacuna no dimensionamento de pórticos utilizando essas seções compostas.

A seguir estão apresentados detalhadamente os procedimentos adotados nos ensaios.

5.1. Caracterização dos materiais

Para fornecer parâmetros para as análises experimentais e numéricas do trabalho, foi feita a caracterização das propriedades físicas e mecânicas dos materiais utilizados nesta análise. Os procedimentos de ensaios bem como os corpos-de-prova estão detalhados a seguir.

5.1.1. Madeira Maciça

Os corpos de provas e procedimentos de ensaios utilizados para determinação das propriedades das madeiras maciças utilizadas nesse trabalho foram os Anexo B da NBR 7190/9. As propriedades das madeiras maciças relevantes para análise nesse trabalho são: compressão e tração paralela às fibras e embutimento.

Em virtude da utilização da formulação para dimensionamento de vigas compostas a ser utilizada na análise dos resultados desse trabalho ser a apresentada pelo EUROCODE 5, os ensaios de embutimento foram analisados seguindo as recomendações de duas normas: a NBR 7190/1997, Anexo B, e o prEN 383, do COMITÊ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO(1993). Prevendo essas duas análises, durante os ensaios de embutimento os corpos-de-prova foram carregados até que a deformação pelo embutimento ultrapassasse 5mm, que é a determinação do prEN 383. Os ciclos de carregamento utilizados foram os recomendados pelo Anexo B da norma brasileira, e as equações para cálculo dos coeficientes de rigidez K do prEN foram corrigidas para esses ciclos de carregamento.

A NBR 7190:1997 não faz menção ao módulo de deslizamento no embutimento, porém apresenta a inclinação da curva de embutimento na “figura B.28 – Diagrama tensão deformação específica de embutimento”, reproduzida aqui na figura 19, que pode ser considerada como módulo de deslizamento elástico no embutimento (K_{emb}).

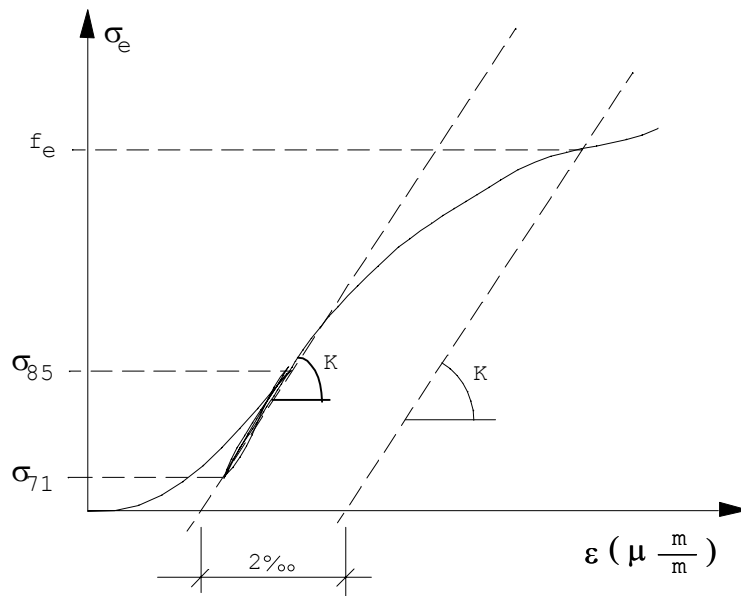


Figura 19 – Diagrama tensão deformação específica de embutimento. Fonte: NBR 7190/97.

O equacionamento apresentado pelo prEN 383, baseado em ciclos de carregamento de picos mínimos e máximos nos ciclos de 10% e 40% respectivamente é apresentado a seguir, bem como as correções necessários para os ciclos de mínimos e máximos de 10% e 50% utilizados nos ensaios seguindo a recomendação do Anexo B da NBR 7190:1997.

A resistência ao embutimento f_e e a resistência ao embutimento estimada $f_{e,est}$ devem ser calculadas, segundo o prEN 383, com precisão de 1% usando as fórmulas a seguir:

$$f_e = \frac{F_{\max}}{d \times t} \qquad f_{e,est} = \frac{F_{\max,est}}{d \times t}$$

Para as medidas de deformação, os seguintes valores, se relevantes, devem ser calculados (valores para ciclos de 10% a 40%):

deformação inicial: $w_i = w_{04}$

deformação inicial modificada: $w_{i,mod} = 4/3(w_{04} - w_{01})$

deformação elástica: $w_e = 2/3(w_{14} + w_{24} - w_{11} - w_{21})$

módulo de deslizamento básico inicial: $K_i = \frac{0,4F_{e,est}}{w_i}$

módulo de deslizamento básico: $K_s = \frac{0,4F_{e,est}}{w_{i,mod}}$

$$\text{módulo de deslizamento elástico básico: } K_e = \frac{0,4F_{e,est}}{w_e}$$

Para ciclos de 10% a 50%, que foram utilizados nos ensaios por ser a recomendação da NBR 7190:1997, a formulação se altera para:

$$\text{deformação inicial: } w_i = w_{04}$$

$$\text{deformação inicial modificada: } w_{i,mod} = 5/4(w_{05} - w_{01})$$

$$\text{deformação elástica: } w_e = 5/8(w_{15} + w_{25} - w_{11} - w_{21})$$

$$\text{módulo de deslizamento básico inicial: } K_i = \frac{0,5F_{e,est}}{w_i}$$

$$\text{módulo de deslizamento básico: } K_s = \frac{0,5F_{e,est}}{w_{i,mod}}$$

$$\text{módulo de deslizamento elástico básico: } K_e = \frac{0,5F_{e,est}}{w_e}$$

Todos os ensaios de embutimento em madeira maciça foram realizados na Máquina Universal DARTEC, de capacidade de 100kN, do LaMEM.

5.1.2. Madeira Compensada

Não existem entre as normas brasileiras procedimentos para a determinação de todas as propriedades do compensado necessárias para o desenvolvimento desse trabalho. Assim, para a determinação de propriedades cujo procedimento de ensaio não está normalizado, foram utilizados procedimentos propostos por autores nacionais e pelas normas estrangeiras, EUROCODE 5 e ASTM D-143 (1981), ASTM 3500-76 (1981) e ASTM 2719 (1981).

Em resumo, a determinação do teor de umidade e da massa específica do compensado foi feita de acordo com as normas da ABNT. Para a determinação da resistência e dos módulos de elasticidade do compensado na tração, compressão e cisalhamento foram utilizados os métodos da ASTM D-143 (1981), ASTM 3500-76 (1981) e ASTM 2719 (1981) respectivamente, que foram analisados por RIBEIRO (1986). Os ensaios de embutimento no compensado foram realizados de acordo com o procedimento proposto pelo Anexo B da NBR 7190/97, fazendo-se as adaptações já utilizados por STAMATO (1997). Estas adaptações são referentes às espessuras dos corpos-de-prova, onde foram utilizadas as espessuras das chapas de compensado analisadas. Os procedimentos e corpos-de-prova são apresentados detalhadamente a seguir.

5.1.2.1. Compressão paralela e normal às fibras de face

Os ensaios de compressão paralela às fibras foram realizados seguindo o método de ensaio de compressão paralela às fibras da madeira maciça proposto pela NBR 7190/97, adaptado segundo proposto por RIBEIRO (1986), baseado no método da ASTM D-143 (1981), que propõe a utilização de corpos-de-prova compostos por várias chapas de compensado coladas até se atingir a espessura desejada para o corpo-de-prova. No presente trabalho, porém, foram adotadas as dimensões especificadas pela NBR 7190/97 para corpos-de-prova de compressão paralela, cujas dimensões são: 50mm×50mm×150mm. Colando chapas de compensado suficientes para se chegar à espessura de 5cm, conforme a figura 20.

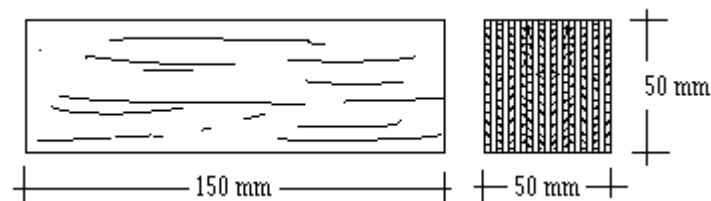


Figura 20 – Corpo-de-prova de compressão paralela em compensado. Fonte: RIBEIRO (1986)

As dimensões dos corpos-de-prova para ensaios de compressão normal às fibras das lâminas de face são semelhantes ao apresentado na figura 20, porém com as lâminas de face posicionada perpendicular ao eixo longitudinal da peça.

Os procedimentos de carregamento, medição da deformação e cálculo dos módulos de Elasticidade obtidos do ensaio foram os mesmos apresentados para o ensaio de compressão paralela na madeira maciça do Anexo B da NBR 7190:1997.

5.1.2.2. Tração paralela e normal às fibras de face

De maneira análoga ao adotado para os ensaios de compressão, nos ensaios de tração foram adotados os corpos-de-prova utilizados por RIBEIRO (1986), apresentado na figura 21, que foi extraído da ASTM 3500-76 (1981) e os procedimentos de ensaio especificados pelo anexo B da NBR 7190/97.

A alteração do corpo-de-prova, nesse caso, é necessária porque os corpos-de-prova recomendados pela NBR 7190/97 provocariam uma redução da seção pela eliminação das lâminas mais externas. Já nos corpos-de-prova apresentados pela ASTM 3500-76 (1981) a

redução da seção se faz na largura, mantendo-se as características originais da chapa na região central do corpo-de-prova onde deve ocorrer a ruptura.

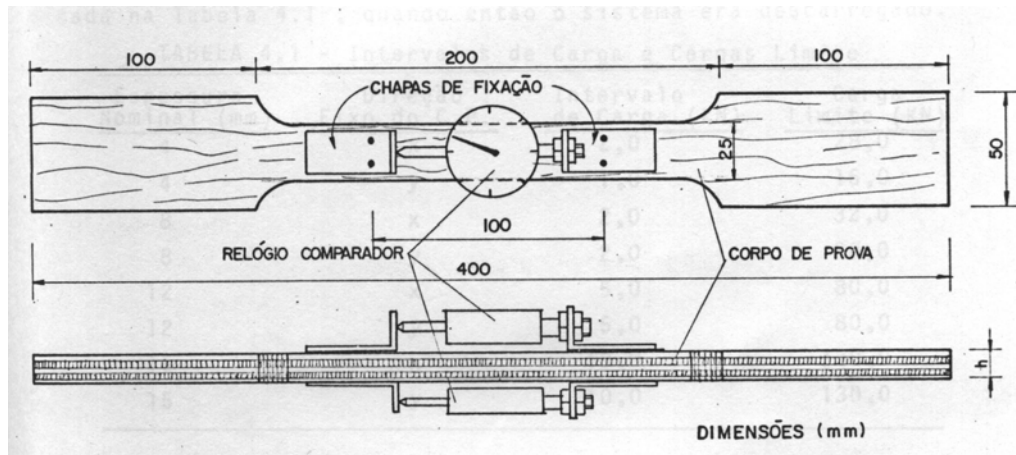


Figura 21 – Corpo-de-prova de tração de compensado. Fonte: ASTM D 3500-76.

Foram realizados ensaios de tração paralela às fibras das lâminas de face e normal às fibras das lâminas de face, adotando-se a mesma geometria do corpo-de-prova, porém variando-se a posição do corte em relação às fibras das lâminas de face.

5.1.2.3. Resistência ao cisalhamento e módulo de elasticidade transversal

Os ensaios de cisalhamento das chapas de compensados foram realizados de acordo com o método ASTM D-2719 (1981), que permite a obtenção do módulo de elasticidade transversal e é aplicável a corpos-de-prova de grandes dimensões. O dispositivo de ensaio de cisalhamento foi construído na oficina mecânica da EESC e é apresentado nas figuras 22 e 23.

Segundo ASTM D2719 (1981), esse procedimento de ensaio consiste em carregamento aplicado sobre guias de madeira maciça coladas em ambos os lados do corpo-de-prova, nas quatro extremidades de cisalhamento. Carrega-se o corpo-de-prova com um sistema de pinos e braços metálicos aplicando-se forças nas guias de madeira, com a resultante atuando na borda da área de cisalhamento. A máxima resistência ao cisalhamento é determinada pela máxima força cisalhante aplicada, e o módulo de elasticidade transversal determinado em função das deformações diagonais do corpo-de-prova e de suas forças correspondentes.

O corpo-de-prova para ensaios de cisalhamento deve possuir aresta não inferior a 61 cm (3721 cm^2) e não deve exceder 48 vezes a espessura da chapa, como apresenta a figura 22.

As guias de madeira devem ter comprimento igual à aresta L do corpo-de-prova, espessura maior que $L/25$ e largura maior que $L/6$, e devem ser coladas rigidamente ao compensado. As quinas do corpo-de-prova devem ser cortadas arredondadas, com raio de 1,25 cm.

O dispositivo de ensaio deve ser carregado à tração. A velocidade do carregamento deve ser calculada como por:

$$v = ZL / \sqrt{2}$$

Onde v é a velocidade de carregamento, em cm/min.

L é o comprimento de cisalhamento de uma das arestas do CP (cm)

Z é a razão de deformação no cisalhamento, tomada como 0,005 cm/cm/min.

As medidas de força e deformação devem ter um erro máximo de 1%. Os valores de deformação para a obtenção do módulo de elasticidade transversal devem ser tomadas sobre uma base de medida maior que $1/6$ e menor que $3/4$ da aresta L , e devem ser obtidas na direção vertical, ou seja, aquela referente à tração na diagonal do CP, nas duas faces opostas, com precisão de 2%.

A resistência ao cisalhamento deve ser tomada como sendo:

$$\tau = 0,707 \left(\frac{P}{L \times t} \right)$$

onde τ é a resistência ao cisalhamento (N/m²);

P a força máxima aplicada (N);

L é o comprimento de cisalhamento de uma das arestas do CP (m);

e t a espessura do corpo-de-prova (m).

O módulo de elasticidade transversal deve ser calculado segundo a equação a seguir:

$$G = 0,3536 \frac{\left(\frac{P}{\Delta} \right)}{\left(\frac{L \times t}{L_1} \right)}$$

Onde G é o módulo de elasticidade transversal (N/m²);

P/Δ coeficiente da curva força \times deslocamento (N/m);

L_1 o comprimento de medida do deslocamento (m).

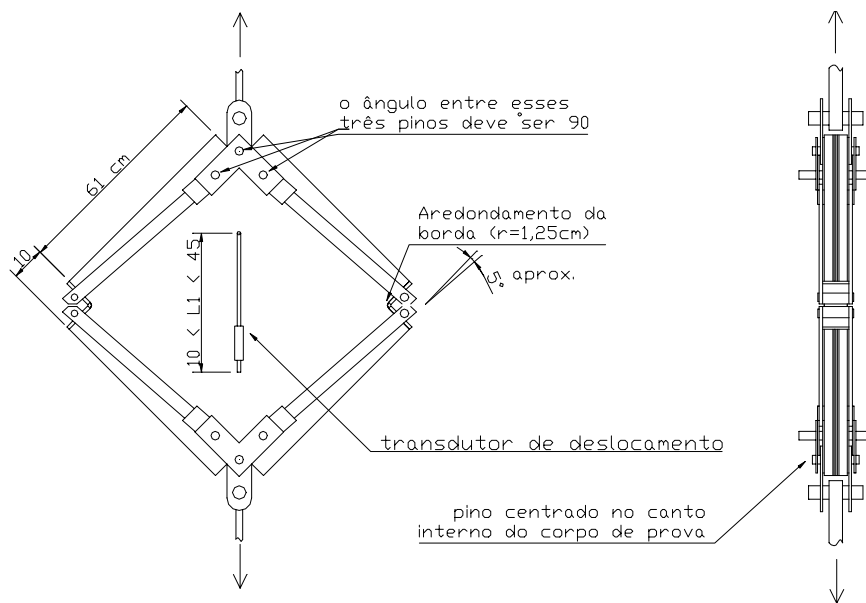


Figura 22 – Dispositivo para ensaios de cisalhamento em chapas de compensado. Fonte: ASTM D 2719

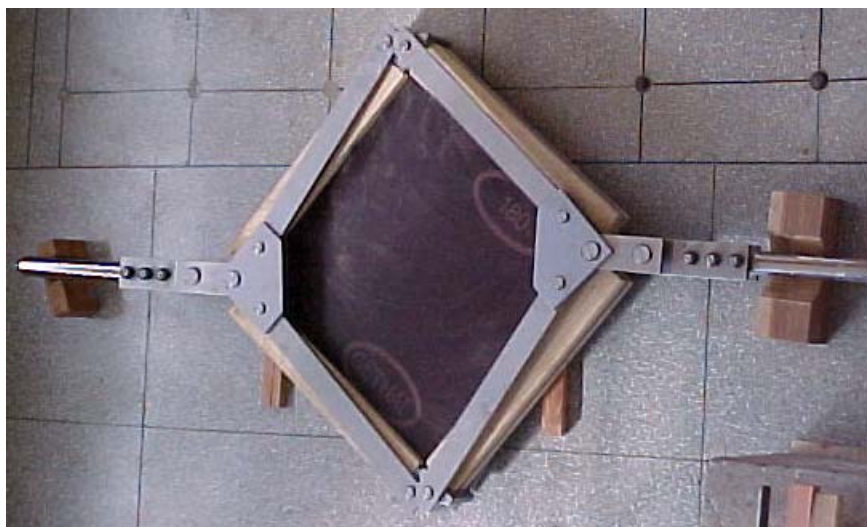


Figura 23 – Foto do dispositivo para ensaios de cisalhamento em chapas de compensado. Fonte: do autor.

5.1.2.4. Embutimento

O método de ensaio adotado para a determinação da resistência ao embutimento da madeira compensada é baseado na norma brasileira NBR 7190/97, que especifica, em seu anexo B, os procedimentos para a determinação de diversas propriedades físicas e mecânicas da madeira maciça. Porém, alguns pontos desse método proposto pela NBR 7190/97 são de difícil aplicação para ensaios de embutimento em compensado, principalmente em relação à espessura dos corpos-de-prova. Neste trabalho foram adotadas as adaptações propostas por STAMATO (1998) para ensaios de embutimento em madeira compensada.

A espessura do corpo-de-prova foi adotada como sendo a espessura comercial em que são produzidas estas chapas, como é proposto pelo prEN383 (1993). Assim, nos ensaios realizados neste trabalho, os corpos-de-prova foram moldados com a espessura comercial das chapas e com as relações altura-largura/diâmetro do pino especificadas pela NBR 7190/97 para madeira maciça.

O método de ensaio utilizado nos ensaios de embutimento do compensado é o mesmo adotado para a madeira maciça, com as adaptações necessárias à execução dos ensaios em madeira compensada.

5.1.3. Pinos Metálicos

Inicialmente foram adotados para os ensaios de vigas pregos de 5,4 mm. Porém, após esses ensaios observou-se a necessidade de se utilizar mais pregos, menos espaçados, para uma melhor distribuição das tensões, bem como para tornar a confecção dos corpos-de-prova mais rápida e eficiente. Optou-se então por pregos de 3,0 mm, fixados por pregador pneumático, que foram utilizados nos corpos-de-prova de nó de pórtico.

5.1.4. Ligações por pinos metálicos.

Do estudo teórico realizado, concluiu-se pela utilização da formulação matemática do EUROCODE 5 para dimensionamento de seções compostas. Para essas condições, é necessário o conhecimento do módulo de deslizamento K (slip modulus) da ligação, sendo, portanto, necessário fazer ensaios para cada configuração alma/mesa/diâmetro do pino utilizada, pois o módulo de deslizamento é função de todos esses fatores.

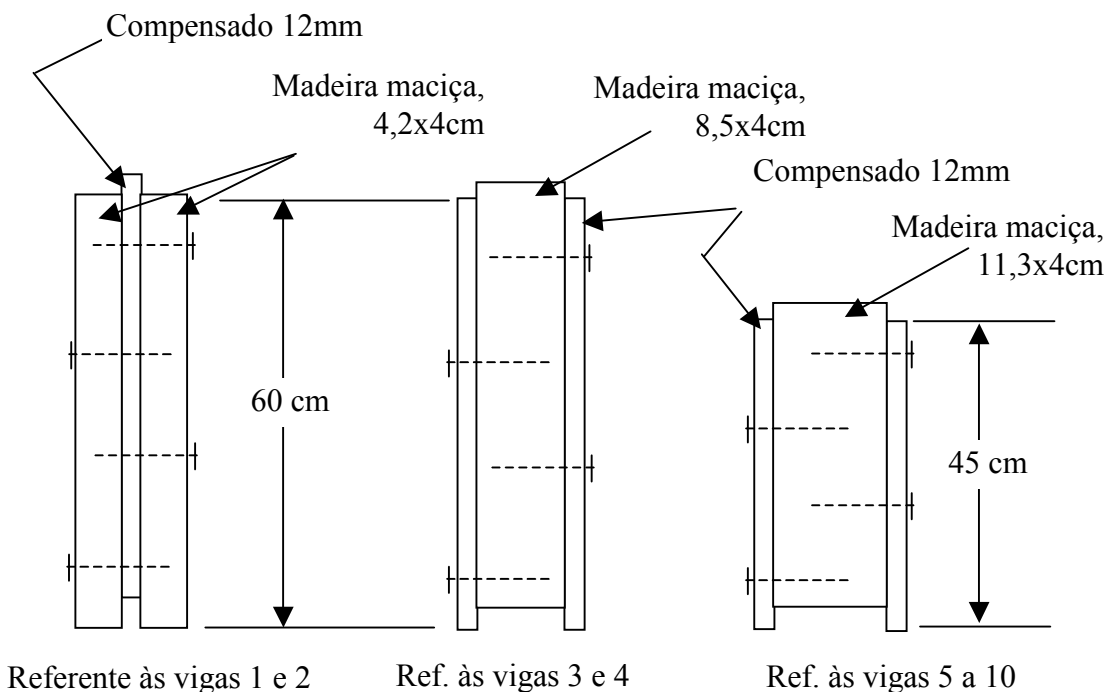
Esses ensaios, que foram recomendados pelo Prof. Ernst Gehri (1999)² para a determinação do módulo de deslizamento das ligações mesa/alma e consistem em carregar um corpo-de-prova de medidas semelhantes às medidas das mesas, almas e pinos metálicos utilizadas nas vigas compostas. Por repetir os mesmos parâmetros da ligação alma/mesa, esse método para a determinação da rigidez já inclui os possíveis efeitos devidos à proximidade entre pinos,

² Comunicação pessoal

diferenças entre as propriedades das almas e das mesas, oferecendo um valor final onde já estão embutidas várias interferências que não são medidas nos ensaios de embutimento.

Como pretendia-se manter exatamente a configuração mesa/alma/diâmetro do pino utilizada nas vigas, foram confeccionados corpos-de-prova diferentes para vigas de seção caixão e vigas de seção I. Para esses ensaios optou-se pela configuração com dois pinos metálicos com espaçamento entre pinos de $4d$, e de borda de $2d$. As configurações dos corpos-de-prova estão apresentadas na figura 24.

Pregos de 5,4mm, com espaçamentos iguais aos utilizados nas vigas 1 a 10 (item 5.3).



Pregos de 3,0 mm, utilizado nos nós de pórtico e na viga 3mm (item 5.3).

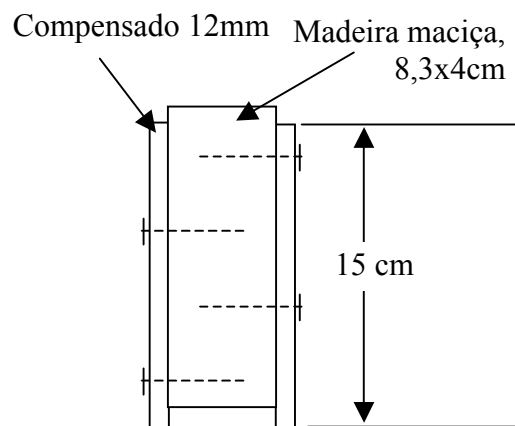


Figura 24 – Corpos-de-prova de ligações pregadas.

O cálculo do valor do módulo de deslizamento K foi feito em função da curva força×deslocamento do corpo-de-prova, utilizando os conceitos apresentados para a determinação dos módulos de elasticidade à compressão e à tração, ou seja, utilizando os valores de força e de deformação correspondentes a 10% e 50% da força estimada máxima no último ciclo de carregamento. Foram descontados dos deslocamentos medidos os deslocamentos referentes à deformação por compressão do compensado, que em alguns casos é significativa no resultado.

Todos os ensaios de ligação foram realizados na máquina Universal DARTEC, do LaMEM/SET. Para a leitura das deformações foi utilizado o transdutor de deslocamento da máquina fixado no prato inferior (atuador) da DARTEC. Seguindo o mesmo procedimento utilizado nos ensaios para as vigas 1 a 4, inicialmente foram montadas com espaçamentos de 15cm e ensaiadas, e então acrescentados os pregos para alcançar espaçamento de 5cm, conforme descrito no item 5.2. As fotos da figura 25 apresentam os corpos-de-prova de ligações. A figura 26 apresenta o corpo-de-prova posicionado na Máquina DARTEC.

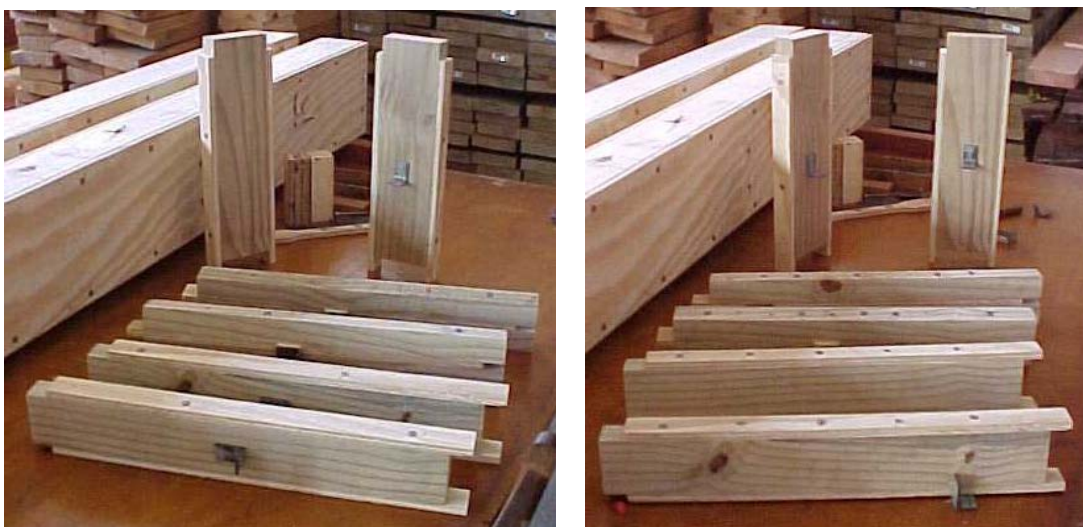


Figura 25 – Fotos de corpos-de-prova de ligações pregadas



Figura 26 – Corpo-de-prova de ligação posicionado na DARTEC.

5.2. Planejamento estatístico

Para os ensaios das vigas compostas e dos nós de pórtico decidiu-se por realizar um planejamento estatístico para uma análise eficiente dos resultados. Para tal, foi elaborado então um planejamento dos ensaios baseado nas teorias de estatística. Tanto para a análise estatística dos resultados das vigas compostas quanto para a análise dos resultados de nó de pórtico optou-se pela análise 2^3 com ponto central, representada pela distribuição apresentada na tabela 1.

Tabela 1 – Atribuição dos valores das variáveis nos corpos-de-prova

CP \ Variável	X1	X2	X3
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1
9	0	0	0

5.2.1. Planejamento estatístico para os ensaios de vigas compostas

O comportamento estrutural das vigas compostas é função de vários parâmetros de rigidez, resistência e geometria dos materiais que compõem a viga. Para o estudo experimental das vigas compostas avaliou-se as influências desses parâmetros no comportamento das vigas com base nas equações já desenvolvido para essas vigas, apresentados na bibliografia. Foi utilizado como referência para o planejamento estatístico o equacionamento do EUROCODE 5, pois esse é o que apresentou considerações mais completas com relação à composição parcial de vigas pregadas.

Foram assumidas as seguintes variáveis independentes para o estudo estatístico das vigas compostas:

X1: Espaçamento entre pinos metálicos

X2: Altura da viga

X3: Relação geométrica alma/mesa.

Na determinação dos valores das variáveis a serem utilizadas nos ensaios de vigas foi considerada a possibilidade de, após a análise dos resultados, estender os ensaios para uma análise em 5 níveis, onde o valor de $X_1^c = 2^{3/4} = 1,68$. Porém, com a realização e a análise dos ensaios em níveis -1 , 0 e $+1$ concluiu-se que não seria necessária a inclusão dos níveis $-1,68$ e $+1,68$.

Observa-se que única diferença entre os corpos-de-provas 1 e 2, 3 e 4, 5 e 6, 7 e 8, é o espaçamento entre os pinos metálicos. Para facilidade dos ensaios cada par desse foi constituído de apenas uma viga, que foi ensaiada primeiramente com o maior espaçamento e após o ensaio foram acrescentados mais pinos atingindo o menor espaçamento. Essa proposta se justifica por se tratar de ensaios não destrutivos, onde foram medidas apenas as flechas nas vigas ainda no estado elástico.

Diante dessas considerações foram determinados os valores máximos e mínimos para as variáveis, da seguinte maneira:

X1: espaçamento entre pinos metálicos.

Esse espaçamento foi determinado considerando-se a possibilidade de se acrescentar os ensaios em 5 níveis. Foi determinado em função dos espaçamentos mínimos exigidos e pensando-se na distribuição dos mesmos na viga com 244 cm.

Os valores considerados foram: ($d=5,7\text{cm}$)

Mínimo(-1): 5 cm ($\sim 9d$)

Médio(0): 10 cm ($\sim 17,5d$)

Máximo(+1): 15 cm ($\sim 26d$)

X2: Altura da viga.

A altura da viga foi determinada buscando um valor médio próximo de $L/10$ (vão/10) e prevendo-se a possibilidade de ensaios em 5 níveis. Avaliando as equações a serem utilizadas no cálculo das flechas, apresentadas a seguir, buscou-se com os valores da altura da viga duas alturas onde a distância entre centros geométricos das mesas (h_{mesa}) das vigas maiores (+1) corresponde o dobro da distância entre os centros nas vigas menores(-1).

Assim, as alturas adotadas foram:

Mínimo(-1): 18 cm ($h_{\text{mesa}}=14\text{cm}$)

Médio(0): 25 cm ($h_{\text{mesa}}=21\text{cm}$)

Máximo(+1): 32 cm ($h_{\text{mesa}}=28\text{cm}$)

X3: Relação geométrica entre alma e mesa.

Observa-se nas equações de cálculo de flecha que a espessura da alma e a área da mesa estão fortemente relacionadas com o deslocamento, a primeira na deformação pelo cisalhamento e a segunda na inércia no cálculo do deslocamento devido à flexão. Adotou-se a relação entre a espessura da alma e a área da mesa. Como apenas uma espessura de compensado estava disponível para os ensaios optou-se pela utilização de uma chapa de compensado (seção I) ou duas chapas de compensado (seção caixa). Assim, com a relação de dobro da espessura da alma entre o máximo(+1) e o mínimo (-1), baseado nas equações de cálculo dos deslocamentos, as vigas com combinação [X2(+1); X3(-1)] e [X2(-1); X3(+1)] com mesmo espaçamento entre pregos terão mesmo deslocamento pela cortante, variando apenas o deslocamento pela flexão, como pode ser observado no equacionamento para cálculo da flecha apresentado no item 5.3.

As relações adotadas foram:

Mínimo(-1): $t_{\text{alma}}/A_{\text{mesa}} = 1/2$ (com $t_{\text{alma}} = 12 \text{ mm}$ e $A_{\text{mesa}} = 4 \times 4 \text{ cm} \times 8,5 \text{ cm}$)

Médio(0): $t_{alma}/A_{mesa} = 3/4$ (com $t_{alma} = 24$ mm e $A_{mesa} = 4 \times 4 \text{ cm} \times 11,3 \text{ cm}$)

Máximo(+1): $t_{alma}/A_{mesa} = 1$ (com $t_{alma} = 24$ mm e $A_{mesa} = 4 \times 4 \text{ cm} \times 8,5 \text{ cm}$)

Para que se tenha um bom controle dos erros nessa análise, foram acrescentadas seis vigas nos pontos centrais, totalizando quatorze vigas ensaiadas. A distribuição final das variáveis nas vigas, bem como a nomenclatura que foi adotada para as vigas estão apresentadas na tabela 2.

Tabela 2 – Relação das características das vigas compostas ensaiadas.

Variável viga	X1: espaç/o (cm)	X2: h _{viga} (cm)	X3: t_{alma}/A_{mesa} (cm/cm ²)
1b	5	18	12/4x4x8,5
1a	15	18	12/4x4x8,5
2b	5	32	12/4x4x8,5
2a	15	32	12/4x4x8,5
3b	5	18	24/4x4x8,5
3a	15	18	24/4x4x8,5
4b	5	32	24/4x4x8,5
4a	15	32	24/4x4x8,5
5	10	25	24/4x4x11,3
6	10	25	24/4x4x11,3
7	10	25	24/4x4x11,3
8	10	25	24/4x4x11,3
9	10	25	24/4x4x11,3
10	10	25	24/4x4x11,3

5.2.2. Planejamento estatístico dos os ensaios nós de pórtico

A rigidez dos nós de pórticos em estruturas de madeira compensada ainda não foi suficientemente estudada a fim de se afirmar quais as variáveis que mais influenciam em seu comportamento. A definição as variáveis estudadas nesses ensaios baseou-se nas teorias de rigidez de ligação apresentada por RACHER(1995), onde a configuração da ligação e o espaçamento ou quantidade de pinos são as variáveis mais importantes na dimensionamento da ligação, bem como as propriedades dos materiais. No presente estudo optou-se por manter

as propriedades dos materiais, utilizando madeira compensada e madeira maciça sempre do mesmo lote, variando a geometria das ligações.

Devido à grande variabilidade dos materiais utilizados na composição de nós de pórtico, optou-se por uma variável de resposta adimensional, que eliminasse as interferências causadas por essa variabilidade. O adimensional utilizado foi a relação R_M . O EUROCODE 5 representa essa relação R_M , sendo:

$$R_M = \frac{M_j}{M_\infty}$$

Onde M_j é o momento atuante na ligação real e M_∞ é o momento referente a uma ligação hipotética de rigidez infinita.

Essa análise é válida para estruturas onde ocorre redistribuição dos esforços, o que não é o caso dos corpos-de-prova de ligações de nó de pórtico ensaiados. Optou-se então pela análise de uma estrutura com ligações semi-rígidas equivalentes às ensaiadas. Para essa análise utilizaram-se os valores de K_r obtidos nos ensaios e calcularam-se os momentos M_j em uma estrutura hipotética utilizando esses elementos segundo a metodologia apresentada por RACHER (1995), descrita no item 3.3 deste trabalho, sendo a estrutura um pórtico biarticulado apresentado na figura 12, com duas ligações semi-rígidas de rigidez rotacional K_r igual ao respectivo corpo-de-prova de nó de pórtico. Considerou-se também a relação $\alpha = 1$ ($\alpha = EI_{\text{viga}}/EI_{\text{coluna}}$) e os módulos de rigidezes das peças, $(EI)_{ef}$ iguais aos dos elementos utilizados no respectivo corpo-de-prova.

Outros dois parâmetros importantes para a análise da rigidez dos nós de pórtico segundo o método de RACHER (1995) são o vão do pórtico (L) e a altura das colunas (H_c). Para uma análise mais geral do comportamento dessas estruturas considerou-se valores extremos de $L/H_c = 1$ ou 10 e valores do vão em relação à altura das vigas (h_v) de 5 a 25 ($5 \leq L/h_v \leq 25$), que condizem com situações reais de dimensionamento. Assim, para os valores citados, encontrou-se os valores de R_M para a combinação de três variáveis: Tipo de ligação (X1); Espaçamento entre pregos (X2) e relação L/h_v (X3).

Foram assumidas as seguintes variáveis para o estudo estatístico dos nós de pórtico:

X1: Tipo de ligação (ver figura 39)

X2: Espaçamento entre pregos

X3: Relação geométrica vão/altura da viga em um pórtico hipotético.

Diante dessas considerações foram determinados os valores máximo e mínimo para as variáveis:

X1: Tipo de ligação

A variável referente ao tipo de ligação é uma variável qualitativa, que se refere à configuração da ligação em relação à geometria das chapas de compensado e da utilização ou não de mísulas. Por ser uma variável qualitativa, a definição dos níveis 0, -1, e +1 é subjetiva. Os tipos de nós de pórtico atribuídos a cada nível estão apresentados na figura 34. Para avaliar o efeito da mísula, adotou-se um tipo de corpo-de-prova sem mísula onde as chapas de compensado são retangulares (CPs “0”), um tipo com mísula a 45° e alongamento igual a uma vez a altura da seção das vigas (CPs “+1”) e um tipo com o compensado em L com prolongamento igual a uma vez a altura da seção das vigas”(CPs “-1”).

X2: Espaçamento entre pinos

Esse espaçamento foi determinado considerando-se a possibilidade de se acrescentar os ensaios em 5 níveis. Foram utilizados pregos de 3,0 mm e os espaçamentos mínimos foram respeitados

Os valores considerados foram:

Mínimo(-1): 20 cm (~6,7d)

Médio(0): 30 cm (~10d)

Máximo(+1): 40 cm (~13,3d)

X3: Relação vão/altura da viga em um pórtico hipotético.

A relação entre o vão do pórtico hipotético e a altura da seção dos elementos considerados é um dos parâmetros que influencia no valor de R_M . Foram adotados para essa variável valores que influenciassem significativamente na resposta. É importante observar que os corpos-de-prova foram montados considerando apenas as variáveis X1 e X2. Os valores da variável X3 foram considerados apenas nos cálculos de R_M para o pórtico hipotético

As relações adotadas foram:

Mínimo(-1): $L/h_v = 5$

Médio(0): $L/h_v = 15$

Máximo(+1): $L/h_v = 25$

Para que se tenha um bom controle dos erros nessa análise, foram acrescentados seis corpos-de-prova nos pontos centrais, totalizando quinze nós ensaiados. A distribuição final das variáveis nos nós de pórtico, bem como a nomenclatura que foi adotada para os CPs estão apresentadas na tabela 3. A tabela 4 apresenta os valores das variáveis utilizadas no cálculo da variável de resposta R_M .

Tabela 3 – Características dos nós de pórtico ensaiados.

Variável viga	X1: tipo de ligação	X2: espaçamento (mm)
-1,-1	-1	20
+1,-1	1	20
-1,+1	-1	40
+1,+1	1	40
0, 0	0	30
0, 0	0	30
0, 0	0	30
0, 0	0	30
0, 0	0	30
0, 0	0	30

Para a análise dos resultados foi utilizado o software MINITAB v.13.

5.3. Ensaio de vigas compostas

As vigas foram então montadas com mesas de madeira maciça de pinus taeda, almas de compensado com lâminas de pinus, de 12mm de espessura e pregos 22x42 (d=5,4mm) da Gerdhal. Uma única viga com pregos de 3mm de diâmetro foi ensaiada a fim de observar o comportamento da viga com esses pregos de menor diâmetro.

As dimensões das vigas foram definidas em função do planejamento estatístico dos ensaios apresentado no item 5.2, e em função das dimensões comerciais de chapas de compensado, evitando a ocorrência de juntas nas almas e mesas. As dimensões das vigas estão apresentadas na figura 27. As fotos da figura 28 ilustram a montagem das vigas compostas.

Tabela 4 – Valores das variáveis utilizadas no cálculo da resposta (R_M) para o pórtico hipotético.

Variável viga	X1: tipo de ligação	X2: espaçamento (mm)	X3: L/h_v
-1,-1	-1	20	5
+1,-1	1	20	5
-1,+1	-1	40	5
+1,+1	1	40	5
-1,-1	-1	20	25
+1,-1	1	20	25
-1,+1	-1	40	25
+1,+1	1	40	25
0,0	0	30	15
0,0	0	30	15
0,0	0	30	15
0,0	0	30	15
0,0	0	30	15
0,0	0	30	15

Além das vigas ensaiadas com pregos de diâmetro 5,4mm, foi montada uma nova viga (V3mm) utilizando pregos de 3,0 mm de diâmetro, espaçados a cada 25mm, para avaliar o comportamento de viga de seção composta utilizando pregos de pequeno diâmetro e cravados com pregador pneumático sem pré-furação.

5.3.1. Esquema estático dos ensaios

Nos ensaios de flexão de vigas compostas as vigas foram apoiadas em suas extremidades (biapoiada) e o carregamento foi composto de duas forças aplicadas nos terços dos vãos, como apresentado na figura 29 e na foto da figura 30.

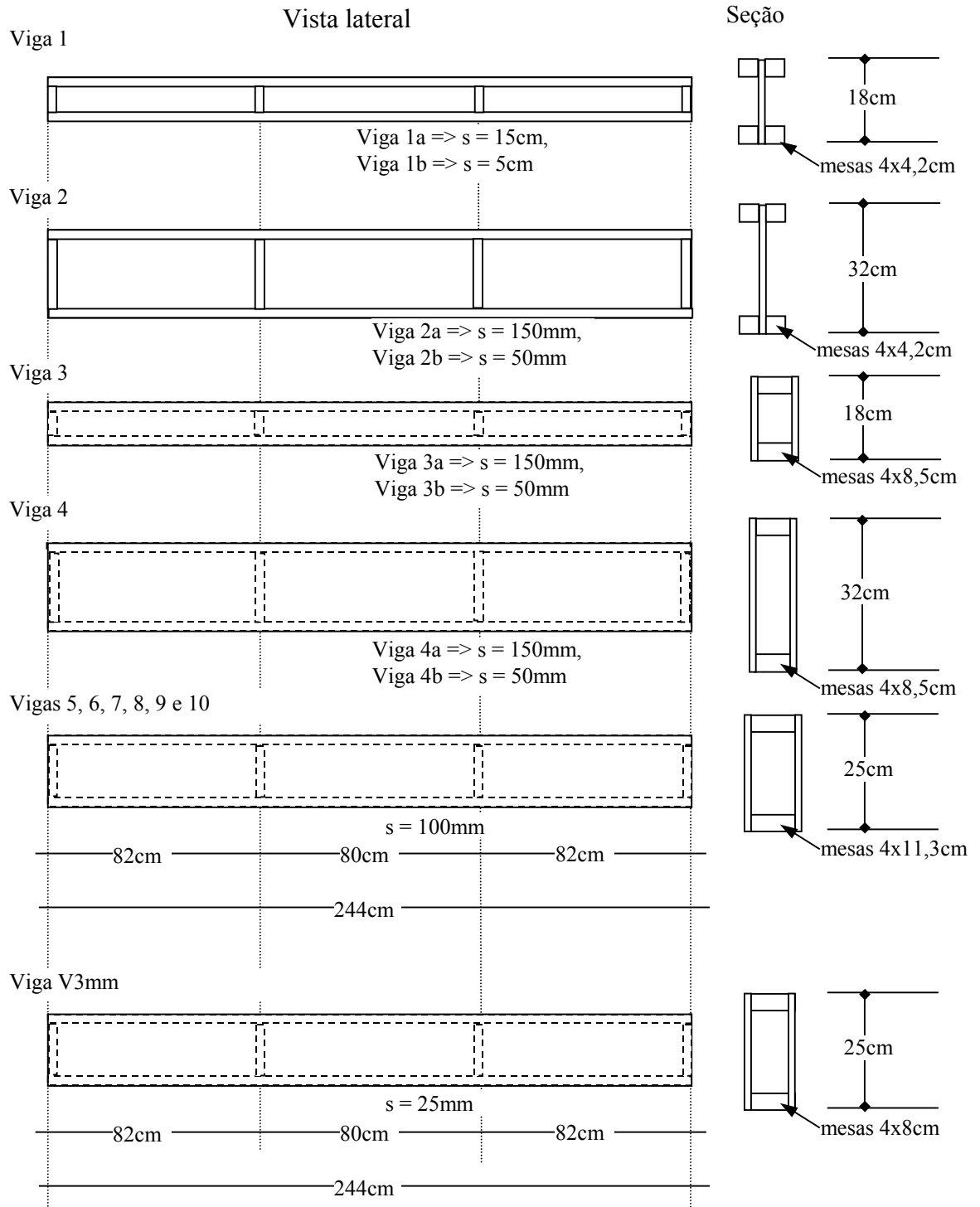


Figura 27 – Dimensões das vigas ensaiadas



Figura 28 – Montagem das vigas compostas

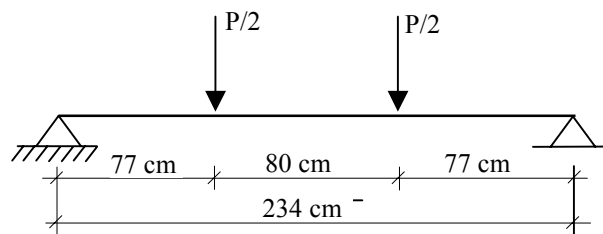


Figura 29 – Esquema estático do ensaio de vigas compostas

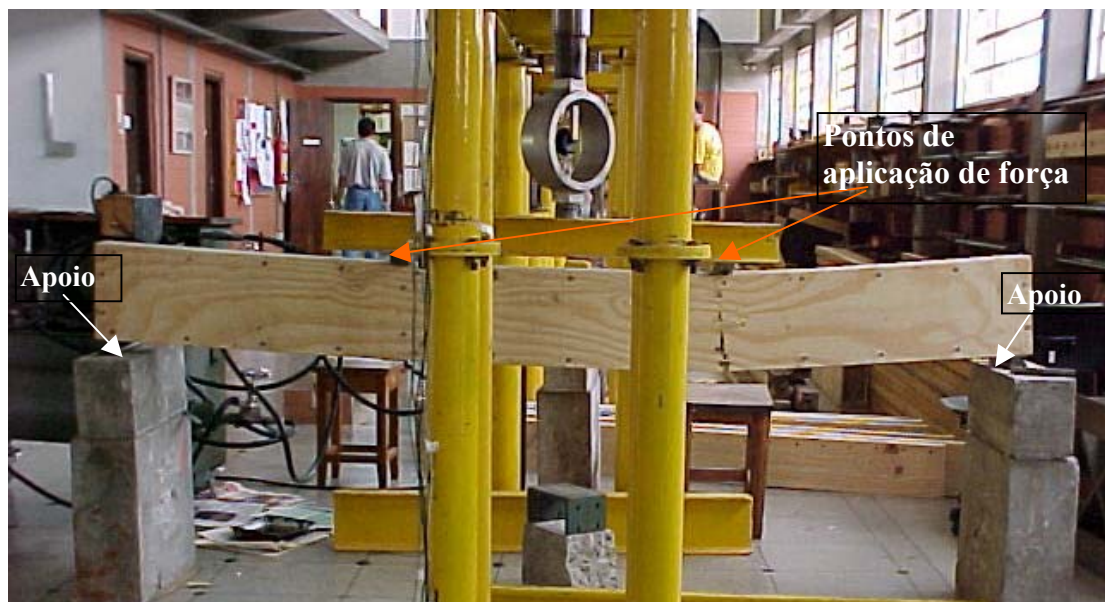


Figura 30 – Esquema estático dos ensaios de flexão nas vigas compostas.

Segundo esse esquema estático, a flecha teórica pode ser calculada como sendo a soma das flechas devidas à flexão e ao cisalhamento:

$$a_t = a_b + a_s$$

$$a_t = \int \frac{M\bar{M}}{EI} ds + \int \frac{V\bar{V}}{A^*G} ds$$

A flecha devida à flexão pode ser calculada pela expressão:

$$a_b = \frac{P \times l^3}{48 \times EI_{ef}} \left(\frac{3a}{l} - \frac{4a^3}{l^3} \right) \text{ ou } a_b = \frac{P \times c}{48 \times EI_{ef}} (3l^2 - 4c^2)$$

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

A flecha devida ao cisalhamento pode ser determinada:

$$a_s = \frac{K_f C}{AG}$$

Onde: a_s é a flecha devida ao cisalhamento,

K_f é o coeficiente de forma da seção,

C é um coeficiente que depende do tipo de carregamento,

A é a área da seção (área das almas + área das mesas)

G o módulo de elasticidade transversal das almas;

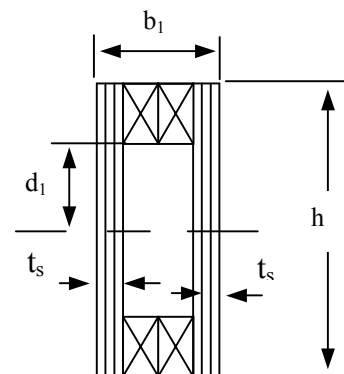
Sendo o equacionamento do coeficiente de forma K_f apresentado a seguir.

$$K_f = \frac{\frac{9}{2} \left[\frac{1}{P}(1-s) + s \right] \left\{ \frac{1}{P^2} \left[\frac{s^5}{2} - s^3 + \frac{s}{2} \right] + \frac{1}{P} \left[-s^5 \left(\frac{3}{30\beta} + \frac{2}{3} \right) + s^3 \left(\frac{1}{3\beta} + \frac{2}{3} \right) - \frac{s}{2\beta} + \frac{8}{30\beta} \right] + \frac{8s^5}{30} \right\}}{\left[\frac{1}{P}(1-s^3) + s^3 \right]^2}$$

$$\text{sendo: } s = \frac{2d_1}{h};$$

$$p = \frac{\sum t_s}{b};$$

$$\beta = \frac{G_{\text{mesas}}}{G_{\text{almas}}}$$



5.3.2. Instrumentação das vigas compostas.

Em todos os ensaios de flexão das vigas foram medidas as flechas referentes aos carregamentos, pois o estudo da rigidez das ligações teve como base esses resultados. Para a obtenção da flecha foi posicionado um relógio comparador, de sensibilidade 0,01mm no centro da viga, em sua face inferior, conforme apresentado na figura 31.

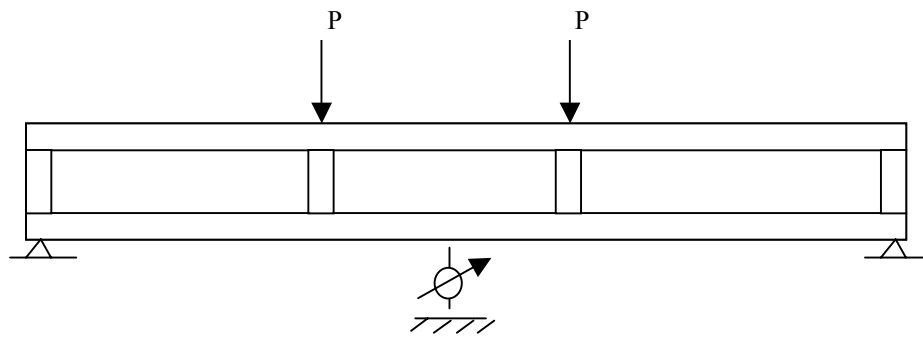


Figura 31 – Montagem do ensaio em vigas compostas para a determinação do deslocamento no meio do vão.

Para auxiliar no estudo do comportamento das vigas compostas, 11 vigas foram instrumentadas com extensômetros elétricos posicionados nos pontos de máxima tensão normal e rosetas retangulares (0° , 45° e 90°) nos pontos de máxima tensão de cisalhamento. As vigas instrumentadas foram: 1a, 1b, 2a, 2b, 3a, 3b, 4a, 4b, 5, 6 e 7, e a posição dos extensômetros elétricos estão apresentados na figura 32.

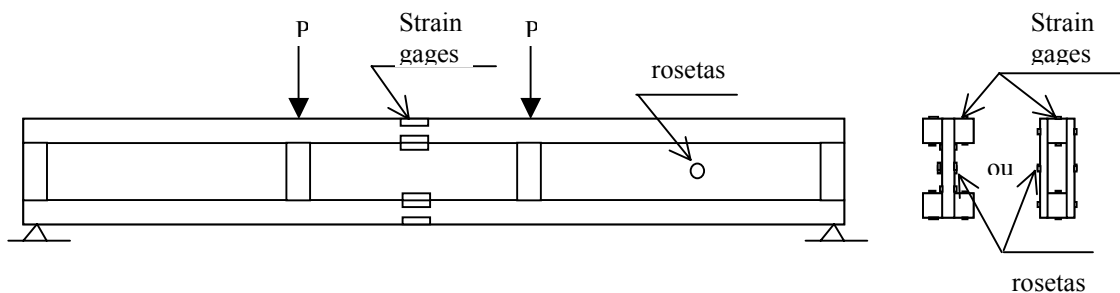


Figura 32 – Posicionamento dos extensômetros elétricos e rosetas (nas fotos) nas vigas instrumentadas

Todos os ensaios de flexão nas vigas compostas foram realizados no LaMEM/SET, com equipamentos disponíveis no próprio Laboratório. Foi utilizado um pórtico de reação de estrutura metálica, montado sobre a laje de reação do LaMEM. O carregamento foi aplicado com cilindro de carga de 25 toneladas de capacidade de carga. A medida da força aplicada

feita por anel dinamométrico com capacidade para 10 toneladas. As leituras dos extensômetros elétricos e rosetas foram feitas em medidor de deformação analógico KYOWA, ligado à mesa de canais KYOWA.

O cálculo das tensões atuantes foram feitos segundo o equacionamento especificado pelo EUROCODE 5, apresentado no capítulo 4.

5.4. Ensaio de rigidez de ligações

A determinação da rigidez de nó de pórtico de estruturas compostas é um dos pontos principais desta pesquisa. Os dispositivos e geometrias desses ensaios foram adotadas em função de estudos realizados na bibliografia internacional, tais como: RODD (1999) e LEIJTEN et al. (1999), impressos no relatório final do COST C1 "Semi-rigid timber joints - structural behaviour, modelling and new technologies", BATCHELAR & HUNT (1991) e WOODARD & MILNER (1995) entre outros, já que não foi encontrada normalização referente à esses ensaios. Baseado nesses autores propõe-se como modelo preliminar de ensaio o arranjo esquemático apresentado na figura 33, adaptado de ensaios de rigidez de ligações com compósitos de madeira compensada e aço, apresentados por BATCHELAR & HUNT (1991) e RODD & POPE (1994). Segundo GEHRI (1999)³, essa é a melhor configuração de ensaio para a determinação da rigidez do nó, pois apresenta apenas um nó onde a rigidez é desconhecida (no modelo em pórtico existem dois).

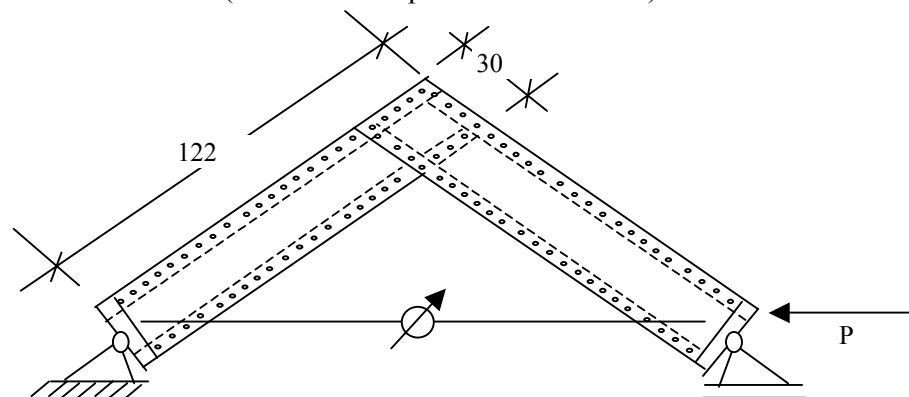


Figura 33 – Esquema do ensaio de rigidez de ligação proposto.

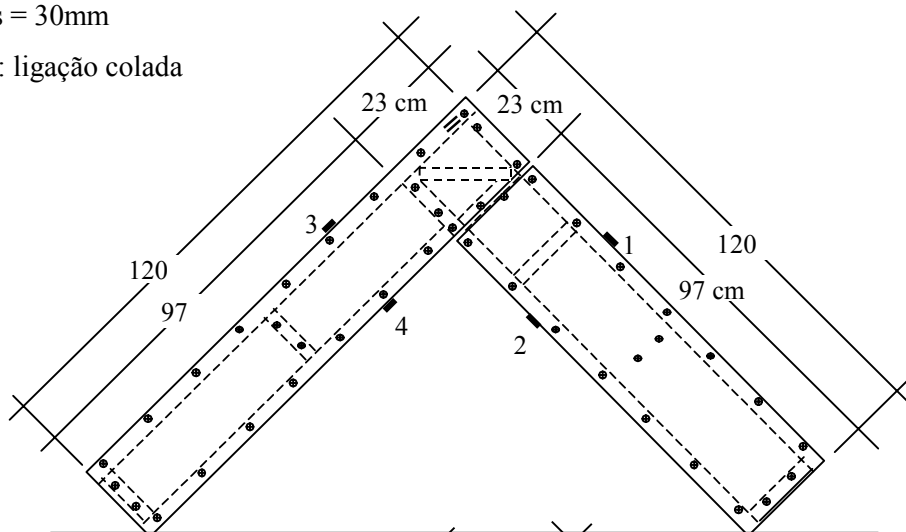
Os corpos-de-prova de ligações de nó de pórtico foram montados utilizando chapas de compensado com as mesmas características das anteriormente utilizadas nos ensaios de vigas compostas. Para as mesas foram utilizadas peças de madeira maciça tratadas da espécie

³ Comunicação pessoal

Pinus taeda. Os pregos utilizados para ligações alma-mesa de 3mm de diâmetro com 6cm de comprimento, foram fixados por pregador pneumático, sem pré-furação.

CPs 0,0: $s = 30\text{mm}$

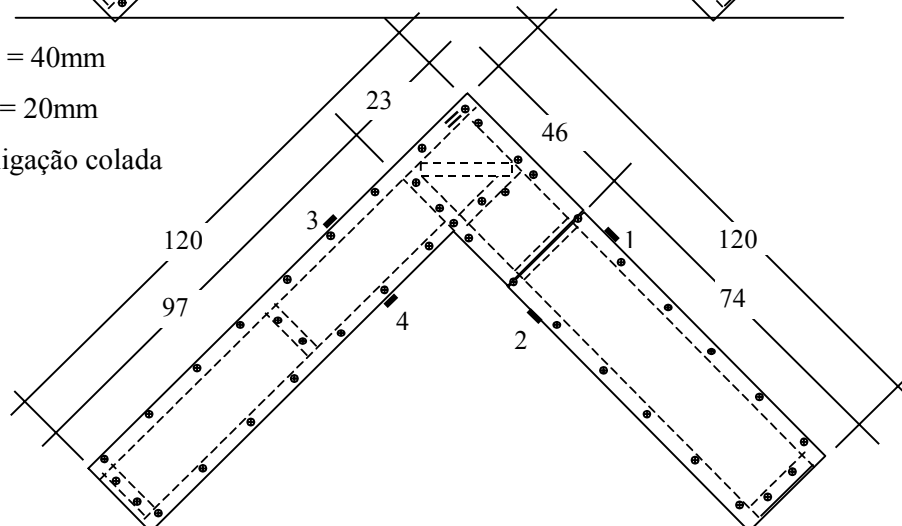
CPs 0,col: ligação colada



CPs -1,+1: $s = 40\text{mm}$

CPs -1,-1: $s = 20\text{mm}$

CPs -1,col: ligação colada



CPs +1,+1: $s = 40\text{mm}$

CPs +1,-1a: $s = 20\text{mm}$

CPs +1,-1b: $s = 20\text{mm}$

CPs +1,-1ex.: $s = 20\text{mm}$

CPs +1,col: ligação colada

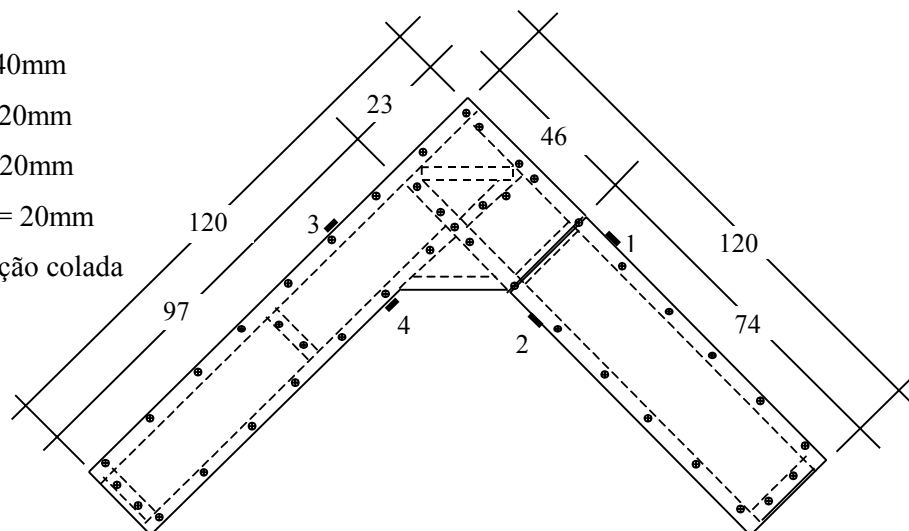


Figura 34 – Dimensões dos corpos-de-prova de nó de pórtico

As dimensões dos corpos-de-prova foram adotadas em função do planejamento estatístico apresentado no item 5.2, em função das dimensões comerciais das chapas de compensado e do esquema estático adotado a fim de aplicar momento suficiente na ligação que resultasse em dados confiáveis. As dimensões das ligações de nó de pórtico estão apresentadas na figura 34. A fotos da figura 35 apresentam a montagem dos corpos-de-prova.

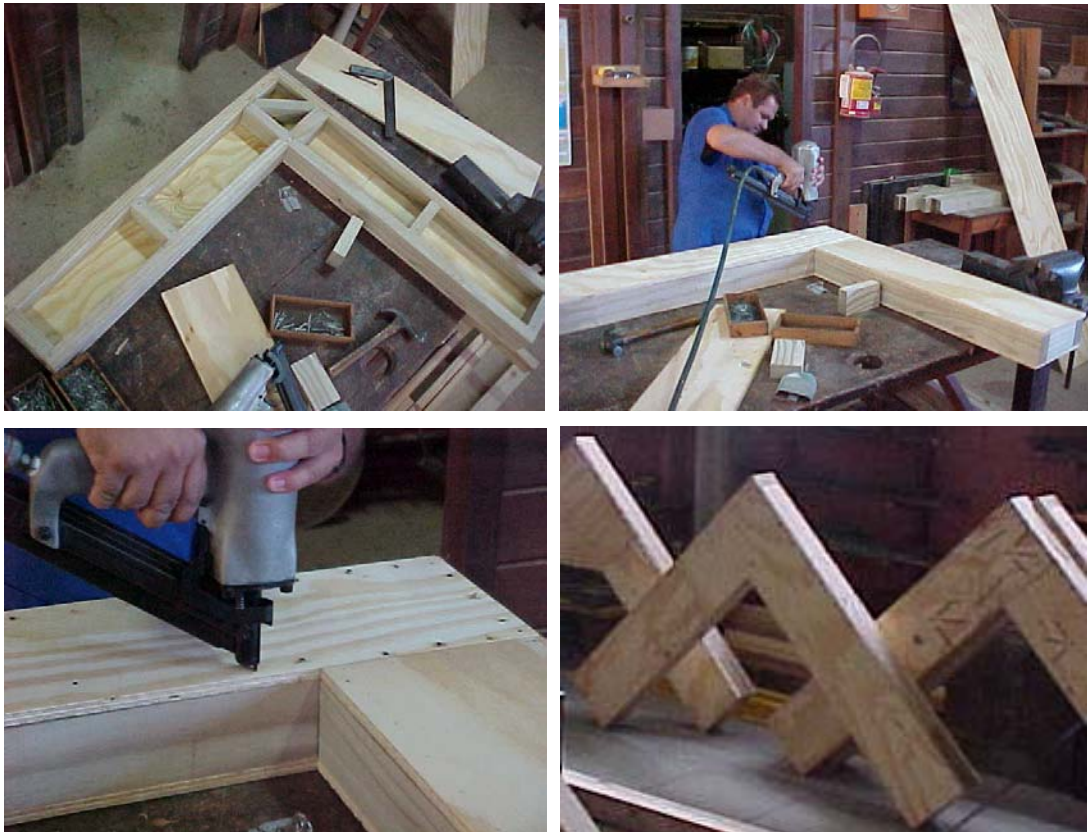


Figura 35 – Montagem dos corpos-de-prova de nó de pórtico.

Além desses corpos-de-prova, foi também montado um corpo-de-prova com meia mísula (m.mis,-1), com dimensões semelhantes aos corpos-de-prova “+1,-1”, porém com comprimento da mísula de 34,5cm ao invés de 46cm. Assim como os corpos-de-prova colados, esse corpo-de-prova não entrou no planejamento estatístico, porém foi importante para fazer comparações a respeito do efeito da mísula nas ligações de nó de pórtico.

Os corpos-de-prova “+1,-1a” e “+1,-1ex” são corpos-de-provas com defeitos de montagem, com interrupção da mesa inferior e falta de montantes respectivamente. Uma vez montados e constatados os defeitos, esses corpos-de-prova foram ensaiados a fim de observar a influência dessas falhas no comportamento do nó de pórtico.

5.4.1. Esquema estático dos ensaios:

Os ensaios de ligação em nó de pórtico foram montados segundo o esquema estático apresentado na figura 33. A configuração do ensaio consiste na aplicação de força por um cilindro hidráulico em uma das extremidades. Entre o cilindro hidráulico e o CP foi posicionado um anel dinamométrico para medir a força aplicada ao nó. A outra extremidade do CP foi fixada na laje de reação. Foram utilizadas barras metálicas circulares entre o CP e a laje de reação para permitir o movimento do CP sem gerar atrito. Foram utilizadas peças de contraventamento para evitar a perda de estabilidade do CP na vertical e uma guia metálica para direcionar a aplicação da força, evitando-se a perda de estabilidade do conjunto na horizontal

A montagem do ensaio na horizontal sobre a laje de reação do LaMEM mostrou-se muito eficiente e apresentou facilidades que não ocorreriam na montagem vertical. A figura 36 apresenta foto com o dispositivo montado.

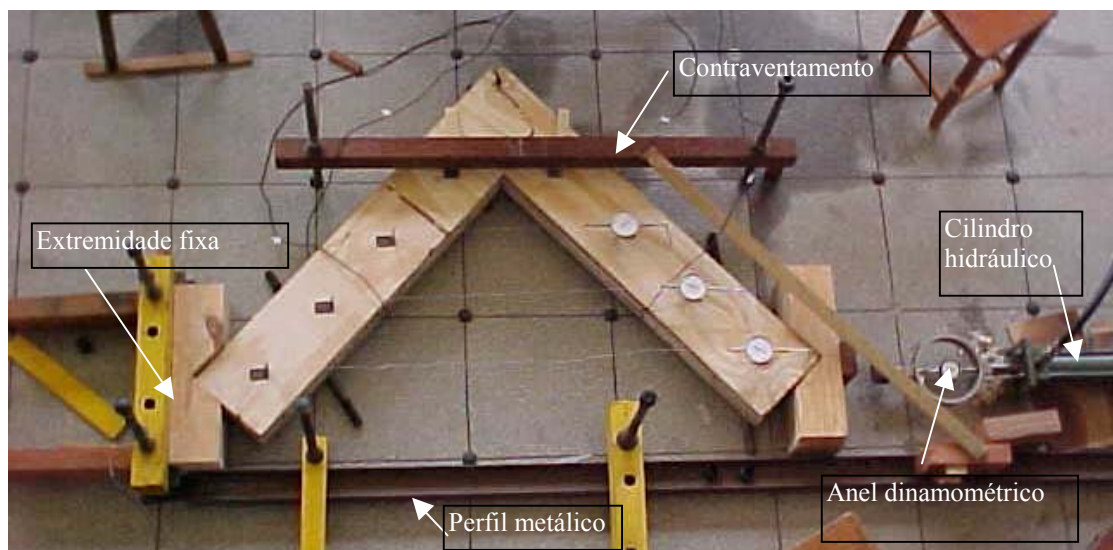


Figura 36 – Dispositivos de ensaios de nó de pórtico

5.4.2. Instrumentação dos CPs de nós de pórtico

Para instrumentação dos corpos-de-prova de nós de pórtico foram utilizados, em cada CP, quatro relógios comparadores igualmente espaçados a fim de medir os deslocamentos relativos entre as duas vigas que compõem o nó. Utilizou-se também quatro extensômetros elétricos para leituras de deformações com o objetivo de avaliar o momento atuante nas

vigas. Os extensômetros elétricos foram posicionados nas mesas das vigas, na face externa, partindo das extremidades do corpo de prova e espaçados a cada 25cm, conforme apresentado na figura 37.

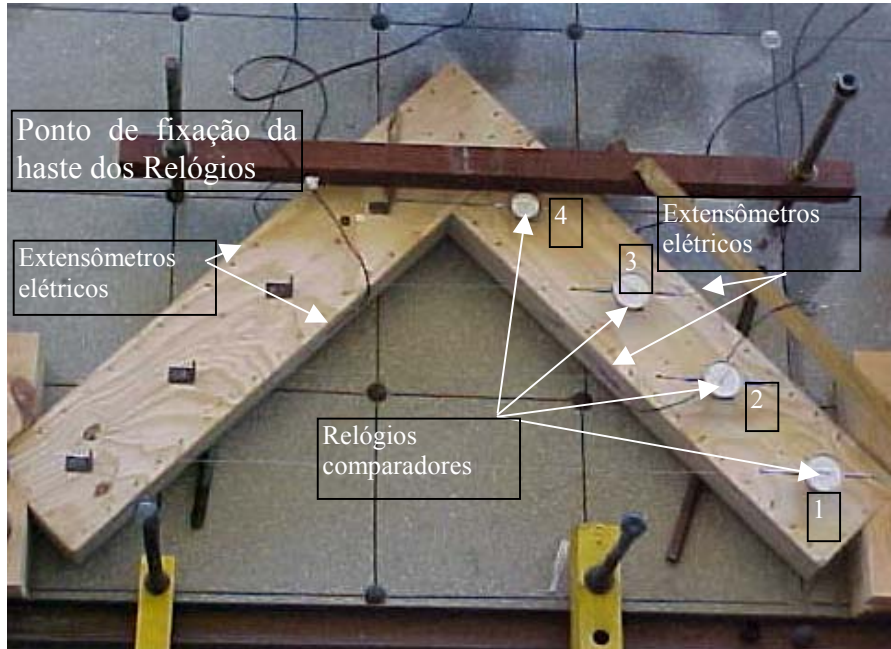


Figura 37 – Instrumentação dos CPs de nó de pórtico.

5.4.3. Cálculo da rigidez rotacional K_r

A rigidez rotacional do nó de pórtico obtida nos ensaios foi calculada utilizando as leituras dos relógios 3 ou 4, conforme explicado no item 6.5.1. A rigidez rotacional da ligação é definida como sendo a razão entre o momento aplicado na ligação e a rotação causada por esse momento na ligação.

$$K_r = \frac{M}{\theta}$$

onde M é o momento na ligação, calculado como sendo a força aplicada vezes a distância da aplicação da carga ao centro geométrico da ligação, e θ o ângulo de rotação relativa entre os dois elementos que compõem a ligação

6. Resultados e Discussões

6.1. Caracterização da madeira maciça

Para as mesas das seções compostas das vigas e dos nós de pórtico foram utilizadas peças de madeira *de Pinus taeda*, secas e tratadas com CCA. Essas peças fazem parte de um lote de madeiras doado pela Batistella para o LaMEM e estavam disponíveis para serem utilizadas nesses ensaios.

Para auxiliar no dimensionamento das vigas compostas a serem montadas e ensaiadas, uma das peças de madeira maciça (peça 3) foi ensaiada à compressão, tração e embutimento. Das outras peças utilizadas nas vigas foram realizados apenas ensaios de compressão para a obtenção do módulo de elasticidade e da resistência da peça a fim de se comparar os resultados dos ensaios com o que prevê a formulação teórica já apresentada. Os resultados desses ensaios estão apresentados a seguir.

6.1.1. Ensaios de tração paralela

Os ensaios de tração paralela na madeira maciça, em corpos-de-prova extraídos da peça 3, foram realizados de acordo com a NBR 7190:1997, Anexo B. Todos os ensaios de tração paralela na madeira maciça foram realizados na Máquina Universal DARTEC, de capacidade de 100kN, pertencente ao LaMEM. Os resultados dos ensaios de tração paralela na peça 3 de madeira maciça estão apresentados na tabela 5:

Tabela 5 – Resultado dos ensaios de tração

CP	F_{t0} [kN]	f_{t0} [N/mm ²]	E_{t0} [N/mm ²]
1	6,81	20,25	5801
2	8,87	27,84	3955
média	7,84	24,05	4878

6.1.2. Ensaio de embutimento

Os ensaios de embutimento realizados em corpos-de-prova extraídos da peça 3 seguiram o método de ensaio proposto no item 5.1.1. Os resultados obtidos estão apresentados nas tabelas 6 a 9.

Tabela 6 – Resistência ao embutimento paralelo

	NBR		PrEN 383	
	Frup (kN)	f_{e0} (N/mm ²)	Frup (kN)	f_{e0} (N/mm ²)
	1,09	18,08	1,53	25,49
	0,86	14,08	1,39	22,83
Média	0,97	16,08	1,46	24,16

Tabela 7 – Módulo de Rigidez no embutimento paralelo

NBR	prEN 383					
	w_i	$w_{i,mod}$	w_e	K_i (N/mm)	K_s (N/mm)	K_e (N/mm)
5471	0,20	0,17	0,11	2525	2920	4651
1915	0,31	0,33	0,22	1618	1498	2312
média	0,25	0,25	0,16	2072	2209	3482

Tabela 8 – Resistência ao embutimento normal

	NBR		prEN 383	
	Frup (kN)	f_{e0} (N/mm ²)	Frup (kN)	f_{e0} (N/mm ²)
	0,66	10,60	1,13	18,15
	0,65	11,06	1,15	19,53
	0,68	11,53	0,78	13,30
média	0,66	11,06	1,02	16,99

Tabela 9 – Módulo de Rigidez no embutimento normal

NBR	PrEN 383						
	K (N/mm)	w _i	w _{i,mod}	w _e	K _i (N/mm)	K _s (N/mm)	K _e (N/mm)
714	0,65	0,67	0,53	537	524	656	
922	0,47	0,40	0,41	753	872	848	
753	0,57	0,59	0,46	616	597	765	
média	796	0,56	0,55	0,47	635	665	756

6.1.3 Ensaio de compressão paralela:

Inicialmente foram ensaiados à compressão apenas corpos-de-prova da peça 3. Desses resultados de caracterização da peça 3 de madeira maciça, de onde foram extraídas algumas das mesas das vigas compostas, pode-se concluir que os valores dos módulos de elasticidade na tração e na compressão são bastante próximos, por isso foram realizados ensaios de compressão em corpos-de-prova de todas as peças utilizadas nas vigas, e os valores encontrados nos ensaios de compressão paralela foram utilizados posteriormente na análise dos ensaios de viga composta e dos nós de pórtico.

Os resultados dos ensaios de compressão paralela em corpos-de-prova extraídos das 8 peças de pinus utilizadas nas vigas compostas estão apresentados na tabela 10.

Esses resultados dos ensaios de compressão mostram que existe uma grande variabilidade entre as peças utilizadas como mesas da viga composta, o que torna necessário a correlação de cada mesa com a peça correspondente, ensaiando corpos-de-prova extraídos da mesa do nó. Esses ensaios foram realizados após os últimos ensaios de nó de pórtico, os quais foram desmontados e retiradas amostras das mesas na região dos extensômetros elétricos 1, 2, 3 e 4. Os valores dos módulos de elasticidade foram calculados a partir das leituras do extensômetros elétricos nos ensaios de compressão paralela. Nos corpos-de-prova onde não haviam extensômetros elétricos ou esses foram danificados durante a desmontagem dos nós de pórtico, os valores do módulo de elasticidade foram calculados a partir de leituras do transdutor de deslocamento da DARTEC com base de medida aproximada de 63mm. Os resultados desses ensaios estão apresentados na tabela 11.

Tabela 10 – Resultados dos ensaios de compressão paralela nas peças utilizadas nas mesas das vigas compostas

peça	AMOSTRA	f_{c0}	E_{c0}	Médias	
		N/mm ²	N/mm ²	f_{c0} N/mm ²	E_{c0} N/mm ²
1	A	32,94	10050	35,64	12157
	B	39,76	15880		
	C	34,24	10539		
2	A	31,71	8181	31,10	7356
	B	31,53	6418		
	C	30,05	7468		
3	A	24,18	5017	24,30	5352
	B	24,41	5687		
4	A	19,68	4490	22,72	4718
	B	26,76	4918		
	C	21,71	4747		
5	A	27,94	6262	29,23	6762
	B	28,17	6528		
	C	31,58	7496		
6	A	24,67	3655	24,80	3404
	B	26,27	3403		
	C	23,45	3153		
7	A	47,03	13417	36,73	8905
	B	32,53	7066		
	C	30,64	6233		
8	A	25,13	7966	30,29	7527
	B	32,85	7658		
	C	32,90	6958		
médias				29,75	7015

Tabela 11 – Resultados dos ensaios de compressão paralela nas peças utilizadas nos nós de pórtico

	$E_{c,0}$ (N/mm ²)	$E_{c,0}$ (N/mm ²)	$E_{c,0}$ (N/mm ²)	$E_{c,0}$ (N/mm ²)
nó	1	2	3	4
0,0a	7872	4957	13143	6848
0,0b	12509	6551	12928	9114
0,0c	10988	4332	5356	4884
0,0d	4150	7323	9318	11328
0,0e	12420	4396	5566	3854
0,0f	7814	7684	13027	4834
-1,-1a	6247	7421	15860	7918
+1,-1b	16356	4736	14100	6572
-1,+1a	12031	6160	6083	5812
+1,+1a	7587	5649	9476	15203
+1,-1a	6662	7734	8597	8263
+1,-1 ex	6457	11258	10625	8089
m.mis,-1	11009	10333	8923	5655
0,col	11780	6365	4894	5497
-1,col	11663	8048	11879	4630
+1,col	5057	5949	9801	6494

6.2. Caracterização do compensado

6.2.1. Ensaio de compressão nas chapas de compensado

A seguir são apresentados os resultados de ensaios de compressão realizados em chapas de compensado. As amostras referem-se a chapas de compensado naval de 12mm, compostos por 5 lâminas de pinus. Os ensaios foram realizados segundo o método de ensaio apresentado no item 5.1.2.1.

6.2.1.1. Compressão paralela:

Os ensaios denominados por ensaios de compressão paralela são aqueles onde a direção do esforço de compressão é paralelo à direção das fibras das lâminas de face do compensado. Os resultados desses ensaios estão apresentados nas tabelas 12 e 13.

Tabela 12 – Resistência à compressão paralela: f_{c0} [N/ mm²]

Amostra	1	2	3	4
	19,75	28,16	24,97	22,68
	22,15	29,44	23,35	27,23
	21,74	22,85	23,68	23,20
Média	21,22	26,82	24	24,37

Média de f_{c0} : 24,10 N/mm²Desvio Padrão: 3,00 N/mm².Tabela 13 – Módulo de Elasticidade na compressão paralela: E_{c0} [N/ mm²]

Amostra	1	2	3	4
	5146	9078	7316	4118
	5882	7314	5910	6024
	5645	5754	7461	4719
média	5558	7382	6896	4953

Média de E_{c0} : 6197 N/ mm²Desvio padrão: 1373 N/ mm²

6.2.1.2. Compressão Normal:

Os ensaios denominados por ensaios de compressão normal são aqueles onde a direção do esforço de compressão é normal à direção das fibras das lâminas de face do compensado. Os resultados desses ensaios estão apresentados nas tabelas 14 e 15.

Tabela 14 – Resistência à compressão normal: f_{c90} [N/ mm²]

Amostra	1	2	3	4
	23,74	22,80	21,40	22,83
	18,98	21,84	19,69	23,91
	17,79	24,23	16,57	20,70
Média	20,17	22,96	19,22	22,48

Média de f_{c90} : 21,21 N/ mm²Desvio Padrão: 3,00 N/ mm²

Tabela 15 – Módulo de Elasticidade na compressão normal: E_{c90} [N/mm²]

amostra	1	2	3	4
	5582	6066	5035	6547
	4354	6076	4639	6426
	5193	6038	4040	4281
média	5043	6060	4571	5751

Média de E_{c90} : 5356 N/mm²Desvio Padrão: 886 N/mm²

6.2.1.3. Determinação dos coeficientes de Poisson.

Para a determinação do coeficiente de Poisson do compensado foram ensaiados dois corpos-de-prova de compressão instrumentados com extensômetros elétricos nas direções paralela e normal, como mostrado na figura 38. Foi montado um corpo-de-prova com direção das fibras das lâminas externas paralela ao carregamento e o outro com as fibras das lâminas externas normais ao carregamento. Assim foi possível determinar o Poisson para as duas direções: ν_{12} e ν_{21} , como apresentado na tabela 16.

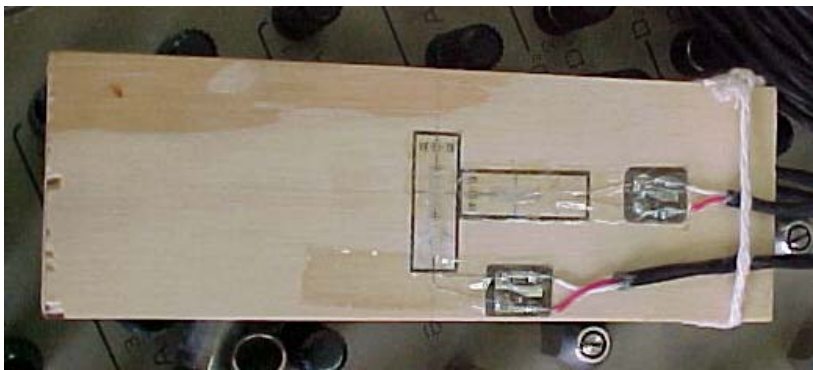


Figura 38 – Corpo-de-prova para a determinação do Poisson na compressão.

Tabela 16 – Resultados dos ensaios para a determinação do Coeficiente de Poisson

Direção das fibras lâmina externa	Tensão [N/mm ²]	ϵ_{11}	ϵ_{12}	ν_{12} [N/mm ²]
Paralela ao carregamento	9,39	0,0008	0,000085	0,106
		ϵ_{22}	ϵ_{21}	ν_{21}
Normal ao carregamento	10,35	0,000865	0,00006	0,069

6.2.1.4. Observações:

Observa-se dos resultados os ensaios de compressão que a variabilidade dos resultados de resistência é baixa para as chapas de pinus. Nos módulos de elasticidade na direção normal essa variabilidade ainda é pequena, apresentando apenas um aumento no módulo de elasticidade na direção paralela. Relacionando as propriedades nas duas direções observa-se um bom balanceamento das propriedades nessas duas direções, apresentando uma leve tendência de serem maiores na direção paralela às fibras.

Os valores obtidos para os módulos de elasticidade nos ensaios para a determinação do coeficiente de Poisson se apresentam coerentes com valores próximos dos obtidos nos outros ensaios.

6.2.2. Tração nas chapas de compensado

A seguir estão apresentados os resultados dos ensaios de tração realizados em chapas de compensado. As amostras 1, 2, 3 e 4 referem-se a chapas de compensado naval de 12mm compostos por 5 lâminas de pinus. Todos os ensaios foram realizados segundo o método de ensaio proposto no item 5.1.2.2.

6.2.2.1 Tração paralela:

Os ensaios denominados por ensaios de tração paralela são aqueles onde a direção do esforço de tração é paralelo à direção das fibras das lâminas de face do compensado. Os resultados dos ensaios de tração paralela estão apresentados nas tabelas 17 e 18.

Tabela 17 – Resistência à tração paralela: f_{t0} [N/ mm²]

Amostra	1	2	3	4
	26,7	20,5	29,4	15,7
	29,9	21,7	25,6	15,2
	17,3	24,2	16,6	14,2
Média	24,6	22,1	23,9	15,0

Média de f_{t0} : 21,41 N/mm²

Desvio Padrão: 5,67 N/mm².

Tabela 18 – Módulo de Elasticidade na tração paralela: E_{t0} [N/ mm²]

Amostra	1	2	3	4
	6137	6386	8538	3295
	6275	7655	6241	4021
	4622	5190	4415	5551
Média	5678	6410	6398	4289

Média de E_{t0} : 5694 N/ mm²Desvio padrão: 1503 N/ mm²

Além da caracterização do lote de chapas de compensado, foram extraídos corpos-de-prova de tração paralela das chapas das quais foram cortadas as almas. Os ensaios de tração forneceram valores de resistência e rigidez das chapas utilizadas que podem ser utilizados na análise dos resultados. A tabela 19 apresenta os resultados dos ensaios de tração paralela nos corpos-de-prova extraídos das chapas utilizadas na montagem das vigas compostas.

Tabela 19 – Resultado dos ensaios de tração paralela:

alma	f_{t0} [N/mm ²]	E_{t0} [N/ mm ²]	médias	
			f_{t0} [N/ mm ²]	E_{t0} [N/ mm ²]
CH1 A	21,2	3965	23,1	4570
CH1 B	31,0	5816		
CH1 C	17,0	3929		
CH2 A	27,9	4569	22,8	4231
CH2 B	24,5	4600		
CH2 C	16,0	3523		
CH3 A	24,0	7579	22,0	6207
CH3 B	13,6	3031		
CH3 C	19,9	4835		
CH4 A	9,1	2260	12,8	3036
CH4 B	9,1	3215		
CH4 C	20,2	3633		
CH5 A	17,7	2500	16,0	2554
CH5 B	12,5	2462		
CH5 C	14,4	2608		
média			19,34	4120

6.2.2.2. Tração Normal

Os ensaios denominados por ensaios de tração normal são aqueles onde a direção do esforço de tração é normal à direção das fibras das lâminas da face do compensado. Os resultados dos ensaios de tração normal estão apresentados nas tabelas 20 e 21.

Tabela 20 - Resistência à tração normal: f_{t90} [N/mm²]

Amostra	1	2	3	4
	12,8	23,3	17,6	23,5
	13,5	18,3	19,3	38,4
	13,2	23,8	16,8	29,4
Média	13,2	21,8	17,9	30,4

Média de f_{t90} : 20,83 N/mm²

Desvio Padrão: 7,48 N/mm².

Tabela 21 - Módulo de Elasticidade na tração normal: E_{t90} [N/ mm²]

Amostra	1	2	3	4
	4423	4888	4188	6242
	5694	5455	4910	6652
	4016	5250	4159	7001
Média	4711	5198	4419	6632

Média de E_{t90} : 5240 N/ mm²

Desvio padrão: 1001 N/ mm²

6.2.2.3. Determinação dos coeficientes de Poisson.

Para a determinação dos coeficientes de Poisson do compensado foram ensaiados dois corpos-de-prova de tração instrumentados com extensômetros elétricos nas direções paralela e normal, como mostra a foto da figura 39. Esses corpos-de-prova foram montados sendo um com direção das fibras das lâminas externas paralela ao carregamento e o outro com as fibras das lâminas externas normais ao carregamento. Assim foi possível determinar o Poisson para as duas direções: ν_{12} e ν_{21} , como apresentado na tabela 22.

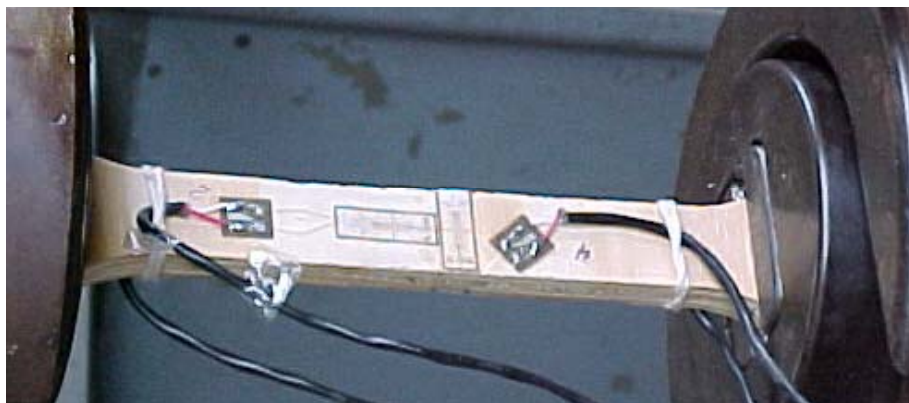


Figura 39 – Corpo-de-prova para a determinação do Poisson na tração.

Tabela 22 – Resultados dos ensaios para a determinação do Coeficiente de Poisson (N/mm^2)

Dir fibras lâmina externa	E_{11}	E_{12}	ν_{12}
Paralela ao carregamento	395	2817	0,140
	E_{22}	E_{21}	ν_{21}
Normal ao carregamento	340	4778	0,071

6.2.2.4. Observações:

Os módulos de elasticidade obtidos na direção normal foram extraídos das leituras do deslocamento do atuador da máquina Dartec. Nesses ensaios de tração normal foi utilizado o clip gauge para as leituras de deformações no centro do CP, mas os resultados mostraram uma variabilidade extremamente grande o que fez descartar os valores dos módulos obtidos pelo clip gauge (comprimento de medida de 20 mm) e utilizar os valores obtidos a partir do stroke. Para os ensaios de tração paralela foi utilizado o clip lvdt (comprimento de medida de 50 mm), que apresentou resultados mais coerentes, tendo sido utilizados também nos ensaios de caracterização das chapas utilizadas na montagem das vigas compostas.

Observa-se dos resultados os ensaios de tração que a variabilidade dos resultados é significativa para as chapas de pinus, sendo que essa variabilidade se apresenta dentro dos resultados de uma mesma chapa. Tal variabilidade é atribuída à relação existente entre as dimensões dos Corpos-de-prova e a as dimensões dos anéis de crescimento do pinus. Por ser uma área pequena do corpo-de-prova carregada nos ensaios de tração ($\sim 3,0cm^2$), a ocorrência de lenho tardio pode aumentar consideravelmente a resistência do corpo-de-prova.

6.2.3. Cisalhamento nas chapas de compensado

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios de cisalhamento realizados em chapas de compensado. As amostras 1, 2, 3 e 4 referem-se a chapas de compensado naval de 12mm compostos por 5 lâminas de pinus. De cada amostra foi retirado e ensaiado um corpo-de-prova de cisalhamento. Todos os ensaios foram realizados na máquina Universal Instron, no Departamento de Engenharia de Estruturas (SET), segundo a metodologia proposta no item 5.1.2.3. As fotos da figura 40 apresentam o dispositivo de ensaio de cisalhamento com o corpo-de-prova posicionado na Máquina Instron.

As fotos da figura 41 apresentam os modos de ruptura por cisalhamento observados em todos os ensaios realizados, o que comprova a eficiência do dispositivo na execução dos ensaios.

Os resultados dos ensaios de cisalhamento em chapas de compensado são apresentados nas tabelas 23 e 24.



Figura 40 – Corpo-de-prova posicionado para ensaio de cisalhamento



Figura 41 – Modo de ruptura característico observado no ensaio

Tabela 23– Valores obtidos em ensaio para cálculo da resistência ao cisalhamento das chapas de compensado.

cp	espessura (mm)	aresta (mm)	Pruptura (kN)	fv (N/mm ²)	fv (daN/cm ²)
1	11,96	566	62,2	6,50	64,96
2	11,97	577	69,19	7,08	70,83
3	11,89	575	69,53	7,19	71,90
4	11,98	575	72,59	7,45	74,50

$$f_{v,m\acute{e}dio} = 7,1 \text{ N/mm}^2$$

Tabela 24 – Valores obtidos em ensaio para cálculo do módulo de cisalhamento das chapas de compensado

CP	carga. (kN)		deform. (mm)		G N/m ²	G N/mm ²
	10%	50%	10%	50%		
1	10,3	29,987	0,084	0,294	1085049227	1085
2	10,224	30,063	0,093	0,323	1001534109	1002
3	10,224	30,216	0,106	0,404	777902685	778
4	10,224	30,216	0,049	0,308	894612108	895

$$G_{m\acute{e}dio} = 940 \text{ daN/cm}^2 \text{ (para as chapas de pinus)}$$

Observa-se que a variabilidade dos resultados de cisalhamento apresentou-se pequena. Tal fato pode ser atribuído à grande dimensão dos corpos-de-prova, o que diminui o efeito da grande diferença entre as propriedades dos lenhos inicial e tardio no compensado de pinus.

Com relação aos procedimentos de ensaios utilizados, esses de mostraram bastante adequados e de fácil execução, não sendo um ensaio muito demorado, considerando que tomou aproximadamente 30 minutos entre posicionar o corpo-de-prova, ensaiar até a ruptura e retirar o corpo-de-prova. Quanto ao dispositivo montado especialmente para esses ensaios, pode-se dizer que é bastante eficiente, sendo facilmente manuseado por duas pessoas para posicionamento do corpo-de-prova na máquina de ensaio.

Quanto às dimensões dos corpos-de-prova, como já mencionado, levam a resultados com pequena variabilidade por diminuir o efeito localizado dos anéis de crescimento. Como desvantagem da grande dimensão está o fato de que seria inviável retirar corpos-de-prova de cisalhamento de todas as chapas de onde foram cortadas as almas das mesas, sendo necessário, para a análise dos resultados das vigas a utilização de um valor de G aproximado em função das outras propriedades das chapas, ou o valor médio obtido do lote.

6.2.4. Embutimento nas chapas de compensado

A seguir são apresentados os resultados de ensaios de embutimento realizados em chapas de compensado. As amostras 1, 2, 3 e 4 referem-se a chapas de compensado naval de 12mm compostos por 5 lâminas de pinus. Os ensaios foram realizados segundo os procedimentos descritos no item 5.1.2.4.

6.2.4.1. Embutimento paralelo às fibras.

Entende-se por embutimento paralelo às fibras o embutimento onde a carga aplicada pelo pino metálico tem direção paralela à direção das fibras das lâminas de face do compensado. Os valores obtidos nos ensaios de embutimento paralelo às fibras do compensado estão apresentados nas tabelas 25 e 26.

Tabela 25 – Resistência ao embutimento paralelo: f_{e0} [N/mm²]

	NBR		PrEN 383	
	Frup (kN)	f_{e0} (N/mm ²)	Frup (kN)	f_{e0} (N/mm ²)
amostra1	1,55	23,41	3,70	55,80
	1,96	29,64	2,50	37,77
	1,14	17,24	1,21	18,33
amostra2	1,91	28,94	2,74	41,50
	2,11	31,88	2,80	42,41
	2,08	31,17	3,37	50,57
amostra3	1,33	20,32	2,10	32,16
	1,21	18,47	2,37	36,33
	1,27	19,45	1,99	30,45
amostra4	1,42	21,52	2,08	31,58
	1,96	29,65	3,35	50,78
	1,80	27,22	2,99	45,17
média	1,64	24,91	2,60	39,40
desvioP	0,36	5,39	0,70	10,53

Tabela 26 – Módulo de deslizamento no embutimento paralelo.

	NBR	PrEN 383					
	K (N/mm)	w_i	$w_{i,mod}$	w_e	K_i (N/mm)	K_s (N/mm)	K_e (N/mm)
Amostra1	7682	0,15	0,14	0,11	5369	5565	7442
	2080	0,42	0,45	0,39	1891	1768	2035
	1936	0,64	0,47	0,41	1242	1711	1948
amostra2	8824	0,45	0,48	0,16	3333	3150	9412
	9091	0,32	0,30	0,17	4732	5063	8922
	7707	0,36	0,33	0,20	4178	4615	7595
amostra3	7348	0,18	0,16	0,12	4469	5079	6957
	3340	0,42	0,42	0,26	1891	1910	3130
	2100	0,65	0,71	0,39	1233	1133	2055
amostra4	2901	0,60	0,57	0,35	1681	1762	2873
	4456	0,34	0,31	0,22	2915	3226	4469
	2713	0,52	0,50	0,38	1942	1995	2636
média	5015	0,42	0,40	0,26	2906	3082	4956
desvioP	2867	0,16	0,16	0,12	1468	1600	2892

6.2.4.2. Embutimento Normal:

Entende-se por embutimento normal às fibras o embutimento onde a carga aplicada pelo pino metálico tem direção perpendicular à direção das fibras das lâminas de face do compensado. Os valores obtidos nos ensaios de embutimento normal às fibras do compensado estão apresentados nas tabelas 27 e 28.

Tabela 27 – Resistência ao embutimento normal às fibras: f_{e0} [N/mm²]

	NBR		PrEN 383	
	Frup (kN)	f_{e0} (N/mm ²)	Frup (kN)	f_{e0} (N/mm ²)
amostra1	2,20	32,56	4,61	68,19
	1,62	23,85	3,13	46,22
	2,05	30,66	2,91	43,56
amostra2	2,08	31,15	3,83	57,33
	2,09	31,38	2,91	43,71
	2,99	44,60	4,00	59,72
amostra3	1,96	29,31	2,49	37,24
	2,35	34,84	3,21	47,56
amostra4	1,84	27,13	2,84	41,83
	2,28	33,84	4,43	65,64
	1,86	27,49	3,29	48,71
média	2,12	31,53	3,42	50,88
desvioP	0,36	5,37	0,69	10,24

Tabela 28 – Módulo de deslizamento no embutimento normal

	NBR	PrEN - 383					
	K (N/mm)	w _i	w _{i,mod}	w _e	K _i (N/mm)	K _s (N/mm)	K _e (N/mm)
amostra1	11476	0,19	0,19	0,11	6021	6174	10698
	4918	0,45	0,47	0,23	2578	2460	4933
	4400	0,41	0,36	0,29	2819	3217	3932
amostra2	6186	0,37	0,31	0,16	3415	4098	7874
	7250	0,31	0,27	0,18	4098	4608	6803
	5659	0,39	0,30	0,23	3181	4167	5405
amostra3	7214	0,50	0,47	0,25	3024	3209	6045
	9515	0,34	0,21	0,18	4412	7273	8276
amostra4	6362	0,42	0,39	0,22	3333	3625	6328
	11560	0,26	0,19	0,13	5405	7568	10874
	10321	0,28	0,24	0,14	4965	5773	9739
média	7715	0,36	0,31	0,19	3932	4743	7355
desvioP	2581	0,09	0,10	0,06	1138	1715	2341

6.2.4.3. Observações

Dos resultados dos ensaios de embutimento observa-se que em relação à resistência ao embutimento a variabilidade é pequena, porém visível, mesmo entre os resultados de uma mesma amostra. Em relação ao módulo de deslizamento, porém essa variabilidade é muito grande, mesmo entre resultados da mesma amostra. Essa observação é de grande interesse, pois o valor da rigidez K é um parâmetro relevante no estudo das vigas compostas. Observa-se também pelas tabelas 20 e 22 que essa variabilidade se apresenta também para os valores de K calculados de acordo com o prEN 383.

Essa grande variabilidade dos valores de embutimento também pode ser atribuída às particularidades da madeira de pinus, que apresenta grande diferença entre as propriedades de resistência e rigidez entre os lenhos inicial e tardio. Essas diferenças se destacam nos ensaios de embutimento devido à pequena área carregada no corpo-de-prova.

Para a análise das vigas, porém, é razoável utilizar o valor médio dos módulos de rigidez K, pois existirá sempre um grande número de pinos ligando alma e mesa, o que ameniza os vários valores de rigidez que podem ocorrer na análise global da viga.

6.3. Ensaio de ligações pregadas

A seguir estão apresentados os resultados dos ensaios de ligações pregadas, realizados segundo proposto no item 5.1.4. Os resultados da rigidez das ligações relativas às vigas compostas utilizando pregos de 5,4mm de diâmetro estão apresentados nas tabelas 29 a 31. Os resultados da rigidez e da resistência das ligações relativas à viga V3mm e aos nós de pórtico, utilizando pregos de 3,0mm, estão apresentados na tabela 32.

Tabela 29 – Rigidez das ligações referentes às vigas de seção I (Vigas 1 e 2)

s = 15 cm			s = 5 cm		
CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3
8,53	4,88	12,68	5,32	3,20	8,24
	média	8,69		média	5,59

Valore em kN/mm por prego

Tabela 30 – Rigidez das ligações referentes às vigas de seção caixa, com alma de 8,5x4cm (Vigas 3 e 4)

s = 15 cm			s = 5 cm		
CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3
3,83	3,82	5,07	2,42	2,36	2,85
	média	4,24		média	2,54

Valore em kN/mm por prego

Tabela 31 – Rigidez das ligações referentes às vigas de seção caixa, com alma de 11,3x4cm (Vigas de 5 a 10)

s = 10 cm		
CP1	CP2	CP3
5,76	5,84	6,86
	média	6,15

Valore em kN/mm por prego

Tabela 32 – Rigidez e resistência de ligações com pregos de 3,0mm (V3mm e nós de pórtico)

CP	1	2	3	4	5	6	7	Médias
K_{lig} (N/mm)	1530	1110	2169	1254	1320	1739	1899	1574
$F_{máx}$ (N)	598	528	640	555	580	678	563	591

É importante observar que os valores apresentados são referentes à rigidez total da ligação dividido pelo número de pregos da ligação. Esse cálculo é feito segundo as recomendações do EUROCODE 5, que especifica para a consideração do espaçamento que: “Quando a mesa for composta de duas partes ligadas à alma, ou quando a alma for composta de duas partes (como na viga caixão), o espaçamento s_i é determinado pela soma dos conectores por unidade de comprimento nos dois planos de ligação.”

Dos resultados dos ensaios observa-se que a rigidez por prego das ligações apresenta valores aproximadamente o dobro das ligações caixão, o que indica que a consideração por seção de corte seria mais indicada. Uma melhor avaliação dessa observação deverá ser efetuada na análise da rigidez das vigas, onde se verificará qual a melhor consideração a ser feita.

Comparando-se esses resultados dos ensaios para ligações equivalentes às vigas I com os resultados de embutimento no compensado apresentados no item 6.2.4, observa-se que os valores estão coerentes com os módulos de rigidez K encontrados em ensaios de embutimento. Lembrando que essas ligações correspondentes às vigas I têm grande semelhança com o ensaio de embutimento no que se refere à distribuição das cargas. Já nas ligações referentes às seções caixão os valores são inferiores por terem comportamento de pinos submetidos a apenas uma seção de corte.

6.4. Ensaio de vigas compostas

A seguir estão apresentados os resultados dos ensaios de flexão em vigas compostas pregadas com alma em compensado. O objetivo desses ensaios foi o estudo do comportamento das vigas compostas, com atenção especial às ligações pregadas alma/mesa. Foram analisados também os dados referentes à distribuição das tensões nas peças que compõem as mesas, a fim de se verificar a precisão das formulações para dimensionamento de vigas compostas apresentado pelo EUROCODE 5.

6.4.1. Resultados de carga×deslocamento

Nos ensaios de flexão as vigas foram carregadas até a atingirem deformação não superior a $\frac{1}{600}$, com a intenção de não provocar plastificação por embutimento das ligações. Todas as vigas foram ensaiadas pelo menos duas vezes no mesmo nível de carregamento, pois foi observada uma deformação residual grande após o primeiro ensaio, provavelmente devido à acomodação dos pregos, visto que os níveis de carga aplicados estavam dentro do limite elástico da viga. Durante cada ensaio foram medidos 10 pontos de carga×deslocamento, desses dez pontos foram tomados para as análises dos resultados os pontos referentes a 100% e 10% desses carregamentos. Os valores obtidos estão apresentados na tabela 33.

Tabela 33 – Valores das flechas obtidas nos ensaios de vigas compostas, em mm.

viga	1º carregamento	2º carregamento
1a	2,09	1,94
1b	1,73	1,56
2a	2,86	2,99
2b	2,73	2,53
3a	1,52	1,32
3b	1,15	1,00
4a	2,32	2,34
4b	1,82	1,54
5	3,49	2,84
6	3,22	2,91
7	3,12	2,72
8	3,9	3,70
9	3,27	2,76
10	3,27	3,55

Observou-se durante os ensaios que a flecha residual após o primeiro carregamento/descarregamento é aproximadamente o valor da diferença entre as leituras nos dois carregamentos, o que indica que esse resíduo é referente às acomodações nas ligações. Nas vigas onde o carregamento foi repetido mais de duas vezes, a flecha residual após o segundo carregamento é próxima de zero.

Como já mencionado anteriormente, o objetivo desses ensaios é avaliar o comportamento das vigas compostas, com atenção especial para a rigidez das ligações alma-mesa, avaliando as influências de cada uma das variáveis adotadas no comportamento da viga. A análise dos resultados foi feita comparando-se os resultados dos ensaios com valores teóricos segundo as formulações do Eurocode 5, conforme apresentado no item 5.3.1. O cálculo da flecha pela formulação EC 5 utiliza os parâmetros de rigidez dos materiais obtidos nos ensaios de caracterização das peças utilizadas na montagem das vigas, apresentados nas tabelas 10 e 19.

Além das propriedades de rigidez dos materiais, é importante se utilizar corretamente o valor da rigidez da ligação. A fim de se verificar qual desses valores levam a resultados mais precisos no caso de vigas compostas, foram utilizados nas análises diferentes valores de rigidez da ligação (K). Os valores de rigidez analisados foram:

K_i – Módulo inicial de rigidez ao embutimento de acordo com prEN 383 (tabelas 27 e 29), para ser utilizado na análise do primeiro carregamento;

K_e – Módulo elástico de rigidez ao embutimento de acordo com o prEN383 (tabelas 27 e 29), para ser utilizado na análise do segundo carregamento;

K – Módulo de deslizamento no embutimento segundo o anexo B da NBR 7190:1997 (tabelas 27 e 29);

K_{lig} – Módulo de deslizamento obtido nos ensaios de ligação pregada madeira maciça-compensado segundo as características de cada viga (tabelas 29, 30 e 31).

Os valores das flechas calculados pela formulação do EC5 considerando os vários valores de K estão apresentados na tabela 34 e nos gráficos das figuras 42 e 43.

Tabela 34 – Flechas teóricas para a segunda condição. Valores em mm.

viga	Ki	Ke	K	Klig
1a	2,51	1,94	1,91	1,73
1b	1,66	1,42	1,41	1,46
2a	3,04	2,56	2,53	2,38
2b	2,32	2,12	2,11	2,16
3a	2,40	2,03	2,01	2,27
3b	1,84	1,68	1,67	1,99
4a	2,02	1,69	1,67	1,90
4b	1,50	1,34	1,33	1,64
5	3,06	2,48	2,45	2,56
6	3,03	2,66	2,64	2,71
7	2,76	2,34	2,32	2,40
8	4,67	4,14	4,11	4,21
9	3,58	2,92	2,88	3,01
10	3,95	3,27	3,23	3,37

flechas para o 1o. carregamento

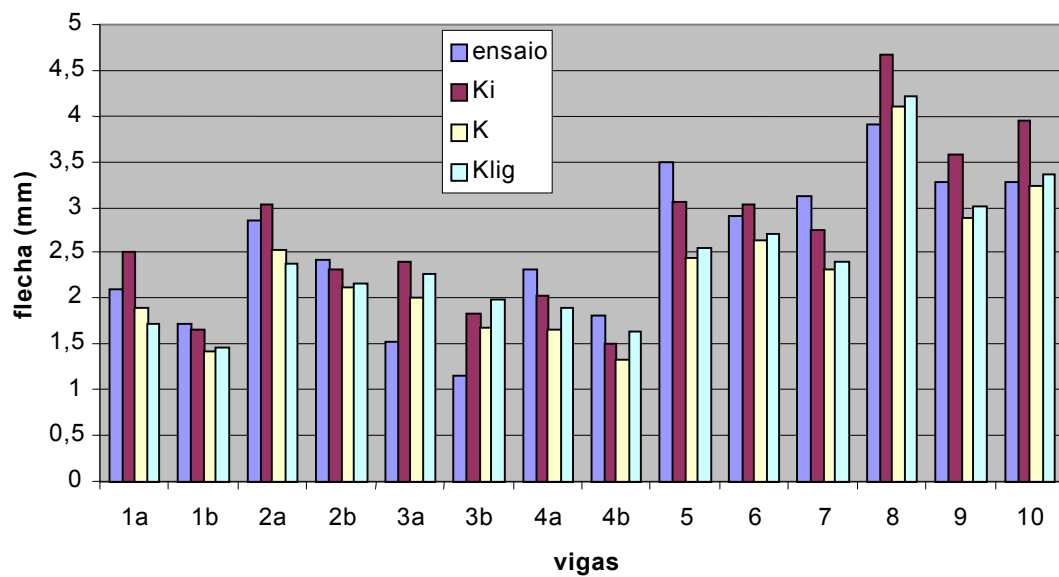


Figura 42 – Gráficos comparando os valores dos primeiros carregamentos nos ensaios e os valores obtidos segundo formulações do EC5.

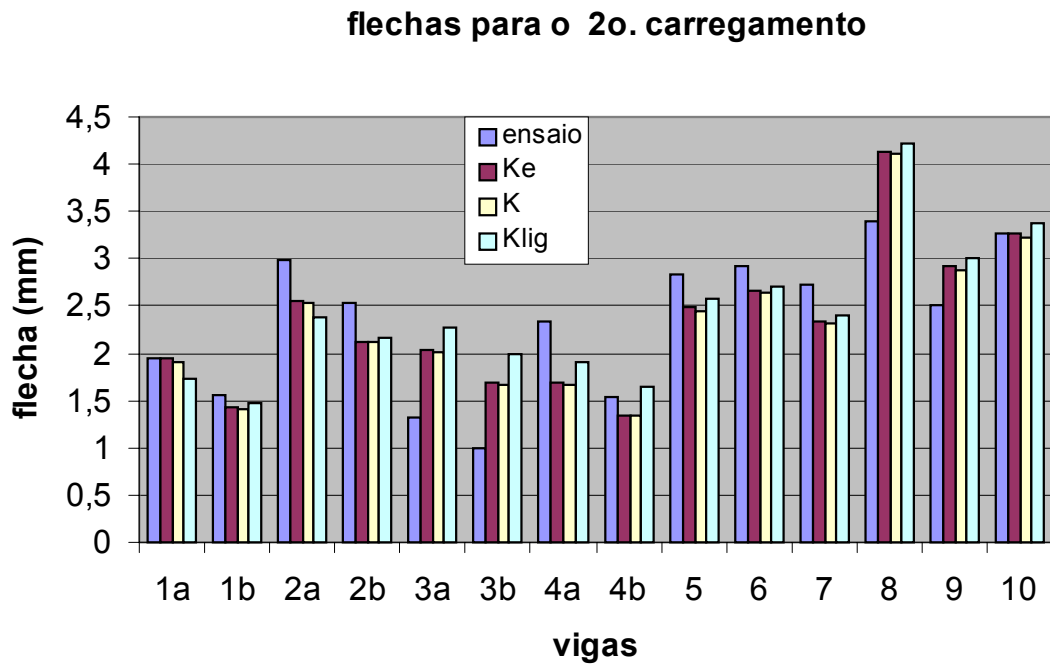


Figura 43 – Gráficos comparando os valores do segundo carregamento nos ensaios e os valores obtidos segundo formulações do EC5.

A análise visual dos gráficos das figuras 42 e 43 mostra que para algumas vigas determinados valores dessa rigidez levam a valores mais próximos dos ensaios, mas em outras vigas apresentam visível diferença entre o teórico e o experimental. Nos gráficos das figuras 42 e 43 observa-se novamente que os valores de rigidez da ligação K_i resulta em valores das flechas maiores do que os obtidos nos ensaios para as vigas 1, 2, 3 e 10, mas nas outras vigas essa tendência se inverte.

Para a análise mais detalhada dos resultados foi feita a análise estatística dos resultados, considerando como resposta dos ensaios a variação proporcional apresentada entre as flechas dos ensaios e as flechas teóricas. Esses valores foram calculados como:

$$\text{variação proporcional} = \left| \frac{\text{flecha teórica} - \text{flecha ensaio}}{\text{flecha ensaio}} \right|$$

Os resultados estão apresentados nas tabelas 35 a 39.

Tabela 35 – Variação proporcional entre as flechas dos ensaios e as flechas teóricas.

viga	1° carregamento	2° carregamento		
	Ki	Ke	K	Klig
1a	0,202	0,002	0,016	0,107
1b	0,040	0,087	0,096	0,062
2a	0,064	0,143	0,153	0,202
2b	0,044	0,161	0,165	0,148
3a	0,581	0,539	0,522	0,718
3b	0,602	0,682	0,673	0,987
4a	0,128	0,279	0,288	0,187
4b	0,173	0,127	0,133	0,068
5	0,123	0,125	0,138	0,097
6	0,042	0,085	0,093	0,067
7	0,116	0,139	0,149	0,118
8	0,196	0,222	0,213	0,243
9	0,095	0,158	0,143	0,194
10	0,209	0,001	0,011	0,029
Média	0,187	0,196	0,200	0,231
Desvio padrão	0,181	0,192	0,185	0,276

Da análise estatística o programa MINITAB forneceu os resultados apresentados nas tabelas 36 a 39.

Tabela 36 – Correlações para variações entre as flechas calculadas considerando rigidez Ki e os ensaios (carregamentos iniciais).

Term	Coef	Stdev	t-ratio	p
Constant	0.58382	0.276798	2.109	0.064
X1:	-0.08217	0.046749	-1.758	0.113
X2:	-0.01814	0.005393	-3.364	0.008
X3	0.56700	0.151013	3.755	0.005
X1:*X1:	0.00396	0.002307	1.718	0.120

s = 0.1068 R-sq = 76.0% R-sq(adj) = 65.3%

Observação do MINITAB

Unusual Observations for Ki

Obs.	Ki	Fit	Stdev.Fit	Residual	St.Resid
2	0.040	0.200	0.076	-0.160	-2.12R

R denotes an obs. with a large st. resid.

Tabela 37 – Correlações para variações entre as flechas calculadas considerando rigidez Ke e os ensaios (segundo carregamentos).

Term	Coef	Stdev	t-ratio	p
Constant	0.4266	0.371307	1.149	0.280
X1:	-0.1023	0.062711	-1.632	0.137
X2:	-0.0107	0.007235	-1.481	0.173
X3	0.6170	0.202574	3.046	0.014
X1:*X1:	0.0052	0.003094	1.691	0.125

s = 0.1432 R-sq = 61.5% R-sq(adj) = 44.4% Observação do MINITAB

Observação do MINITAB

Unusual Observations for Ke

Obs.	Ke	Fit	Stdev.Fit	Residual	St.Resid
8	0.127	0.343	0.101	-0.216	-2.14R

R denotes an obs. with a large st. resid

Tabela 38 – Correlações para variações entre as flechas calculadas considerando rigidez K e os ensaios (segundo carregamento).

Term	Coef	Stdev	t-ratio	p
Constant	0.4363	0.354789	1.230	0.250
X1:	-0.1028	0.059921	-1.716	0.120
X2:	-0.0101	0.006913	-1.467	0.176
X3	0.5930	0.193562	3.064	0.013
X1:*X1:	0.0052	0.002957	1.776	0.110

s = 0.1369 R-sq = 62.1% R-sq(adj) = 45.2%

Observação do MINITAB

Unusual Observations for K

Obs.	K	Fit	Stdev.Fit	Residual	St.Resid
8	0.133	0.344	0.097	-0.211	-2.18R

R denotes an obs. with a large st. resid.

Tabela 39 – Correlações para variações entre as flechas calculadas considerando rigidez Klig e os ensaios (segundo carregamento).

Term	Coef	Stdev	t-ratio	p
Constant	0.8789	0.553284	1.589	0.147
X1:	-0.1469	0.093445	-1.572	0.150
X2:	-0.0227	0.010781	-2.102	0.065
X3	0.7205	0.301855	2.387	0.041
X1:*X1:	0.0074	0.004611	1.607	0.143

s = 0.2134 R-sq = 58.5% R-sq(adj) = 40.1%

Observação do MINITAB

Unusual Observations for Klig					
Obs.	Klig	Fit	Stdev.Fit	Residual	St.Resid
6	0.987	0.655	0.151	0.332	2.20R

R denotes an obs. with a large st. resid.

Da tabela 35 observa-se que a média das variações proporcionais é praticamente a mesma para todas as considerações de rigidez, observando porém que o desvio padrão nas considerações da rigidez determinada pelos ensaios de ligação (Klig) é maior que o desvio padrão encontrado nos outros casos.

Observa-se também nos valores médios e de desvio padrão da tabela 39 que a consideração de K_i para os resultados dos primeiros carregamentos apresenta mesma performance que as considerações de K_e e K para os resultados do segundo carregamento.

Fazendo-se uma regressão com os valores básicos de X (-1, 0 e 1), obteve-se as seguintes relações, onde pode-se analisar a influência de cada variável na variação entre os valores teórico e experimental.

$$\text{Variação proporcional } (K_i) = 0.1868 - 0.0145 X_1 - 0.1270 X_2 + 0.1417 X_3$$

$$\text{Variação proporcional } (K_e) = 0.19643 + 0.01175 X_1 - 0.07500 X_2 + 0.15425 X_3$$

$$\text{Variação proporcional } (K) = 0.1995 + 0.01100 X_1 - 0.07100 X_2 + 0.14825 X_3$$

$$\text{Variação proporcional } (K_{lig}) = 0.2305 + 0.0064 X_1 - 0.1586 X_2 + 0.1801 X_3$$

Observa-se nessas equações de regressão que os coeficientes das retas para as três primeiras considerações (K_i , K_e e K) são bastante próximos. Observando as tabelas 36 a 39 nota-se

que os valores de K_i são os que apresentam melhor coeficiente de regressão R , porém nota-se o aviso do Minitab sobre os resíduos excessivos em todas as curvas.

Nessas equações observa-se que a variável que responde pelo maior aumento nas variações entre os valores teóricos e experimentais é a variável X_3 , referente à relação entre alma e mesa. Sendo que a altura da viga (X_2) contribui também significativamente para as variações e a variável espaçamento entre pino (X_1) tem influência quase nula nas diferenças.

Os valores das flechas calculados pelas formulações teóricas do EC5 estão bastante próximos dos observados nos ensaios de flexão, o que indica que essa formulação é bastante adequada para dimensionamento nos estados limites de utilização das vigas compostas pregadas com alma em compensado.

6.4.2. Resultados dos ensaios de flexão: tensões internas.

Como já mencionado no Item 5.3.2, algumas vigas foram instrumentadas nos pontos de máximas tensões normais e cisalhantes. Os valores das tensões obtidas nos ensaios foram analisados e comparados com os valores fornecidos pela formulação teórica do EC5 para dimensionamento de vigas compostas nos estados limites últimos.

Os resultados dos ensaios para as máximas tensões normais e de cisalhamento e as flechas estão apresentados na tabela 40.

É importante observar que os valores das tensões são calculados em função das leituras dos extensômetros elétricos e dos módulos de elasticidade dos materiais. Os valores apresentados na tabela 40 são calculados utilizando os valores do módulo de elasticidade dos ensaios de tração em CPs de compensado extraídos das mesmas chapas utilizadas nas almas das vigas.

Observa-se que para cada viga existem dois resultados. O primeiro representa os valores para a primeira série de carregamento, onde observa-se que as flechas são maiores devido à acomodação dos pregos. O segundo refere-se a um segundo carregamento aplicado alguns minutos após o descarregamento do primeiro.

Esses resultados estão bastante próximos dos resultados calculados segundo o equacionamento do EUROCODE 5, cujos valores estão apresentados na tabela 41

Tabela 40 – Resultado das tensões atuantes dos ensaios e teóricas

viga	carga(kgf)	$\sigma_{\text{máx}}$ N/mm ²	σ_{min} N/mm ²	τ N/mm ²	flecha mm
1a	127	1,611	0,729	-0,366	2,09
	127	1,611	0,790	-0,349	1,94
1b	127	1,656	0,942	-0,382	1,73
	127	1,596	1,003	-0,369	1,56
2a	436	1,894	1,342	0,506	2,86
	490	2,087	1,508	-0,545	2,99
2b	490	2,234	1,673	0,535	2,73
	490	2,179	1,618	0,278	2,53
3a	127	0,508	0,120	0,137	1,52
	127	0,482	0,161	0,139	1,32
3b	127	0,495	0,241	0,128	1,15
	127	0,442	0,254	0,127	1,00
4a	436	1,100	0,994	0,401	2,32
	490	1,356	1,201	0,321	2,34
4b	490	1,643	1,252	0,278	1,82
	490	1,691	1,331	0,281	1,54
5	490	2,044	0,860	0,454	3,49
	490	2,062	1,073	0,420	2,84
6	490	-1,144	-0,661	0,355	3,22
	490	-1,109	-0,708	0,346	2,91
7	490	1,369	0,693	0,489	3,12
	490	1,403	0,795	0,465	2,72
8	508				4,02
	508				3,49
9	508				3,37
	508				2,60
10	508				3,36
	508				3,37

Tabela 41 – Valores de tensões e flechas calculados segundo os critérios do EUROCODE 5.

viga	carga kgf	σ_{\max} N/mm ²	σ_{\min} N/mm ²	τ N/mm ²	flecha total mm
1a	127,05	1,477	0,259	0,371	1,91
1b	127,05	1,336	0,536	0,375	1,41
2a	435,6	2,011	1,149	0,772	2,53
2b	490,05	1,800	1,228	0,676	1,88
3a	127,05	1,017	0,367	0,194	2,01
3b	127,05	1,021	0,494	0,194	1,67
4a	435,6	1,744	0,922	0,401	1,67
4b	490,05	1,615	1,081	0,348	1,19
5	490,05	2,173	0,955	0,513	2,45
6	490,05	1,592	0,858	0,542	2,64
7	490,05	1,765	0,880	0,529	2,32
8	490,05	1,822	1,055	0,523	4,11
9	490,05	2,237	0,994	0,505	2,88
10	490,05	2,207	1,051	0,502	3,23

Para melhor visualização dos resultados, as figuras 44 e 45 apresentam de modo gráfico os resultados dos ensaios.

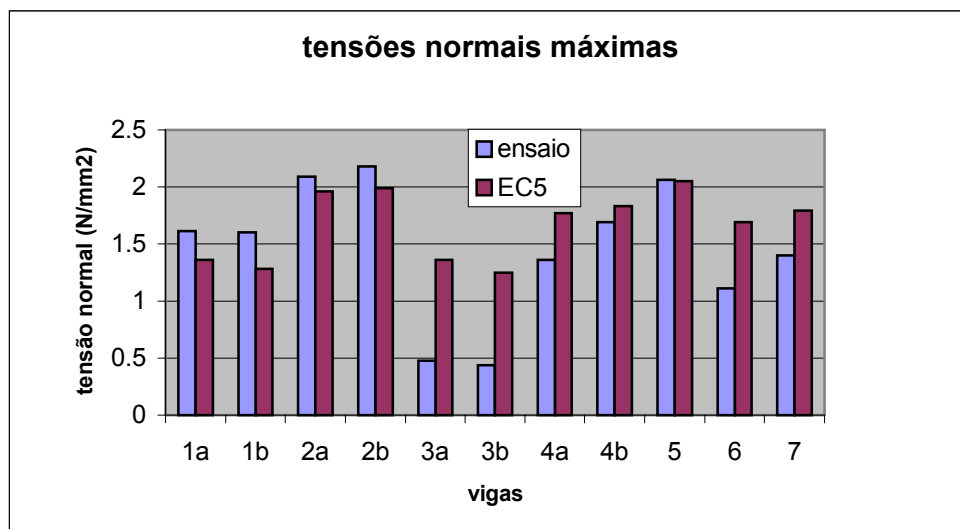


Figura 44 – Valores das tensões normais máximas nas vigas

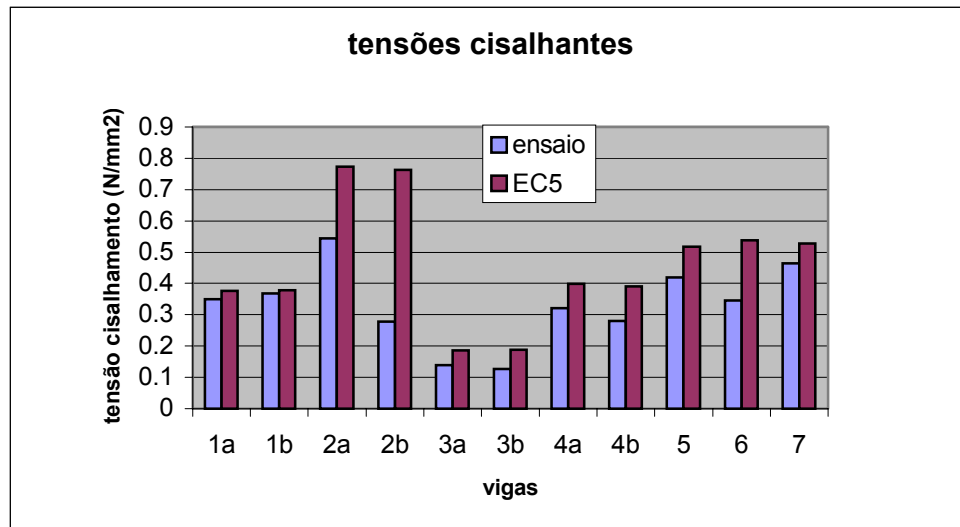


Figura 45 – Valores das tensões de cisalhamento máximas nas vigas

As figuras 44 e 45 mostram que na maioria das vigas os valores das tensões calculados são próximos dos valores obtidos nos ensaios. Apenas duas vigas (3a e 3b) nas tensões normais e duas no cisalhamento (2a e 2b) apresentaram maior diferença entre os valores esperados pela modelação teórica e os resultados dos ensaios.

Da análise visual na figura 44 observa-se nitidamente que para as vigas I (vigas 1 e 2) os valores das tensões normais experimentais são sempre superiores aos valores calculados pelas equações do EC5. Já para as outras vigas (seção caixão), a situação se inverte, e todos os valores obtidos nos ensaios são inferiores aos valores calculados.

Na figura 45 observa-se que todos os valores das tensões de cisalhamento obtidas nos ensaios apresentam-se inferiores aos valores calculados pelo EC5.

A partir das tabelas 40 e 41 é possível analisar as variações entre os valores calculados e os valores experimentais. Lembrando que as vigas de 1 a 4 variam suas geometrias e que não existem corpos-de-prova iguais entre esses, a análise de um único resultado é pouco conclusiva. As vigas 5 a 10 têm as mesmas dimensões, permitindo análises das tensões utilizando resultados de 3 vigas e flechas de 6 vigas, visto que apenas as vigas 5, 6 e 7 foram instrumentadas com extensômetros elétricos.

Tabela 42 – Variação proporcional entre os resultados teóricos e experimentais.

vigas	$\sigma_{\text{máx}}$	σ_{min}	τ	flecha total	soma
1a	0,09	2,06	1,94	0,02	1,03
1b	0,19	0,87	1,98	0,11	0,79
2a	0,04	0,31	1,71	0,18	0,56
2b	0,21	0,32	0,59	0,35	0,37
3a	0,53	0,56	0,29	0,34	0,43
3b	0,57	0,49	0,35	0,40	0,45
4a	0,22	0,30	0,20	0,41	0,28
4b	0,05	0,23	0,19	0,30	0,19
5	0,05	0,12	0,18	0,16	0,13
6	0,30	0,18	0,36	0,10	0,24
7	0,21	0,10	0,12	0,17	0,15
8				0,15	0,15
9				0,10	0,10
10				0,04	0,04
soma	0,22	0,50	0,72	0,20	

Da tabela 42 observa-se que entre os parâmetros calculados alguns apresentaram valores teóricos mais próximos do experimental, e que outros apresentaram distorções. O cálculo das flechas foi o que apresentou menores diferenças entre os valores teóricos e experimentais, com média de 20% de diferença, sendo que no pior caso apresentou 41% de diferença.

O cálculo das tensões máximas também apresentou boa correlação com os valores experimentais, com média das diferenças de 22%, sendo o pior resultado com uma variação de 57%.

O cálculo das tensões mínimas não é de grande importância para o dimensionamento das vigas compostas, mas vale notar que apresentou diferenças de 50% em média, porém com uma diferença de mais de 200% para a viga 1a.

Os resultados menos satisfatórios foram os referentes ao cálculo das tensões de cisalhamento, que apresentou em média variações de 72% com três vigas apresentando variações acima de 150%. A análise cuidadosa desses resultados precisa ser realizada a fim de verificar se essas diferenças são provenientes do equacionamento, da instrumentação ou

das propriedades utilizadas para o cálculo tanto da tensão no ensaio quanto na formulação do Eurocode 5.

Observando os resultados gerais por viga, nota-se que as vigas 1a e 1b apresentam resultados ruins para dois parâmetros. As vigas 2a e 2b também apresentam média das diferenças altas, lembrando que essas são as vigas de menor relação altura/vão. Os melhores resultados são apresentados pelas vigas caixão com as maiores relações altura/vão.

A tabela 43 apresenta os resultados dos ensaios e das formulações teóricas da viga V3mm. Esses ensaios foram conduzidos segundo o especificado no item 5.3, e a análise das tensões foram feitas segundo as recomendações dos EUROCODE 5.

Tabela 43 – Resultados da vigas V3mm

	Carga (N)	mesas		almas			Flecha (mm)
		$\sigma_{\text{máx,sup}}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\text{máx,inf}}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\text{máx,sup}}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\text{máx,inf}}$ (N/mm ²)	τ (N/mm ²)	
Ensaio	7000	3,69	3,27	4,44	4,60	0,62	5,75
EC5	7000	4,13	4,13	3,94	3,94	0,81	5,74
	Dif. (%)	11	21	13	17	24	0

Os resultados apresentados na tabela 43 mostram mais uma vez que os critérios de dimensionamento do EUROCODE 5 apresentam valores muito próximos dos obtidos nos ensaios. Nota-se nesses resultados o mesmo observado nos outros resultados de vigas, ou seja, alta confiabilidade dos resultados das flechas, boa confiabilidade para os resultados das tensões normais e maiores discrepâncias nos resultados de cisalhamento, mas ainda mantendo valores aceitáveis considerando a variabilidade dos materiais utilizados nos ensaios.

6.4.3. Ruptura

Para uma análise final do comportamento das vigas, 9 das dez vigas montadas foram carregadas até a ruptura. O modo de ruptura observado em 8 das nove vigas foi tração na alma de compensado devido à flexão, conforme as fotos da figura 46.

A partir da carga última de ensaio suportada pela viga foram calculadas as tensões atuantes segundo o equacionamento do EC5. Os valores calculados, bem como a carga de ruptura estão apresentados na tabela 44.



Figura 46 – Modo de ruptura de 8 das 9 vigas rompidas

Tabela 44 – Cargas de ruptura nos ensaios e valores das tensões estimadas pelo EC5 para esse carregamento

viga	carga N	$\sigma_{\text{máx}}$ N/mm ²	τ N/mm ²	σ_{alma} N/mm ²	F_{pino} N
1b	15520	155,89	46.18	21.63	24183
2b	43280	175,48	67.41	18.66	31581
3b	22050	216,74	32.59	18.93	32888
4b	42780	159,68	34.12	11.79	29111
5	20120	84,01	21.25	12.02	36082
6	29590	101,89	32.49	27.08	45656
7	24505	89,55	26.40	20.03	39108
8	17417	58,72	18.93	15.69	26737
9	21306	92,18	22.22	11.69	39336

Valores de resistência:

Madeira maciça: $f_{c0} = 29,75 \text{ N/mm}^2$ (tabela 10)

Compensado: $f_{t0} = 21,41 \text{ N/mm}^2$ (tabela 17)

$f_v = 7,1 \text{ N/mm}^2$ (tabela 23)

$f_{e0, nbr} = 24,91 \text{ N/mm}^2$, $f_{e0, prEN} = 39,40 \text{ N/mm}^2$ (tabela 25)

$F_{e, nbr} = 1640 \text{ N}$, $F_{e, prEN} = 2600 \text{ N}$ (tabela 25)

Os valores da tabela 45 se apresentam muito mais altos do que a resistência apresentada pelos materiais nos ensaios para determinação dessas propriedades. Analisando os valores calculados observa-se que os esforços nos pregos estão cerca de 20 vezes superior à resistência encontrada nos ensaios de embutimento. As tensões normais e de cisalhamento aproximadamente 7 vezes a resistência e a tração nas mesas em alguns casos não alcançou o valor de resistência.

Com essas observações, e do acompanhamento dos ensaios, que apresentaram deformações excessivas antes da ruptura conclui-se que primeiro foi atingida a resistência ao embutimento, e como o modo de ruptura no embutimento do compensado é plastificação excessiva, há uma diminuição da rigidez das ligações, criando deformações excessivas entre mesa e alma, que diminui consideravelmente a rigidez efetiva da viga. Com diminuição da rigidez da ligação alma-viga a distribuição das tensões na viga se altera, fazendo com que as almas recebam esforços de flexão muito maiores do que os que receberiam se a composição parcial estivesse mantida.

Com relação à viga que não rompeu por plastificação das ligações seguido de ruptura da alma, viga 1, a ruptura se deu por tração nas mesas inferiores, ocorrido na região de um nó presente nas peças das mesas. Observando os valores da tabela 44 para a viga 1 observa-se que os valores das tensões e da carga no prego se apresentam muito acima do esperado, o que leva a concluir que antes da ruptura das mesas a viga já havia rompido por deformação excessiva das ligações.

É importante observar que esse fenômeno só é possível devido ao comportamento do compensado no embutimento. Como se pode observar na figura 47, após o início da plastificação o compensado continua suportando aumentos de carga, não apresentando ruptura por fendilhamento. Assim, a ligação na viga deformou, gerando uma redistribuição das tensões que permitiu o aumento da carga atuante, inclusive com aumento do carregamento nas ligações.

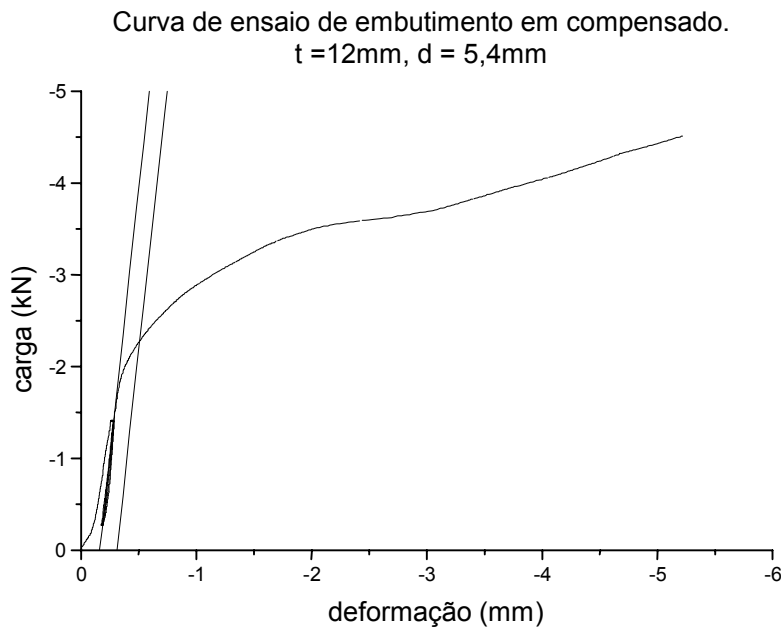


Figura 47 – Curva de ensaio de embutimento em chapa de compensado.

Quanto ao modo de ruptura, é interessante observar que depois da ruptura da alma a viga ainda suportava carga equivalente à que a levou a ruptura, mostrando uma ruína dúctil da estrutura. As fotos da figura 46 mostram que após a ruptura as peças continuam na sua posição sobre os apoios

6.4.4. Conclusões dos ensaios em vigas compostas

Das análises realizadas a respeito das flechas nas vigas conclui-se que o equacionamento do EC 5 para vigas compostas fornece valores bastante próximos dos observados nos ensaios, concluindo-se que as considerações a respeito da a rigidez de ligações alma-mesa em vigas compostas com alma em compensado feitas pelo método do EC5 são recomendáveis para o dimensionamento das flechas nessas estruturas. Essa conclusão é importante para a análises futuras de ligações de nó de pórtico em elementos compostos com alma em compensado.

Da análise dos resultados das tensões máximas atuantes nas vigas pode-se concluir que as equações do EC5 apresentam valores próximos dos valores encontrados nos ensaios de flexão das vigas compostas, apresentando média de diferenças entre valores teóricos e experimentais próxima de 20% e 30% para tensões normais e de cisalhamento respectivamente. Deve ser considerado que os materiais utilizados nas almas e mesas

possuem grande variabilidade de suas propriedades de rigidez, o que demandaria um maior número de repetições de corpos-de-prova para uma melhor análise das tensões.

Observa-se que as diferenças encontradas nos dados de carga x deslocamento são menores, provavelmente devido à sua instrumentação são depender de propriedades pontuais do material, e sim do comportamento global da viga.

Com relação à ruptura, é importante observar que a ruptura da viga é dúctil, para os casos de plastificação excessiva da ligação, apresentado “avisos” antes da ruptura, tais como estalos nas ligações e ruptura por tração da alma.

Conclui-se com os resultados da viga V3mm que a utilização de pregos de menor diâmetro apresenta bons resultados comparativos com as formulações do EUROCODE 5. Além disso, a facilidade de montagem da seção composta utilizando pregador pneumático leva a recomendar a utilização desses pregos na montagem dos corpos-de-prova de nó de pórtico.

6.5. Ensaio de nó de pórtico

A seguir estão apresentados os resultados e discussões referentes aos ensaios de ligações de nó de pórtico com elementos de seção composta com alma em compensado e mesas em madeira maciça. Esses ensaios seguiram o planejamento estatístico apresentado no item 5.3.2, visando obter dados confiáveis e suficientes para uma boa análise do comportamento dessas ligações.

6.5.1. Rigidez dos nós de pórtico

Os ensaios de nós de pórtico forneceram grande quantidade de dados que foram processados e as informações mais relevantes para a avaliação da rigidez dessas ligações estão apresentadas na tabela 45. A tabela 46 apresenta os valores das deformações lidas em cada extensômetro elétricos nos ensaios de nós de pórtico.

Tabela 45 – Valores de carga, deslocamentos e tensões atuantes obtidos nos ensaios de nó de pórtico.

nó	ΔP	Δ desl. (mm)				$\Delta\sigma$ N/mm ²			
	(N)	1	2	3	4	1	2	3	4
0,0a	2926,4	1,732	--	--	0,049	1,732	--	--	0,049
0,0b	2926,4	2,298	1,577	0,902	0,198	2,298	1,577	0,902	0,198
0,0c	2926,4	2,952	1,998	1,061	0,219	2,952	1,998	1,061	0,219
0,0d	2926,4	2,355	--	--	0,216	2,355	--	--	0,216
0,0e	2926,4	2,436	1,609	0,887	0,156	2,436	1,609	0,887	0,156
0,0f	2926,4	2,256	1,513	0,785	0,113	2,256	1,513	0,785	0,113
-1,-1a	2926,4	2,256	1,513	0,785	0,113	2,256	1,513	0,785	0,113
+1,-1b	2926,4	0,845	0,502	0,177	0,000	0,845	0,502	0,177	0,000
-1,+1a	2926,4	2,121	1,400	0,721	0,113	2,121	1,400	0,721	0,113
+1,+1a	2926,4	2,005	1,220	0,495	0,000	2,005	1,220	0,495	0,000
+1,-1a	2926,4	1,096	0,668	0,269	0,000	1,096	0,668	0,269	0,000
+1,-1 ex	2926,4	0,693	0,410	0,131	0,000	0,693	0,410	0,131	0,000
m.mis, -1	2926,4	1,167	0,750	0,357	0,011	1,167	0,750	0,357	0,011
0,col	2926,4	3,182	1,800	1,004	0,219	3,182	1,800	1,004	0,219
-1,col	2926,4	1,100	0,714	0,375	0,081	1,100	0,714	0,375	0,081
+1,col	2926,4	0,580	0,339	0,095	0,000	0,580	0,339	0,095	0,000

Tabela 46 – Valores das deformações nos nós de pórticos lidas nos extensômetros elétricos.

	ΔP	$\Delta \epsilon$			
nó	(N)	1	2	3	4
0,0a	292,64	135	-120	160	-180
0,0b	292,64	125	-165	80	-180
0,0c	292,64	130	-250	130	-215
0,0d	292,64	0	0	0	0
0,0e	292,64	140	-200	180	-230
0,0f	292,64	150	-150	75	-205
-1,-1a	292,64	150	-150	75	-205
+1,-1b	292,64	110	-210	65	-125
-1,+1a	292,64	135	-160	150	-180
+1,+1a	292,64	230	-285	110	-110
+1,-1a	292,64	190	-180	130	-180
+1,-1 ex	292,64	0	0	0	0
m.mis,-1	292,64	100	-145	140	-210
0,col	292,64	200	-360	355	-330
-1,col	292,64	140	-300	110	-220
+1,col	292,64	265	-320	190	-365

A figura 48 apresenta graficamente os deslocamentos medidos nos relógios comparados em função da carga aplicada ao nó 0,0e. A figura 49 apresenta graficamente as tensões medidas nos extensômetros elétricos em função da carga aplicada ao nó. Observa-se que em ambos os casos não ocorre plastificação para os níveis de carga utilizados no ensaio.

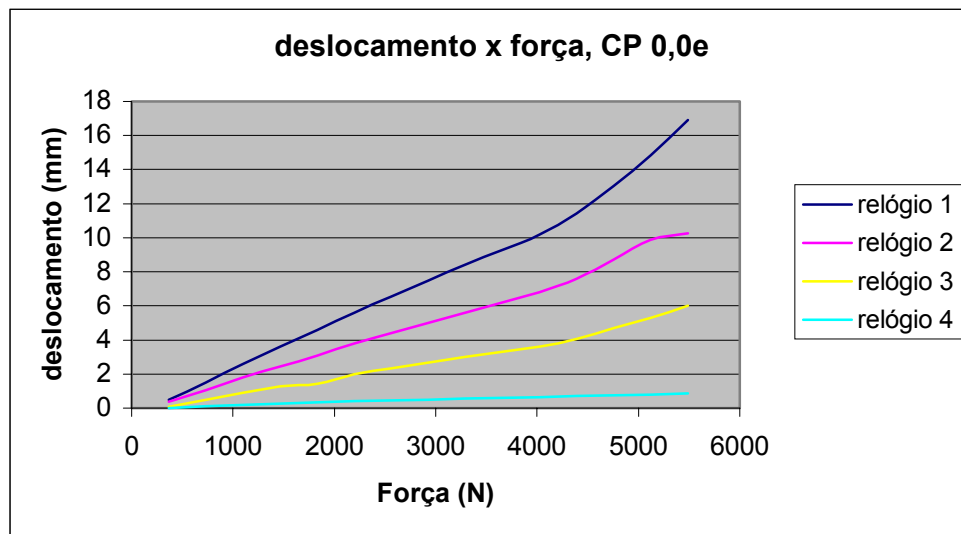


Figura 48 – Curva padrão deslocamento×força

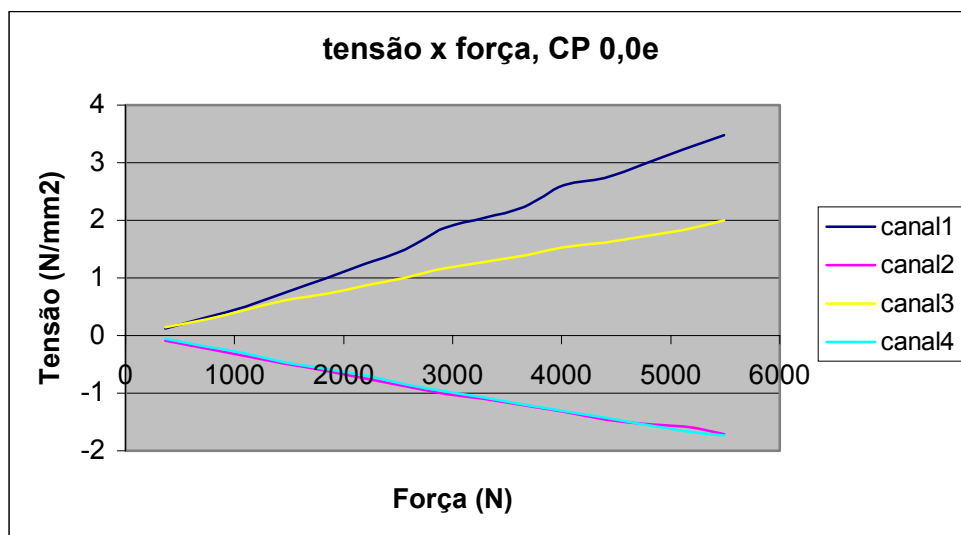


Figura 49 - Curva padrão tensões×força

A figura 50 apresenta graficamente as curvas de força×deslocamento referente ao relógio comparador 1 para os vários nós de pórtico ensaiados. Observa-se nessa figura a maior rigidez dos nós com mísula, e a pouca contribuição dos CPs “-1” para a rigidez dessas ligações.

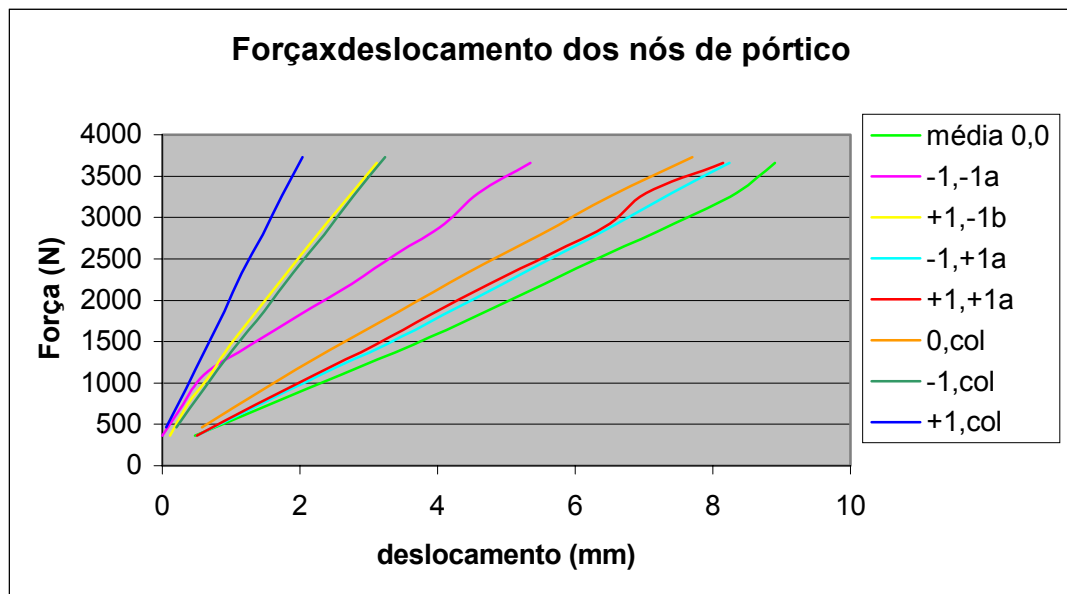


Figura 50 – Curvas força x deslocamento referente ao relógio comparador 1.

A partir dos dados de deslocamentos obtidos nos ensaios e apresentados na tabela 45 foram calculados os módulos de rigidez rotacional das ligações: K_r . Foram calculados os valores de K_r referente às leituras dos 4 relógios. É importante observar porém, que os relógios 1 e 2 estão afastados do centro de rotação da ligação e, portanto, as deformações por flexão da viga podem ser significativas. Por outro lado, o relógio 4 está muito próximo do centro de rotação, e sua sensibilidade pode não ser suficiente para fornecer boas leituras. Observa-se que para os CPs “-1” e “+1”, os dois pontos de fixação do relógio 4 estão na mesma peça, não apresentando portanto deformações relativas entre as duas vigas que compõem o nó. Diante dessas considerações, o módulo de rigidez rotacional das ligações calculados a partir das medidas do relógio 3 são as mais recomendadas. A tabela 47 apresenta os valores dos K_r para os 4 relógios comparadores.

O módulo de rigidez rotacional das ligações de nós de pórtico em estruturas compostas com alma em compensado é um dos principais objetivos de estudo deste trabalho, visto que na bibliografia internacional não existe referência ao cálculo dessa rigidez por meios teóricos. O EUROCODE 5 e outros autores já citados no capítulo 3 apresentam critérios de cálculo para ligações em nós de pórtico de estruturas de elementos de seção retangular, como MLC, LVL ou mesmo madeira maciça. Nesses critérios os cálculos baseiam-se no giro relativo entre as peças em torno de um centro de rotação. Nas estruturas de seção maciça, somente a rigidez do pinos metálicos e que contribuem para a rigidez rotacional, e conseqüentemente o centro de rotação está no centro geométrico do conjunto de pregos.

Tabela 47 – Módulos de rigidez rotacional obtidos nos ensaios

nó	Rotação (rad)				K_r (Nmm/rad)			
	1	2	3	4	1	2	3	4
0,0a	0,00182	--	--	0,00025	8,1E+08	--	--	6,0E+09
0,0b	0,00242	0,00225	0,00200	0,00099	7,1E+08	7,6E+08	8,6E+08	1,7E+09
0,0c	0,00311	0,00285	0,00236	0,00110	5,5E+08	6,0E+08	7,3E+08	1,6E+09
0,0d	0,00248	--	--	0,00108	6,9E+08	--	--	1,6E+09
0,0e	0,00256	0,00230	0,00197	0,00078	6,7E+08	7,5E+08	8,7E+08	2,2E+09
0,0f	0,00237	0,00216	0,00174	0,00057	7,2E+08	8,0E+08	9,9E+08	3,0E+09
-1,-1a	0,00237	0,00216	0,00174	0,00057	7,2E+08	8,0E+08	9,9E+08	3,0E+09
+1,-1b	0,00089	0,00072	0,00039	0,00000	1,9E+09	2,4E+09	4,4E+09	--
-1,+1a	0,00223	0,00200	0,00160	0,00057	7,7E+08	8,6E+08	1,1E+09	3,0E+09
+1,+1a	0,00211	0,00174	0,00110	0,00000	8,2E+08	9,9E+08	1,6E+09	--
+1,-1a	0,00115	0,00095	0,00060	0,00000	1,5E+09	1,8E+09	2,9E+09	--
+1,-1 ex	0,00073	0,00059	0,00029	0,00000	1,7E+09	2,1E+09	4,2E+09	--
m.mis,-1	0,00123	0,00107	0,00079	0,00005	1,4E+09	1,6E+09	2,2E+09	3,2E+10
0,col	0,00335	0,00257	0,00223	0,00110	5,1E+08	6,7E+08	7,7E+08	1,6E+09
-1,col	0,00116	0,00102	0,00083	0,00041	1,5E+09	1,7E+09	2,1E+09	4,2E+09
+1,col	0,00061	0,00048	0,00021	0,00000	2,6E+09	3,2E+09	7,4E+09	--

Nas ligações de nó de pórtico de estruturas compostas, além da rigidez dos pregos existe a rigidez do contato entre as mesas inferiores, conforme apresentado na figura 51. Com o acréscimo dessa rigidez, o centro de rotação deixa de ser o centro geométrico do conjunto de pregos. A partir dos ensaios de nó de pórtico realizados, observou-se após a ruptura que o centro de rotação da ligação pode ser considerado o ponto de compressão entre as mesas. A figura 52 apresenta detalhes de rupturas de corpos-de-prova onde se observa pelas deformações dos pregos e deslocamentos das peças que o centro de rotação é a região de contato entre as mesas inferiores das vigas.

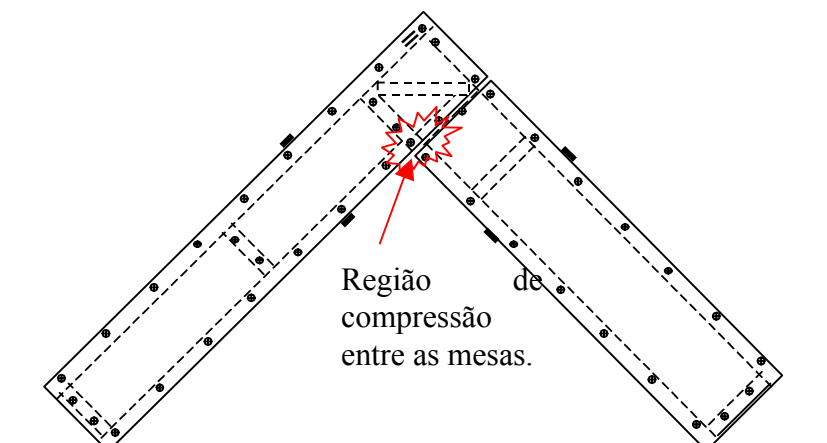


Figura 51 – Figura esquemática da região de compressão entre as mesas inferiores das vigas que compõem o nó de pórtico.



Figura 52 – Ruptura de nó de pórtico apresentando o centro de rotação relativa entre as vigas.

A partir dessas observações foram calculados os módulos de rigidez rotacional K_r considerando como centro de rotação o contato entre as mesas inferiores das vigas. Para os CPs “+1”, ou seja, com mísula, considerou-se como centro de rotação o contato entre mesa inferior e mísula, conforme apresentado na figura 52. Os valores de K_r encontrados estão apresentados na tabela 48, que também apresenta os valores de K_r obtidos nos ensaios e a diferença proporcional entre eles. Nota-se que os valores de K_r de ensaio adotados são os referente às medidas do relógio 3, conforme mencionado anteriormente. Nos corpos-de-prova onde só foram instalados os relógios 1 e 4, utilizou-se o valor de K_r referente ao relógio 1.

Assim, K_r foi calculado por:

$$K_r = \sum_{j=1}^n K_{\alpha_j} r_j^2$$

Onde K_{α_j} representa a rigidez ao embutimento na direção α do pino j e r_j representa a distância do pino j ao centro de rotação da peça, conforme apresentado por RACHER(1995) no item 3.3.

Tabela 48 – Valores dos módulos de rigidez, carga de ruptura, módulo de rigidez rotacional calculados e de ensaio.

nó	EI ef	Frup (Kgf)	Kensaio	Kprego
0,0a	3,07E+11	860	8,08E+08	9,46E+08
0,0b	3,38E+11	823	8,59E+08	9,03E+08
0,0c	2,72E+11	567	7,3E+08	1,02E+09
0,0d	3,06E+11	759	6,94E+08	1,03E+09
0,0e	2,62E+11	823	8,72E+08	9,11E+08
0,0f	3,03E+11	658	9,86E+08	1,16E+09
-1,-1a	3,77E+11	Não rompido	9,86E+08	3,29E+09
+1,-1b	3,72E+11	1847	4,38E+09	4,2E+09
-1,+1a	2,6E+11	860	1,07E+09	1,81E+09
+1,+1a	2,81E+11	1107	1,56E+09	1,54E+09
+1,-1a	3,57E+11	1628	2,88E+09	2,44E+09
+1,-1 ex	2,87E+11	1738	4,21E+09	3,15E+09
m.mis,-1	3,72E+11	1353	2,17E+09	2,34E+09
0,col	2,67E+11	745	7,71E+08	0
-1,col	3,27E+11	1536	2,07E+09	0
+1,col	2,85E+11	2097	7,38E+09	0

A Figura 53 apresenta os valores comparativos entre os módulos de rigidez medidos nos ensaios e os calculados referentes ao relógio 3, exceto para os CPs “0,0^{ab}” e “0,0d”, que utilizaram valores do relógio 1.

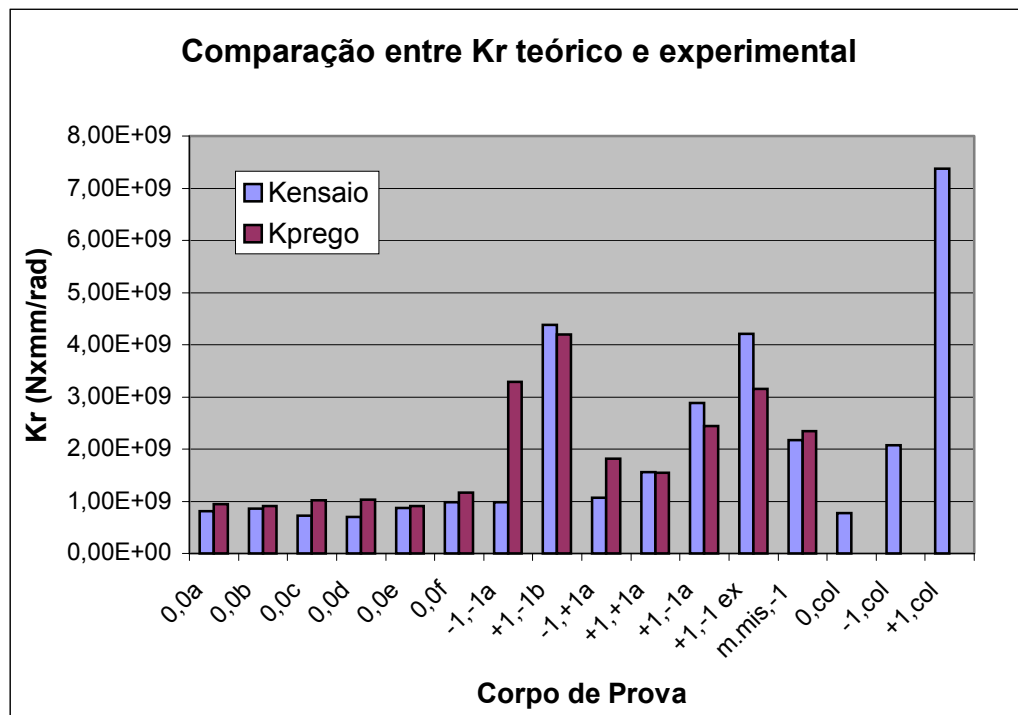


Figura 53 – Valores do módulo de rigidez rotacional experimental e calculado.

Na tabela 48 e na figura 53 observa-se que os valores calculados estão bastante próximos dos valores obtidos nos ensaios, com ressalvas para os valores dos CPs “-1” que apresentaram diferenças significativas. Diante da variabilidade da madeira e do compensado, as diferenças encontradas entre os valores de K_r de ensaio e teóricos são pequenas, indicando que o método adotado apresenta bons resultados.

Para uma análise mais rigorosa da confiabilidade da consideração do centro de rotação no cálculo da rigidez rotacional utilizou-se uma análise estatística cujo coeficiente de regressão resultou em: 63,1%. Considerando-se que os CPs “-1” apresentam valores muito diferentes, foi realizada outra regressão desconsiderando-se os CPs “-1”. Nessa nova análise o coeficiente de regressão resultou em 94,2%.

A fim de entender o comportamento das ligações “-1”, foram analisados seus modos de ruptura e observou-se, conforme a figura 54, que a ruptura desses CP se deu no centro do nó, indicando que a porção de compensado do L da ligação pouco contribui para a sua rigidez. Assim sendo, o módulo de rigidez rotacional K_r foi novamente calculado considerando-se apenas os pregos do quadrado central da ligação. Os valores encontrados foram: $K_{r(-1,-1)} = 1,71E+09$ Nmm/rad e $K_{r(-1,+1)} = 1,07E+09$ Nmm/rad.



Figura 54 – Modo de ruptura típico dos CPs “-1”

Utilizando esses valores em uma nova análise, o coeficiente de regressão resultou em 92,1%, considerando aqui todas as ligações ensaiadas.

Com esses valores pode-se concluir que o cálculo do módulo de rigidez rotacional da ligação de nó de pórtico considerando como centro de rotação o contato entre as mesas inferiores das vigas ou entre a mesa e a mísula fornece valores confiáveis para serem utilizados no dimensionamento de estruturas compostas.

Ainda na tabela 48 e da figura 53, comparando-se K_r das ligações pregadas com das ligações coladas observa-se que para os CPs “0” essa diferença é insignificante, para os CPs “-1” e “+1”, K_r das ligações coladas é praticamente o dobro de K_r das ligações pregadas. Observa-se ainda que K_r da ligação “meia mísula” apresenta valor intermediário entre a ligação “0” e a ligação “+1”, como era previsto.

Outro ponto importante na análise de rigidez de ligações é a relação entre o momento transmitido pela ligação em questão e o momento transmitido por uma ligação hipotética de rigidez infinita (engastamento perfeito). O EUROCODE 5 representa essa relação por R_M , sendo:

$$R_M = \frac{M_j}{M_\infty}$$

Onde M_j é o momento atuante na ligação real e M_∞ é o momento referente a uma ligação hipotética de rigidez infinita.

Essa análise é válida para estruturas onde ocorre redistribuição dos esforços, o que não é o caso dos corpos-de-prova de ligações por nó de pórtico ensaiados. Optou-se então pela análise de uma estrutura com ligações semi-rígidas equivalentes às ensaiadas. Para essa análise utilizou-se então os valores de K_r obtidos nos ensaios e calculou-se os momentos M_j em uma estrutura hipotética utilizando esses elementos segundo a metodologia apresentada por RACHER (1995), descrita no item 3.3 deste trabalho, sendo a estrutura um pórtico biarticulado apresentado na figura 12, com duas ligações semi-rígidas de rigidez rotacional K_r igual ao respectivo corpo-de-prova de nó de pórtico. Considerou-se também a relação $\alpha = 1$ ($\alpha = EI_{\text{viga}}/EI_{\text{col}}$) e os módulos de rigidez das peças, $(EI)_{ef}$ igual ao dos elementos utilizados no respectivo corpo-de-prova.

Outros dois parâmetros importantes para a análise da rigidez dos nós de pórtico segundo o método de RACHER (1995) são o vão do pórtico (L) e a altura das colunas (H). Para uma análise mais geral do comportamento dessas estruturas considerou-se valores extremos de $L/H_c = 1$ ou 10 e valores do vão em relação à altura das vigas de 5 a 25 , que condizem com situações reais de dimensionamento. Assim, para os valores citados, encontrou-se os valores de R_M para a combinação de três variáveis: Tipo de ligação ($X1$); Espaçamento entre pregos ($X2$) e relação L/h_v ($X3$).

RACHER (1995) apresenta a equação para o cálculo de M_j do pórtico em questão, para a qual é necessário o parâmetro β_r (coeficiente de rigidez) que é calculado por:

$$\beta_r = \frac{K_r \times L}{EI_{ef}}$$

As tabelas 50 e 51 apresentam os valores de β_r e R_M para as combinações de variáveis do planejamento estatístico.

Tabela 49 – Valores de β_r referentes a cada ligação de nó de pórtico ensaiada.

Tipo de nó	L/h _v =5	$\beta_r (L/Hc=1)$			$\beta_r (L/Hc=10)$	
		15	25	5	15	25
0,0a	3,03	9,08	15,14	3,03	9,08	15,14
0,0b	2,92	8,76	14,59	2,92	8,76	14,59
0,0c	3,08	9,25	15,41	3,08	9,25	15,41
0,0d	2,61	7,82	13,03	2,61	7,82	13,03
0,0e	3,84	11,51	19,18	3,84	11,51	19,18
0,0f	3,74	11,21	18,68	3,74	11,21	18,68
-1,-1a	3,00	9,01	15,02	3,00	9,01	15,02
+1,-1b	13,54	40,62	67,70	13,54	40,62	67,70
-1,+1a	4,74	14,23	23,71	4,74	14,23	23,71
+1,+1a	4,04	12,12	20,21	4,04	12,12	20,21
+1,-1a	9,28	27,85	46,42	9,28	27,85	46,42
+1,-1 ex	16,85	50,56	84,27	16,85	50,56	84,27
m.mis,-1	6,71	20,12	33,54	6,71	20,12	33,54
0,col	3,32	9,97	16,62	3,32	9,97	16,62
-1,col	7,26	21,77	36,29	7,26	21,77	36,29
+1,col	29,81	89,43	149,05	29,81	89,43	149,05

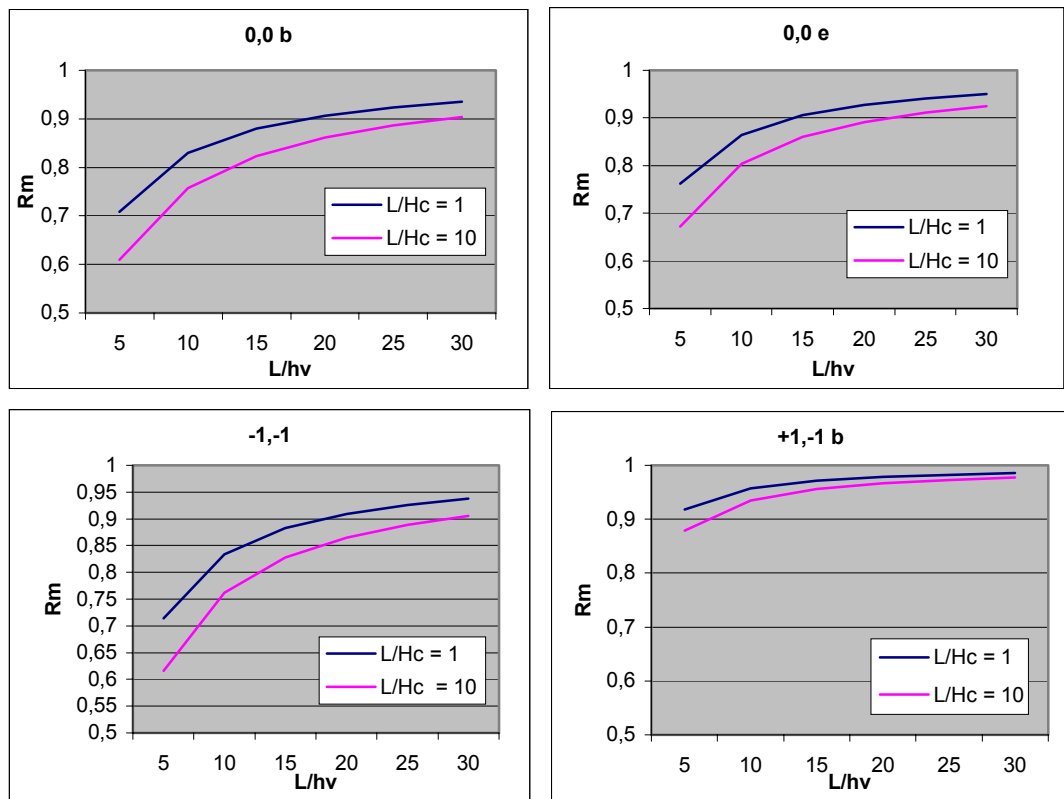
Segundo RACHER(1995) e o EUROCODE 5, pode-se considerar rígida para efeito de cálculo as ligações com $R_M \geq 0,85$. Dos gráficos apresentados na figura 55 observa-se que as ligações “0,0” e “-1” podem ser consideradas rígidas quando a relação L/h for maior que 15. Já as ligações “+1” são consideradas rígidas mesmo para L/h_v menores que 5.

A partir desses resultados montou-se a tabela 52 de resultados e variáveis para a análise estatística, conforme a tabela 4 de combinação de variáveis. A análise estatística multivariável foi realizada com o intuito de se conhecer as influências de cada variável na rigidez de uma ligação. Para a análise estatística considerou-se os valores de R_M referentes à $L/H = 10$.

Tabela 50 – Valores de R_M referentes a cada ligação de nó de pórtico ensaiada.

Tipo de nó	$L/h_v=5$	$R_M (L/Hc=1)$			$R_M (L/Hc=10)$		
		15	25	5	15	25	
0,0a	0,72	0,88	0,93	0,62	0,83	0,89	
0,0b	0,71	0,88	0,92	0,61	0,82	0,89	
0,0c	0,72	0,89	0,93	0,62	0,83	0,89	
0,0d	0,68	0,87	0,92	0,58	0,81	0,87	
0,0e	0,76	0,91	0,94	0,67	0,86	0,91	
0,0f	0,76	0,90	0,94	0,67	0,86	0,91	
-1,-1a	0,71	0,88	0,93	0,62	0,83	0,89	
+1,-1b	0,92	0,97	0,98	0,88	0,96	0,97	
-1,+1a	0,80	0,92	0,95	0,72	0,88	0,93	
+1,+1a	0,77	0,91	0,94	0,68	0,87	0,92	
+1,-1a	0,89	0,96	0,97	0,83	0,94	0,96	
+1,-1 ex	0,93	0,98	0,99	0,90	0,96	0,98	
m.mis,-1	0,85	0,94	0,97	0,78	0,91	0,95	
0,col	0,73	0,89	0,93	0,64	0,84	0,90	
-1,col	0,86	0,95	0,97	0,79	0,92	0,95	
+1,col	0,96	0,99	0,99	0,94	0,98	0,99	

De forma gráfica pode-se observar na figura 55 que os valores de R_M crescem tendendo a 1 com o aumento da razão L/h . Observa-se para os gráficos das ligações 0,0 que para relações L/h maiores que 15

Figura 55 – Curvas de $R_M \times L/h_v$ Tabela 51 – Combinação de variáveis e resposta para análise estatística, considerando valores de R_M referentes à $L/H = 10$.

X1	X2	X3	resposta
Tipo de nó	Espaçamento (mm)	L/h_v	R_M
-1	20	5	0,62
+1	20	5	0,88
-1	40	5	0,72
+1	40	5	0,68
-1	20	25	0,89
+1	20	25	0,97
-1	40	25	0,93
+1	40	25	0,92
0	30	15	0,83
0	30	15	0,82
0	30	15	0,83
0	30	15	0,81
0	30	15	0,86
0	30	15	0,86

Utilizando o software MINITAB, v. 10, fez-se a regressão multivariável cujos resultados estão apresentados a seguir:

```
MTB > FFactorial c4 = c1 c2 c3 c1*c2 c1*c3 c2*c3 c1*c2*c3;
SUBC> EPlot;
SUBC> Fits 'FITS1';
SUBC> Residuals 'RESI1'.
```

Fractional Factorial Fit

Estimated Effects and Coefficients for C4

Term	Effect	Coef	Std Coef	t-value	P
Constant		0.82936	0.005295	156.63	0.000
C1	0.07310	0.03655	0.007005	5.22	0.002
C2	-0.03007	-0.01503	0.007005	-2.15	0.075
C3	0.20097	0.10049	0.007005	14.35	0.000
C1*C2	-0.09891	-0.04946	0.007005	-7.06	0.000
C1*C3	-0.03690	-0.01845	0.007005	-2.63	0.039
C2*C3	0.01993	0.00997	0.007005	1.42	0.205
C1*C2*C3	0.05109	0.02554	0.007005	3.65	0.011

Analysis of Variance for C4

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	0.093275	0.0932748	0.0310916	79.21	0.000
2-Way Interactions	3	0.023085	0.0230855	0.0076952	19.60	0.002
3-Way Interactions	1	0.005220	0.0052199	0.0052199	13.30	0.011
Residual Error	6	0.002355	0.0023552	0.0003925		
Curvature	1	0.000280	0.0002800	0.0002800	0.67	0.449
Pure Error	5	0.002075	0.0020753	0.0004151		
Total	13	0.123935				

Dessa análise de regressão múltipla, o modelo de regressão encontrado foi:

$$R_M = 0,8294 + 0,0366 \times X_1 - 0,0150 \times X_2 + 0,1005 \times X_3 - 0,04946 \times X_1 \times X_2 - 0,0185 X_1 \times X_3 + 0,00997 X_2 \times X_3 + 0,02554 \times X_1 \times X_2 \times X_3$$

Da análise residual do modelo de regressão múltipla conclui-se que o mesmo é adequado, portanto, podendo ser utilizado para estimar a rigidez da ligação. A tabela 52 apresenta os valores dos coeficientes, desvio padrão e valor de t calculado e tabelado para as variáveis.

Da regressão múltipla observa-se que o efeito da variável X1 (tipo de ligação) é significativo, o que pode ser confirmado pelo valor de p, da distribuição de t-student, sendo p = 0,002 e efeito= 0.07310; a variável X2 (espaçamento entre pregos) apresenta pouca influência, com p = 0,075 e efeito= -0.03007; e X3 (razão L/h) com grande influência com p = 0,000 e efeito= 0.20097, o que já era esperado pois o equacionamento de Mj contém H/L e β_r que por sua vez é correlata ao módulo de rigidez EI e conseqüentemente à altura da viga. Na análise estatística considera-se influência significativa valores de $p \leq 0,05$.

Tabela 52 – Valores obtidos na análise de regressão múltipla.

variável	efeito	coeficiente	Desvio padrão	t-value	P
Constant		0.82936	0.005295	156.63	0.000
C1	0.07310	0.03655	0.007005	5.22	0.002
C2	-0.03007	-0.01503	0.007005	-2.15	0.075
C3	0.20097	0.10049	0.007005	14.35	0.000
C1*C2	-0.09891	-0.04946	0.007005	-7.06	0.000
C1*C3	-0.03690	-0.01845	0.007005	-2.63	0.039
C2*C3	0.01993	0.00997	0.007005	1.42	0.205
C1*C2*C3	0.05109	0.02554	0.007005	3.65	0.011

A relação entre variáveis $X1 \times X2$ apresenta também grande influência sobre a rigidez, com $p = 0,000$ e efeito = -0.09891 , assim como a relação $X1 \times X3$ com $p = 0,039$ e efeito = -0.03690 . A relação $X2 \times X3$ apresenta pequena influência na rigidez, com $p = 0,205$ e efeito = 0.01993 respectivamente. E, finalmente, a correlação entre as três variáveis apresenta influência na rigidez com $p = 0,011$ e efeito = 0.05109 . Observa-se também pelo valor de p da curvatura que, por ser alto, demonstra que não existe efeito de curvatura significativo.

Segundo a regressão múltipla, a rigidez da ligação poderia ser estimada de forma empírica, já desconsiderando as variáveis e combinações com pouca influência, por:

$$R_M = 0,8294 + 0,0366 \times X1 + 0,1005 \times X3 - 0,04946 \times X1 \times X2 + 0,02554 \times X1 \times X2 \times X3$$

Para os níveis das variáveis adotados, a análise estatística múltipla indica que a rigidez rotacional de uma ligação de nó de pórtico é influenciada pela geometria adotada, ou seja, se esta possui mísula ou não, e pela geometria do pórtico e dos elementos. O espaçamento apresentou pouca influência nessa análise devido aos intervalos de espaçamentos de 6d a 13d entre pregos utilizados nos ensaios, que são espaçamentos viáveis do ponto de vista de dimensionamento. Espaçamentos maiores resultariam em baixa eficiência da seção composta, e por isso não são recomendáveis. É importante observar que o espaçamento entre pregos está diretamente relacionado com a quantidade de pregos na ligação, e conseqüentemente com o cálculo de K_r , portanto são importantes para a rigidez da ligação. Essa influência pode ser observada comparando-se os valores de K_r de ensaio das ligações “-1,-1” com “-1,+1” e “+1,-1” com “+1,+1” na tabela 48.

Os corpos-de-prova com meia mísula e colados foram ensaiados com o intuito de fornecer parâmetros extras para avaliar a coerência do comportamento dessas ligações, não estando

esses CPs previstos no planejamento estatístico e, conseqüentemente, seus resultados não foram utilizados na análise estatística assim como os corpos-de-prova “+1,-1 a” e “+1,-1 extra” por apresentarem problemas de montagem.

Observando-se na tabela 50 os valores de R_M para esses corpos-de-prova acima citados, observa-se que a diferença entre K_r observada entre os corpos-de-prova colados e pregados tipo “-1” e “+1”, que era de praticamente o dobro, deixa de ser significativa quando comparados os respectivos valores de R_M , pois mesmo para as ligações pregadas os valores de R_M já eram acima de 0,85, ou seja, já podiam ser consideradas rígidas. Ainda na tabela 50 observa-se que a utilização de meia mísula já é suficiente para aumentar a rigidez da ligação para níveis considerados rígidos. Observa-se também que os CPs “+1,-1 a” e “+1,-1 extra” apresentaram bons resultados mesmo com montagem irregular (mesa interrompida e falta de montantes respectivamente). Esse desempenho provavelmente se deve à grande rigidez da mísula.

6.5.2. Modos de ruptura

Apesar do foco desse trabalho ser a rigidez das ligações, aqui são apresentadas algumas considerações a respeito da carga máxima resistida e dos modos de ruptura observados nos CPs ensaiados. Com exceção do corpo-de-prova “-1,-1” todos os corpos-de-prova de ligação de nó de pórticos foram carregados até a ruptura, anotando-se a carga máxima de cada ensaio e o modo de ruptura..

Dos valores das cargas de ruptura apresentados na tabela 48, nota-se um grande aumento da carga última dos corpos-de-prova “0” para os corpos “+1”, que segue a tendência de aumento de K_r . Nota-se também que o CP com meia mísula apresenta valores próximos da média entre “0” e “+1” tanto para a carga máxima quanto para K_r . Observa-se pelos valores de ruptura um grande acréscimo da carga de ruptura dos corpos-de-prova “+1” quando se dobrou o número de pregos (CPs “+1,+1” e “+1,-1 b”).

É interessante observar que as cargas de ruptura dos corpos-de-prova colados não foram muito superiores aos seus equivalentes pregados e que junto com a comparação relativa à rigidez mostra boa eficiência das ligações pregadas.

Os modos de ruptura de todos os CPs rompidos estão apresentados nas fotos das figura 56 e 57, seguindo a seqüência da tabela 48.



Figura 56 – Modos de ruptura dos corpos-de-prova 0,0a; 0,0b; 0,0c; 0,0d; 0,0e; 0,0f; +1,-1b e -1,+1.

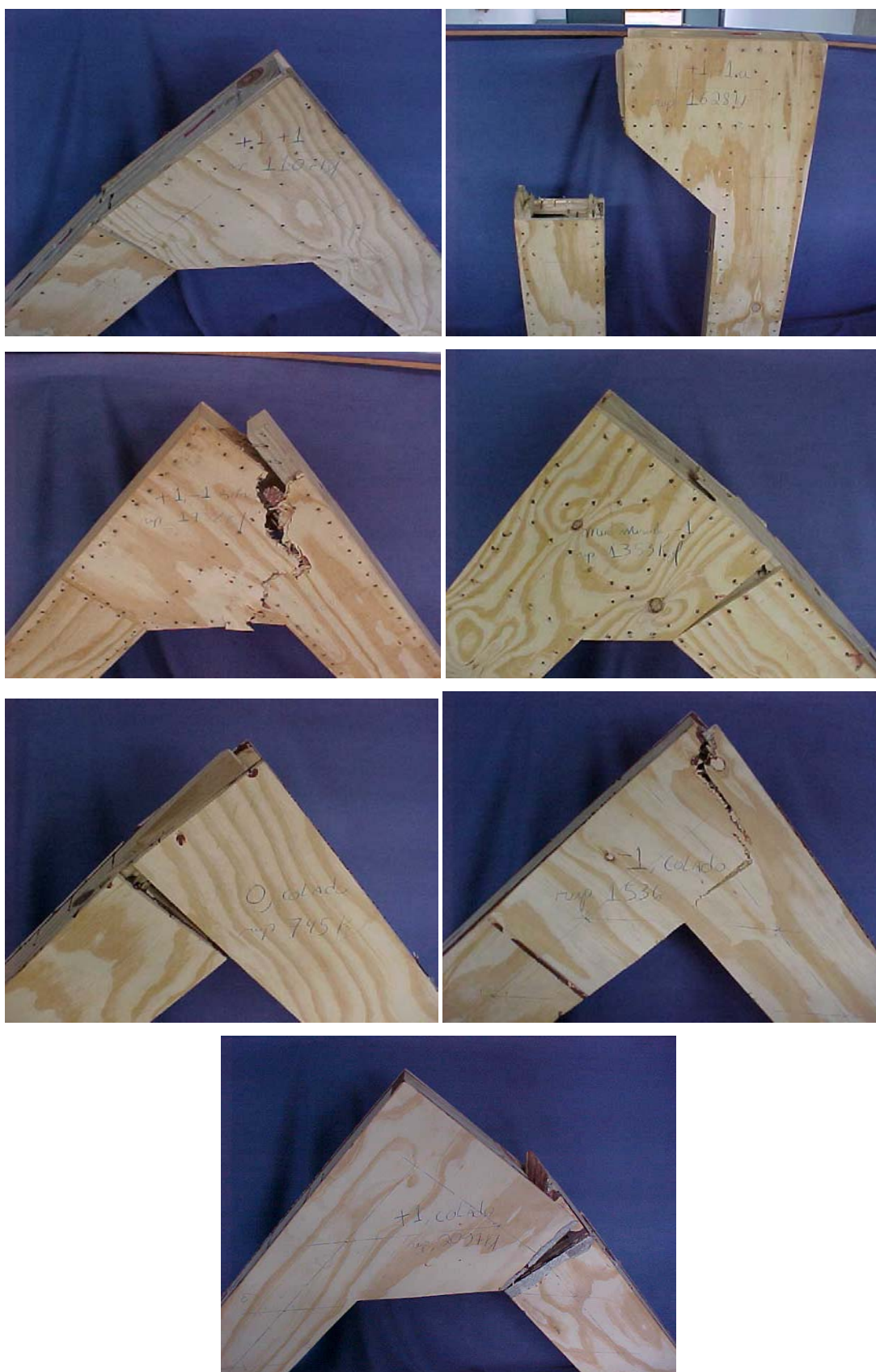


Figura 57 – Modos de ruptura dos corpos-de-prova +1,+1; +1,-1a; +1,-1ex; meia mísula; 0,col; -1,col e +1,col

Como pode ser observado na figura 56 os modos de ruptura encontrados para os CPs “0” pregados foram sempre por deformação excessiva da ligação, seguidos pela ruptura por flexão da mesa inferior após grande deformação. Já para os corpos-de-prova “+1” e “-1” os modos de ruptura final foram por ruptura na madeira das mesas ou das chapas de compensado.

Essa mudança do modo de ruptura indica que o aumento da quantidade de pregos na região solicitada ao momento foi suficiente para que os pregos deixassem de ser o ponto crítico da ligação, permitindo um aumento de carga suficiente para que outros pontos rompessem antes dos pregos. É importante notar que pode ter ocorrido plastificação de alguns pregos durante o carregamento das ligações “+1” ou “-1”, porém não em escala perceptível a olho nu.

Analisando-se os modos de ruptura das ligações coladas pode-se reforçar a afirmativa anterior, visto que as rupturas dos corpos-de-prova colados se deu praticamente igual às rupturas dos corpos-de-provas pregados “+1” e “-1”, sendo a carga de ruptura dos corpos-de-prova colados não muito superior às cargas de ruptura dos CPs pregados.

6.5.3 Conclusões sobre os ensaios de nó de pórtico.

Dos ensaios de rigidez de ligações de nó de pórtico pode-se concluir que a geometria da ligação tem grande influência na rigidez, observando que as mísulas mostraram grande eficiência no aumento da rigidez e da resistência dos nós de pórtico.

O equacionamento utilizado na análise de rigidez de nó de pórtico, adaptado do proposto por RACHER (1995), considerando o centro de rotação como o contato entre as mesas inferiores das vigas, ou entre mísula e mesa inferior da viga apresentaram bons resultados.

Dos resultados obtidos para os CPs utilizados, considerando as dimensões adotadas para esse trabalho, pode-se concluir que as ligações de nó de pórtico em estruturas compostas com alma em compensado podem ser adotadas como rígidas na maioria dos casos, sendo que a verificação dessa rigidez pode ser feita utilizando as formulações teóricas apresentadas para cálculo da rigidez das ligações, que resultaram em boa aproximação.

7. Conclusões

O comportamento das estruturas compostas com alma em compensado observado nesse trabalho leva a concluir que esse sistema construtivo apresenta boas características de rigidez e resistência para aplicação na construção estruturas seguras, eficientes e duradouras.

Os critérios de dimensionamento de vigas compostas mais adequados para as vigas pregadas são os apresentados no EUROCODE 5:1993, pois consideram as variáveis que mais influenciam no comportamento dessas estruturas.

O cálculo das vigas compostas utilizando os valores da rigidez das ligações (K) obtidos dos ensaios de ligações apresentaram bons resultados. Recomenda-se esses ensaios de ligações para a determinação módulo de rigidez (K) de cada pino utilizando corpos de prova equivalentes às seções das vigas a serem analisadas, com mesmo diâmetro dos pinos, espaçamento entre pinos, seção das almas e das mesas.

As vigas compostas com ligação alma/mesa pregadas apresentam comportamento compatível com as teorias de elementos compostos. Apesar de não apresentarem a mesma eficiência da ligação colada, as ligações pregadas podem ser dimensionadas para resultar em boa eficiência da composição parcial.

As vigas compostas pregadas apresentaram ruptura dúctil devido à deformação dos pinos metálicos. Essa informação é importante do ponto de vista de segurança das estruturas, uma vez que a estrutura dá indícios da ruptura com antecedência para que medidas emergenciais sejam tomadas.

Os bons resultados apresentados por elementos de seção composta pregada utilizando martelo pneumático e sem pré-furação indicam que sua utilização é uma alternativa viável

tecnicamente. O pregador pneumático também se mostrou uma ferramenta de fácil utilização que agilizou a montagem de seções compostas.

Assim como nas vigas compostas, as ligações de nó de pórtico em estruturas compostas com alma em compensado apresentaram valores compatíveis entre resultados de ensaios e os calculados segundo as formulações teóricas. Observa-se porém que a formulação teórica para o cálculo da rigidez das ligações de nós de pórtico deve ser alterada, considerando como centro de rotação o ponto de contato por compressão entre as mesas inferiores dos elementos ligados.

Dos ensaios de ligações por nó de pórtico observou-se um grande acréscimo da resistência e da rigidez com a utilização de mísulas. Essas mísulas permitem aumentar a quantidade de pregos na ligação e a seção da ligação na região mais solicitada, portanto aumentando a eficiência da ligação de nó de pórtico.

Segundo os resultados dos ensaios, as ligações de nó de pórtico de estruturas compostas com compensado podem ser consideradas como rígidas em quase todos os casos estudados, pois apresentam $R_M \geq 0,85$, que segundo RACHER é o suficiente para se considerar a ligação como rígida no cálculo da estrutura sem resultar em erro considerável.

Comparando-se resultados de ligações de nó de pórtico pregadas com resultados de ligações coladas observa-se que o aumento da rigidez nas ligações coladas não é suficiente para mudar significativamente a relação R_M . Da mesma forma, as ligações de nó de pórticos coladas apresentaram carga máxima de ruptura pouco superior às cargas de ruptura dos corpos de prova equivalentes pregados, mostrando boa eficiência do sistema pregado.

Dada a verificação da aplicabilidade das formulações específicas para as estruturas compostas com alma em compensado e observando que essas equações consideram muitas variáveis não contempladas nos critérios apresentados pela NBR 7190:1997, sugere-se a inclusão de critérios de dimensionamento para estruturas compostas com alma em compensado no texto da NBR 7190:1997. Desta maneira, incentivando e divulgando a utilização desse sistema construtivo, oferecendo mais uma alternativa para a construção de estruturas de madeira no Brasil.

A eficiência das ligações pregadas, com rigidezes muito próximas das ligações coladas, justifica a utilização das ligações alma/mesa pregadas para a execução de estruturas “in loco”, sem necessidade de industrializar o sistema de montagem como é o caso das ligações coladas.

Para a continuidade do desenvolvimento das estruturas compostas com alma em compensado recomenda-se pesquisas referentes às emendas de peças de mesas e de almas, fluência de ligações alma/mesa pregadas e estudo de carregamentos dinâmicos para a utilização desses sistemas na construção de pontes e passarelas.

8. Bibliografia

ALMEIDA, P. A. O. Uniões pregadas de madeira. São Paulo, 1987.
Dissertação(mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 174p.

_____. Estruturas de grande porte de madeira composta. São Paulo, 1990,
Tese(doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 280p.

AMERICAN PLYWOOD ASSOCIATION (APA). Plywood design specification –
supplement 2, design and fabrication of plywood-lumber beans. Tacoma. APA. 1983.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) 1981 Annual book
of ASTM standards. Designations: D 143, D 2719 e D 3500-76. Philadelphia. Pa,
ASTM.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190/97 - Projeto de
estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT. 1997.

_____. NBR 9484/85 - Compensado - determinação do teor de umidade - método de
ensaio. Rio de Janeiro: ABNT. 1985. 2p.

_____. NBR 9485/85 - Compensado - determinação da massa específica aparente -
método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT. 1985. 3p.

_____. NBR 9486/85 - Compensado - determinação da absorção de água - método de
ensaio. Rio de Janeiro: ABNT. 1985. 3p.

_____. NBR 9488/85 - Amostragem de compensado para ensaio. Rio de Janeiro:
ABNT. 1985. 3p.

_____. NBR 9489/85 - Condicionamento de corpos de prova de compensados para ensaios. Rio de Janeiro: ABNT. 1985. 3p.

_____. NBR 9490/85 - Lâminas e compensados - terminologia. Rio de Janeiro: ABNT. 1985. 9p.

_____. NBR 9531/85 - Chapas de madeira compensada - classificação. Rio de Janeiro: ABNT. 1985. 3p.

_____. NBR 9532/86 - Chapas de madeira compensada - especificação. Rio de Janeiro: ABNT. 1985. 3p.

_____. NBR 9533/86 - Compensado - determinação da resistência à flexão estática - método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT. 1985. 5p.

_____. NBR 9534/86 - Compensado - Determinação da resistência da colagem ao esforço de cisalhamento - método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT. 1985. 3p.

_____. NBR 9535/86 - Compensado - determinação da resistência da colagem ao esforço de cisalhamento - método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT. 1985. 3p.

BATCHELAR, M. L. & HUNT, R. D. Composite plywood and steel gusset plates for moment resisting joints in timber frames. *In*: International Timber Engineering conference London. Londres, 1991. Anais, p. 3.104 – 3.110.

BATISTA, J. L. Resistência ao embutimento da madeira serrada. São Carlos, 1996, Monografia apresentada para exame de qualificação - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 57p.

BODIG, J. & JAYNE, B. A. Mechanics of wood and wood composites. Ed. Van Nostrand Reinhold, New York, 1982. 711p.

CERLIANI, C. & BAGGENSTOS, T. Sperrholzarchitektur. Ed. Lignum, Suíça, 1997. 243p.

CESAR, S. F. As estruturas Hauff de madeira no Brasil. São Carlos, 1991. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 204p.

COMITE EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. Design of timber structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings EUROCODE 5. Bruxelas: CEN. 110p. 1993.

_____. Timber structures - Test methods - Determination of embedding strength and foundation values. Draft, prEN 383. Bruxelas: CEN. 1993. 12p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN - 1052. Structural use of timber. Berlin: DIN. 1969.

EHLBECK, J. & WERNER, H. Bolted and dowelled joints I. Timber Engineering. STEP 1. C6/1-C6/6. 1995.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO) Yearbook of forest products. 2000.

FERREIRA, C. A. T. Pontes pré-fabricadas de madeira. São Paulo, 1999. Tese (doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 104p.

FINNISH PLYWOOD INTERNATIONAL. Handbook of finnish plywood, blockboard and laminboard. CI/SfB Technical Publication nº 25. Helsinki, sd. 29p.

GALIMARD, Ph. & VERGNE, A. Numerical modelling of timber connections Semi-rigid behaviour of civil engineering structural connections. (COST C1), Bélgica, 1992. p. 272-280.

GEHRI, E. comunicação pessoal. 1999.

HARDWOOD PLYWOOD MANUFACTURERS ASSOCIATION (HPMA). The story of hardwood plywood. Reston (EUA): HPMA, sd. 11p.

HILSON, B. O. Nailed joints II. Timber Engineering. STEP 1. C5/1-C5/6. 1995.

- HOYLE, R. J. Design of lumber-plywood box beams. *In: Wood technology in the design of structures*. Cap. 17, p. 239 – 256. Mountain Press, Missoula, Montana, 1973.
- INTERNATIONAL PANEL & LUMBER (IPL). Hyframe, 3. Catálogo comercial. Nangarry (Austrália), 1990. 4p.
- JOHANSEN, K. W. Theory of timber connections. Internatinal association for Bridge and Structural Engineeing. Zurick. vol. 9. p. 249-262. 1949.
- KEINERT JR., S. Produção de compensados. *In: Revista da Madeira*. n. 24, 1995. p:42-45.
- KREUNZINGER, H. Mechanically jointed beams and columns. Timber Engineering. STEP 1. B11/1-B11/8. 1995.
- LEIJTEN, A. J. M. Reinforced semi-rigid timber joints. COST Project C1– semi-rigid behavior. COST C1 Workshop, Strasbourg, 28-30 de outubro de 1992.
- LEKHNITSKII, S. G. Anisotropic Plates. Ed. Gordon and Breach Science Publishers, New York, 2ª edição, 1956
- MILNER, H. R. & WOODARD, A. C. Design procedures for moment connections in plywood web box-beam portal frame. *In: International Wood Engineering Conference*. New Orleans, 1996. Anais, v.4, p 515-522.
- NATIONAL STANDARDS OF CANADA. Engineering design in wood. CAN/CSA - 086.1-M89. Toronto: CSA. 234p. 1989.
- OLIN, H. B. WOOD, cap. 201. *In: Construction: Principles, materials & methods*. Ed. Van Nostrand Reinhold, New York, 1990. p: 201-1 - 201-45.
- OLIVEIRA, J. T. S. & FREITAS, A. R. Painéis à base de madeira. Boletim técnico do Departamento de Engenharia da construção civil - Escola Politécnica - Universidade de São Paulo. BT/PCC/149, EPUSP, São Paulo, 1995. 44p.

- PFEIL, W. Estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 4 ed., Livros técnicos e Científicos Editora, 1985.
- PERILLO, E. Estruturas de Madeira. Universidade Mackenzie, Faculdade de Arquitetura, São Paulo, sd.
- PERILLO, E. Comunicação pessoal, 1997
- RACHER, P. Moment resisting connections. Timber Engineering. STEP 1. C16/1-C16/10. 1995.
- RANTA-MAUNUS, A. Laminated veneer lumber and other structural sections. Timber Engineering. STEP 1. A9/1-A9/7. 1995.
- RIBEIRO, G. O. Determinação de propriedades elásticas e de resistência dos compensados estruturais. São Carlos, 1987. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 214p.
- RODD, P. & POPE, D. Resin injected dowels in moment transmitting joints. *In: Pacific Timber Engineering Conferenc (PTEC), Austrália, 1994. Anais, p. 691-700.*
- RODD, P. D. e POPE, D. J. (1999) The stiffness off moment transmiting joints in reinforced glulam. *In: Pacific Timber Engineering Conference. Rotorua, New Zealand, 14-18 de março de 1999. Anais, p. 280-285*
- SANTANA, C. L. de O. Vigas de madeira de seção composta com alma em chapa de compensado. Campinas, 1997. Dissertação (mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas. 201p.
- SMITH, I. Short term load tests on whitewood embedment specimens with a single plain circular section steel connector in a hole of the same diameter. Research Report 1/82. Inglaterra: Timber Research and Development Association(TRADA). 121p. 1982.
- SMITH, I. & WHALE, L. R. J. Mechanical Timber Joints. Research Report 18/86. Inglaterra: Timber Research and Development Association(TRADA). 123p. 1986a

SMITH, I. & WHALE, L. R. J. Mechanical joints in structural timber - Information for Probabilistic Design. Research Report 17/86. Inglaterra: Timber Research and Development Association (TRADA). 140p. 1986b.

STAMATO, G. C. Resistência ao embutimento da madeira compensada. São Carlos, 1997. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 127p.

STANDARDS ASSOCIATION OF AUSTRALIA. Australian Standard: Timber Structures. Part 1: Design Methods. Austrália: SAA. 132p. 1994.

STECK, G. Wood-based panels - plywood. Timber Engineering. STEP 1. A10/1-A10/9. 1995.

VAZ, J. Silos verticais de madeira compensada. São Carlos, 1987. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 346p.

WILKINSON, T. L. & ROWLANDS, R. E. Analysis of mechanical joints in wood. Experimental mechanics. Madison. vol. 21. N. 11. 7p. 1981.

WOODARD, A. C. Nailed moment connections in plywood web box-beam portal frame. Doctor of Philosophy Thesis. Victoria, Austrália: Department of Civil Engineering. Monash University.