

# **RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO DA MADEIRA COMPENSADA**

Guilherme Corrêa Stamato

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

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. Carlito Calil Junior

São Carlos

1998

*"Quem quere passar além do Bojador  
Tem que passar além da dor.  
Deus ao mar o perigo e o abysmo deu,  
Mas nelle é que espelhou o céu."*

*Fernando Pessoa*

*àqueles  
que se dedicam  
a entregar aos seus filhos  
um mundo melhor  
que o deixado por seus pais*

## AGRADECIMENTOS

*Ao Professor Carlito Calil Junior, por sua dedicação e atenção e pela maneira com que orientou este trabalho, tornando-o mais agradável e proveitoso.*

*À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), por financiar esta pesquisa.*

*Aos meus pais, pela contribuição direta na elaboração deste texto, pela minha formação e pela construção da minha personalidade, a qual também agradeço aos meus irmãos.*

*À Fabiana, com toda minha admiração, pelo apoio, incentivo e compreensão que me deram força nos momentos críticos.*

*Aos professores, colegas e funcionários do LaMEM pela convivência, em especial aos que contribuíram diretamente para a elaboração deste trabalho.*

*A todos os amigos, de república, do pólo aquático e da graduação e pós-graduação que comigo dividiram os momentos de lazer neste período.*

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	i
<b>LISTA DE TABELAS</b>	iv
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b>	v
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	vi
<b>RESUMO</b>	viii
<b>ABSTRACT</b>	ix
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	1
<b>2. A MADEIRA COMPENSADA</b>	4
<b>2.1. INTRODUÇÃO</b>	4
<b>2.2. PRODUTOS DERIVADOS DA MADEIRA</b>	6
<b>2.3. PRODUÇÃO</b>	9
<b>2.3.1. Etapas de Produção das chapas de compensado</b>	10
<b>2.3.1.1. Preparo da tora</b>	10
<b>2.3.1.2. Obtenção das Lâminas</b>	10
<b>2.3.1.3. Secagem e Classificação das Lâminas</b>	11
<b>2.3.1.4. Junção das Lâminas e Colagem das Bordas</b>	12
<b>2.3.1.5. Aplicação de Adesivo</b>	13
<b>2.3.1.6. Prensagem do Compensado</b>	13
<b>2.4. ESPECIFICAÇÕES</b>	15

<b>2.5. PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E RIGIDEZ</b>	18
<b>2.5.1. Durabilidade</b>	25
<b>2.5.2. Densidade</b>	25
<b>2.5.3. Teor de umidade</b>	25
<b>2.5.4. Estabilidade dimensional</b>	26
<b>2.5.5. Trabalhabilidade</b>	27
<b>2.5.6. Resistência ao fogo</b>	27
<b>2.5.7. Resistência ao apodrecimento e ataques de insetos</b>	27
<b>2.5.8. Fatores que influenciam as propriedades de resistência e rigidez</b>	28
<b>2.5.9. Resistência e rigidez à flexão</b>	28
<b>2.5.10. Tração e compressão</b>	28
<b>2.5.11. Cisalhamento</b>	30
<b>2.5.12. Resistência ao fendilhamento</b>	30
<b>2.5.13. Resistência ao impacto e à cargas concentradas</b>	31
<b>2.6. UTILIZAÇÃO ESTRUTURAL</b>	31
<b>2.7. CONCLUSÕES</b>	37
<b>3. LIGAÇÕES</b>	39
<b>3.1. COMPORTAMENTO DAS LIGAÇÕES</b>	40
<b>3.1.1. Resistência das ligações</b>	41
<b>3.1.2. Modelos teóricos</b>	42
<b>3.1.2.1. Modelo de JOHANSEN(1949)</b>	42
<b>3.1.2.2. Método de MÖLLER(1951), apud ALMEIDA(1987):</b>	46
<b>3.1.2.3. Método da NBR 7190/97</b>	47
<b>3.2. GEOMETRIA DA LIGAÇÃO</b>	49
<b>3.2.1. Pré-furação</b>	49
<b>3.2.2. Espaçamentos</b>	52
<b>3.3. EMBUTIMENTO</b>	56
<b>3.3.1. Considerações sobre a distribuição das tensões</b>	57
<b>3.3.2. Cálculo da resistência ao embutimento</b>	60
<b>3.4. MODOS DE RUPTURA</b>	63

<b>3.5. MÉTODOS DE ENSAIOS</b>	65
<b>3.5.1. Método da NBR 7190/97</b>	65
<b>3.5.2. Método do prEN383/1993</b>	69
<b>3.5.3. Método de SMITH(1982)</b>	73
<b>3.5.4. Método de ALMEIDA(1987)</b>	75
<b>3.6. RESULTADOS DE ENSAIOS ENCONTRADOS NA BIBLIOGRAFIA</b>	76
<b>3.7. CRITÉRIOS DE SEGURANÇA NAS LIGAÇÕES</b>	80
<b>3.7.1. Estados Limites</b>	80
<b>3.8. CONCLUSÕES</b>	83
<b>4. METODOLOGIA</b>	85
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	93
<b>5.1. ENSAIOS PRELIMINARES</b>	93
<b>5.2. ENSAIOS DE COMPRESSÃO</b>	102
<b>5.3. ENSAIOS DE EMBUTIMENTO</b>	104
<b>5.4. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS CHAPAS DE COMPENSADO</b>	113
<b>5.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS</b>	116
<b>5.6. COMPARAÇÃO COM VALORES PREVISTOS NA BIBLIOGRAFIA</b>	118
<b>5.7. ANÁLISE NUMÉRICA POR ELEMENTOS FINITOS</b>	120
<b>6. CONCLUSÕES</b>	129
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	134

## RESUMO

A utilização da madeira compensada como componente de estruturas permanentes ainda é pouco difundida no Brasil, apesar de ser bastante utilizada em diversos países, onde tem se mostrado bastante eficiente como solução competitiva, segura e durável. O estudo do embutimento de pinos metálicos no compensado visa fornecer subsídios técnicos para o desenvolvimento desta tecnologia no país. Foram realizados ensaios de embutimento com os três diâmetros de prego e três de parafuso mais recomendados para estruturas de madeira, em oito chapas de madeira compensada, caracterizadas em ensaios especificados por normas brasileiras, avaliando a aplicação, para o compensado, do método de ensaio de embutimento em madeira maciça proposto pela NBR 7190/97, “Projeto de estruturas de madeira”, concluindo que este é aplicável quando se utiliza espessuras comerciais do compensado como espessura do corpo de prova. Foram também realizados ensaios para análise dos efeitos da pré-furação no comportamento do compensado no embutimento. Um modelo numérico foi desenvolvido, utilizando o programa ANSYS v.5.2, para simular o comportamento do compensado no embutimento, encontrando resultados satisfatórios para elementos compostos por camadas e considerando comportamento elasto-plástico do compensado. Os resultados mostraram a viabilidade técnica da utilização do compensado em estruturas de madeira.

Palavras chave: compensado, embutimento, estruturas de madeira, ligações.

## ABSTRACT

The use of plywood as a component of permanent structures is still not very diffused in Brazil, although it has been used in several countries, where it has been considered efficient as a competitive, safe and durable solution. The study of the embedment of steel dowels in plywood aims to supply parameters for the development of this technology in the country. Embedment tests were carried out with six different nail and bolt diameters recommended for timber structures, in eight types of plywood, characterized in tests specified by Brazilian norms. Such tests evaluated the application of the method of embedment tests in massive timber proposed by the Brazilian Association of Technical Norms (ABNT), NBR 7190/97, " Design of timber structures ", concluding that it was applicable when the commercial thickness of plywood was used as thickness of the specimen. Tests were realized for the analysis of the pre-hole effects on the behavior of the plywood in the embedment. A numerical model was developed, using the ANSYS v.5.2 program, to simulate the behavior of the plywood in the embedment, finding satisfactory results for composed elements for layers and considering the elasto-plastic behavior of plywood. The results showed the technical viability of the use of plywood in the construction of timber structures.

Keywords: plywood, embedment, wood structures, connections.



---

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Posicionamento das lâminas no compensado	5
FIGURA 2 – Madeira laminada colada	7
FIGURA 3 – Painéis sanduíche	8
FIGURA 4 – Obtenção das lâminas por corte rotatório	11
FIGURA 5 – Etapas de produção das chapas de compensado	15
FIGURA 6 – Variação dos parâmetros característicos das lâminas de madeira no plano LT	19
FIGURA 7 – Composição das lâminas e variação dos parâmetros elásticos dos compostos obtidos	20
FIGURA 8 – Estrutura em cúpula utilizando madeira compensada	32
FIGURA 9 – Estrutura em pórtico utilizando madeira compensada	32
FIGURA 10 – Detalhe da cumeeira da estrutura em pórtico utilizando madeira compensada	33
FIGURA 11 – Vigas compostas com madeira compensada	33
FIGURA 12 – Estrutura de residência utilizando madeira compensada	33
FIGURA 13 – Treliças utilizando madeira compensada como cobrejuntas	34
FIGURA 14 – Painéis de piso pré-fabricados utilizando madeira compensada	34
FIGURA 15 – Paredes externas utilizando madeira compensada	34
FIGURA 16 – Hangar no Campo de Marte, São Paulo - SP, construído pela TEKNO S/A	36
FIGURA 17 – Ginásio de esportes do São Carlos Clube, São Carlos - SP, construído pela TEKNO S/A	36
FIGURA 18 – Pinos em corte simples	41
FIGURA 19 – Ligação com pino rígido e uma seção de corte	43
FIGURA 20 – Ligação com pino flexível e uma seção de corte	44
FIGURA 21 – Ligação com pino rígido e duas seções de corte	45
FIGURA 22 – Espaçamentos em ligações com pinos metálicos	53
FIGURA 23 – Estado de tensões causado pela cravação do prego	58
FIGURA 24 – Corpo-de-prova para ensaio de embutimento segundo a NBR 7190/97	67
FIGURA 25 – Diagrama tensão×deformação específica de embutimento	67
FIGURA 26 – Diagrama de carregamento para ensaio de embutimento segundo a NBR7190/97	68
FIGURA 27 – Corpos de prova Segundo o prEN 383 (1993)	69

---

FIGURA 28 – Diagrama de carregamento para ensaio de embutimento segundo o prEN 383 (1993)	72
FIGURA 29 – Corpo-de-prova para ensaio de embutimento segundo a NBR 7190/97	87
FIGURA 30 – Diagrama tensão×deformação específica de embutimento	88
FIGURA 31 – Dispositivo utilizado nos ensaios de embutimento	89
FIGURA 32 – Diagrama de carregamento para ensaio de embutimento segundo a NBR 7190/97	90
FIGURA 33 – Curva obtida a partir de ensaio de compressão normal	94
FIGURA 34 – Resistência ao embutimento paralelo em relação ao diâmetro resultante dos resultados das medidas de stroke e lvdt	97
FIGURA 35 – Resistência ao embutimento normal em relação ao diâmetro resultante dos resultados das medidas de stroke e lvdt	97
FIGURA 36 – Curva carga deslocamento obtida em ensaio de embutimento	98
FIGURA 37 – Relação entre resistência ao embutimento e diâmetro de pré-furação	99
FIGURA 38 – Relação entre a rigidez da ligação e o diâmetro de pré-furação	99
FIGURA 39 – Relação entre resistência a compressão paralela e normal no compensado	103
FIGURA 40 – Relação entre os módulos de elasticidade na compressão paralela e normal no compensado	103
FIGURA 41 – Curvas de resistência ao embutimento paralelo em função do diâmetro do pino de todas as chapas ensaiadas	106
FIGURA 42 – Curvas de resistência ao embutimento normal em função do diâmetro do pino de todas as chapas ensaiadas	107
FIGURA 43 – Curvas $f_{e,0} \times d$ para cada uma das chapas ensaiadas	108
FIGURA 44 – Curvas $f_{e,90} \times d$ para cada uma das chapas ensaiadas	109
FIGURA 45 – Variação do módulo de elasticidade no embutimento paralelo em função do diâmetro do pino das várias chapas de compensado ensaiadas	110
FIGURA 46 – Variação do módulo de elasticidade no embutimento normal em função do diâmetro do pino das várias chapas de compensado ensaiadas	110
FIGURA 47 – Comparação entre a resistência ao embutimento paralelo e a resistência à compressão paralela para as várias chapas de compensado ensaiadas	111
FIGURA 48 – Comparação entre a resistência ao embutimento normal e a resistência à compressão normal para as várias chapas de compensado ensaiadas	111
FIGURA 49 – Relações entre as resistências ao embutimento nas direções normal e paralela para as várias chapas ensaiadas	112

---

FIGURA 50 – a)Malha dos elementos utilizados na análise numérica; b) embutimento causado por ação de pino rígido e; c) simplificação do embutimento por carga distribuída	122
FIGURA 51 – Distribuição das tensões segundo consideração de: a) carga distribuída; b) pino rígido	124
FIGURA 52 – Módulo de elasticidade do compensado na compressão, para várias inclinações	126
FIGURA 53 – Módulo de elasticidade do compensado no embutimento, para várias inclinações	127

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Espessura, número mínimo de lâminas e tolerância	16
TABELA 2 – Teor de umidade de equilíbrio à temperatura ambiente de 20 <sup>0</sup> C	26
TABELA 3 – Resistência à compressão e densidade	29
TABELA 4 – Módulo de elasticidade das chapas de compensado	30
TABELA 5 – Espaçamento mínimo entre pregos segundo a DIN 1052	53
TABELA 6 – Dimensões e espaçamento dos pinos nos corpos de prova segundo o prEN383	70
TABELA 7 – Descrição das chapas de compensado utilizadas nos ensaios	86
TABELA 8 – Resultado dos ensaios de compressão	94
TABELA 9 – Resultados dos ensaios de embutimento: comparação entre as resistências encontradas a partir das leituras de stroke e lvdT	95
TABELA 10 – Resultados dos ensaios de embutimento: comparação entre rigidez das leituras de stroke e lvdT	96
TABELA 11 – Resultado dos ensaios de compressão da chapa utilizada nos ensaios de pré-furação	98
TABELA 12 – Resultados dos ensaios de embutimento: análise da influência da pré-furação na resistência ao embutimento	100
TABELA 13 – Resultado dos ensaios de compressão em chapas de compensado	102
TABELA 14 – Resistência ao embutimento de chapas de compensado para vários diâmetros de pinos (kN/cm <sup>2</sup> )	105
TABELA 15 – Módulo de elasticidade no embutimento de chapas de compensado para vários diâmetros de pinos (kN/cm <sup>2</sup> )	105
TABELA 16 – Classificação visual das chapas de compensado	113
TABELA 17 – Resultados dos ensaios de caracterização	114
TABELA 18 – Resultado dos ensaios de flexão	114
TABELA 19 – Valores da resistência ao embutimento calculadas pelo EC5 em kN/cm <sup>2</sup>	118
TABELA 20 – Valores de $f_c$ em kN/cm <sup>2</sup> obtidos a partir das equações (A) e (B)	119
TABELA 21 – Resultados encontrados para modelos isotrópicos e ortótropos	122
TABELA 22 – Valores do módulo de elasticidade do compensado na compressão obtidos em ensaios, segundo as equações (2.7) e no modelo numérico	125
TABELA 23 – Módulo de elasticidade do compensado na compressão, para várias inclinações	126
TABELA 24 – Módulo de elasticidade do compensado no embutimento, para várias inclinações	127

---

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

aa – absorção de água

BSI – British Standard Institute

CEN – Comitê Europeu de Normalização

DIN – Deutsches Institut für Normung

FPI - Finnish Plywood International

HPMA – Hardwood Plywood Manufacturers Association

LVDT – Linear Variable Diferencial Transformer

LVL - Laminated Veneer Lumber

MLC - Madeira Laminada Colada

NB11 - Norma Brasileira para Cálculo e Execução de Estruturas de Madeira

plano LT – plano Longitudinal-Tangencial da madeira

Stroke – deslocamento do atuador da Máquina Universal DARTEC

% área – Porcentagem de área de fibras paralelas às fibras das lâminas de face em relação à área total de uma seção

---

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras romanas maiúsculas

A - Área

CR – coeficiente de correlação

E – módulo de elasticidade

$E_e$  – módulo de elasticidade no embutimento

$E_{comp,e}$  – Módulo de elasticidade no embutimento da madeira compensada

F – força aplicada

G – módulo de elasticidade transversal

M – momento fletor

R – resistência de um pino, raio do furo

U – umidade

V – força cortante

### Letras romanas minúsculas

d – diâmetro

f – resistência de um material

$f_e$  – resistência ao embutimento

$f_{we}$  – resistência ao embutimento da madeira maciça

$f_{comp,e}$  – resistência ao embutimento da madeira compensada

$f_{e,0}$  – resistência ao embutimento na direção paralela às fibras

$f_{e,90}$  – resistência ao embutimento na direção normal às fibras

$f_y$  – tensão de escoamento

k – coeficiente em geral

n – número de elementos

q – carga distribuída

r – raio do pino

t – espessura do compensado

$t_1$  – soma das espessuras das lâminas com fibras paralelas a x;

$t_2$  – soma das espessuras das lâminas com fibras paralelas a y;

x – coordenada

y – coordenada

## Letras gregas

$\beta$  - coeficiente

$\gamma$  - deformação tangencial específica, coeficiente de segurança

$\varepsilon$  - deformação normal específica

$\theta$  - rotação, ângulo

$\nu$  - coeficiente de Poisson

$\pi$  - constante = 3,14159

$\rho$  - massa específica

$\sigma$  - tensão normal

$\tau$  - tensão tangencial

## Índices

e – embutimento

c – compressão

t – tração

w – madeira

d – valor de cálculo

y – escoamento

s – aço

---

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem-se observado a redescoberta do valor estrutural da madeira por engenheiros e arquitetos de todo o mundo, que têm encontrado neste material características físicas e mecânicas apropriadas à construção de pequenas a grandes estruturas, com grande durabilidade e resultando em ótimos efeitos estéticos.

A diminuição da utilização da madeira neste século pode ser atribuída à escassez de peças de madeira maciças com dimensões adequadas à utilização em grandes estruturas. Escassez esta devido ao esgotamento das florestas nativas que supriam o mercado destas peças, ocorrido pela exploração sem planejamento de reflorestamento das reservas naturais. Aliado a este fato, o grande desenvolvimento de outros materiais, como concreto e aço, ofereceram outras alternativas à utilização da madeira como material estrutural.

Neste período, surgiram, ou foram aperfeiçoados, diversos produtos derivados da madeira e novas composições com este material, que conseguiram compensar a falta de peças de madeira maciça de grandes dimensões. Entre estes produtos estão: madeira laminada pregada, madeira laminada colada, madeira compensada e, mais recentemente, os microlaminados (ou Laminated Veneer Lumber) e a madeira protendida.

Com as soluções encontradas por estes produtos e com o desenvolvimento das técnicas construtivas e de projeto utilizando estes novos materiais, a madeira voltou a ser um material estrutural viável, despertando o interesse dos profissionais da área na sua utilização. Fato este já bastante sensível em diversos países do mundo, e que começa a ocorrer em nosso país.

Dentre os produtos derivados da madeira citados, o elemento de interesse deste trabalho é o compensado, que tem sua utilização difundida, e solidamente estabelecida, em muitos países desenvolvidos, como Alemanha, Austrália, Estados Unidos e outros.



---

Estruturalmente, o compensado pode ser utilizado em composição com a madeira maciça, formando elementos de seção I ou caixão; como cobrejunta de ligação em treliças; em painéis de parede, trabalhando como chapa; em painéis de piso, trabalhando como placa; entre outros.

Estas estruturas ainda são pouco difundidas no Brasil, onde o domínio desta tecnologia ainda é restrito tanto nos projetos quanto na execução, sendo necessária a realização de amplas pesquisas para um melhor conhecimento do comportamento dos produtos nacionais, bem como a adaptação destas tecnologias à nossa realidade.

Um tema que ainda não foi explorado pelos pesquisadores nacionais diz respeito às ligações em madeira compensada, que podem ser utilizadas tanto na montagem de elementos compostos (madeira maciça/compensado ou compensado/compensado), quanto nas ligações entre elementos da estrutura. Esta ligação pode ser química (por meio de adesivo) ou mecânica (por pinos metálicos, cavilhas, etc.).

As ligações mecânicas por pinos metálicos (pregos e parafusos) em madeira compensada dependem, assim como na madeira maciça, da combinação entre a flexão do pino e o embutimento deste na madeira (maciça ou compensada). A determinação da contribuição de cada um destes fatores é complexa, sendo necessária, para seu entendimento, a separação destes dois fenômenos, buscando-se entender o processo de flexão do pino e o de embutimento na madeira independentemente.

A norma brasileira NBR 7190/97, da ABNT, propõe, em seu anexo B, uma metodologia para o ensaio de embutimento de pinos metálicos em madeira maciça, especificando dimensões dos corpos de prova, os procedimentos de ensaio, os equipamentos e a análise dos resultados.

Outros métodos de ensaio foram encontrados na bibliografia internacional, propostos por códigos normativos ou por pesquisadores, contendo especificações direcionadas à determinação da resistência ao embutimento da madeira compensada, com algumas diferenças em relação ao proposto pela norma brasileira no que se refere às dimensões dos corpos de prova, à análise dos resultados e aos procedimentos.

O objetivo deste trabalho é a determinação da resistência ao embutimento de pinos metálicos da madeira compensada, utilizando o método de ensaio para madeira maciça especificado pela NBR 7190/97, propondo as alterações necessárias para que este método seja aplicável também à madeira compensada.

Neste trabalho foi analisada a distribuição de tensões no corpo de prova de embutimento em madeira compensada por meio de análise computacional, utilizando o programa ANSYS 5.2, visando encontrar o modelo numérico que melhor se aproxima do comportamento do material observado nos ensaios.

As chapas de compensado utilizadas nos ensaios de embutimento foram caracterizadas segundo recomendações da ABNT específicas para este material, além de ensaiadas à compressão. Tais parâmetros foram confrontados com os valores de resistência ao embutimento obtidos nos ensaios, a fim de avaliar quais características da chapa de compensado são mais relevantes no comportamento deste material quando submetido ao embutimento de pinos metálicos.

---

## 2. A MADEIRA COMPENSADA

### 2.1. INTRODUÇÃO

---

Apesar de possuímos, em nosso país, a maior floresta úmida do mundo, ou seja, 280 milhões de hectares na Amazônia, existem muitas incertezas quanto ao aproveitamento deste recurso como fonte segura de suprimento para a nossa indústria madeireira. As dificuldades no aproveitamento da floresta amazônica para a produção de madeira se baseiam em fatores tais como: acessibilidade difícil a médio prazo, grande número de espécies por hectare ou grande heterogeneidade arbórea, falta de conhecimento das características tecnológicas da grande maioria das espécies e ausência de planos de exploração auto sustentáveis que garantam o aproveitamento do recurso sem a sua destruição.

Por outro lado, a partir da década de 60, com a criação de incentivos fiscais, houve uma acentuada ampliação da área plantada no país, possibilitando a formação de grandes florestas artificiais, sobretudo com espécies do gênero **Eucalyptus**, seguida em menores quantidades de outras do gênero **Pinus**.

A forma de aproveitamento das madeiras, tanto provenientes das florestas nativas como daquelas aqui aclimatadas, têm como alternativas para a utilização como madeira maciça a produção de painéis à base de madeira, que são a sua reconstituição, quer em forma de lâminas, resíduos, cavacos ou fibras, unidas por adesivos, dando origem a um produto final com características, na maioria das vezes, diferentes daquelas do material de origem, como é o caso da madeira compensada.

Segundo STECK(1995), a madeira, em finas lâminas, já vem sendo utilizada desde os tempos ancestrais, pelos egípcios e romanos, como superfícies de acabamentos de madeira maciça. Porém, é a partir do começo do século vinte que o compensado começou a ser industrialmente produzido. Esta produção se iniciou, de acordo com VAZ(1987), nos Estados Unidos e na Alemanha, a partir de algumas espécies de madeira de baixa densidade e poucas formas de arranjos das lâminas. Atualmente são utilizadas a maioria das espécies de madeira comercialmente importantes e uma grande variedade de tipos de composição, sendo o compensado produzido nos principais países do mundo.

Com a utilização da madeira compensada na indústria de aviões surgiram pesquisas intensivas sobre a colagem das lâminas e as propriedades estruturais do compensado. Inicialmente eram utilizados apenas adesivos naturais na união das lâminas, atualmente o compensado estrutural é produzido utilizando adesivos sintéticos, onde o principal é o fenol-formaldeído. (STECK, 1995)

Compreende-se por compensado a sobreposição de lâminas finas de madeira unidas por adesivo a prova d'água ou resistente à água, prensado de forma que duas lâminas contíguas são coladas ortogonalmente, como ilustra a figura 1. Isto é chamado de laminação cruzada, que representa o ingrediente que fez do compensado um produto superior e versátil na engenharia. A laminação cruzada confere altas resistências tanto ao longo como através das grãs, o que o torna mais resistente ao cisalhamento, fendilhamento e ao impacto.

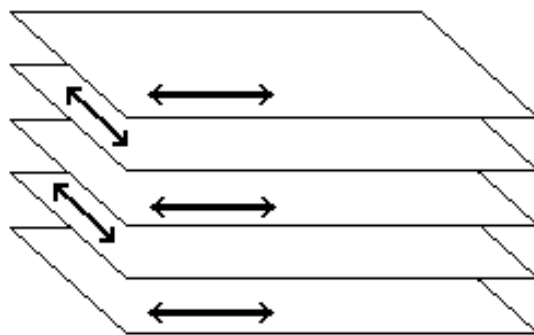


FIGURA 1 - Posicionamento das lâminas no compensado - fonte: KEINERT

De maneira geral, pode-se dizer que o compensado possui duas características peculiares: as lâminas de madeira são ligadas umas às outras por adesivos sintéticos, tal como ocorre na madeira laminada; e a orientação do eixo de simetria destas lâminas é ajustada transversalmente, contrastando com a madeira laminada, de acordo com uma disposição pré-determinada, buscando obter uma equivalência das propriedades elásticas e de resistência nas direções principais da chapa. (VAZ, 1987)

Quanto a madeira, esses painéis se fundamentam hoje em dia na utilização de florestas plantadas, de rápido crescimento, pequenos diâmetros e propriedades indesejáveis para a utilização na forma de madeira sólida serrada. Portanto, esses painéis, que em algumas regiões do mundo já têm lugar de destaque em construções em geral, deverão ser uma peça chave para processos de pré-fabricação, que poderão servir de solução para problemas crônicos do nosso país, como a falta de moradias populares, escolas e postos de saúde, a custos bem mais compatíveis do que os praticados pelos sistemas construtivos vigentes, pois a abundância de umidade, associada a altos índices solarimétricos e grandes extensões de terra, possibilita uma das maiores produtividades de floresta de rápido crescimento do mundo, visto que as espécies aqui aclimatadas puderam ter melhores desenvolvimento do que na sua própria região de origem.(OLIVEIRA & FREITAS, 1995)

## **2.2. PRODUTOS DERIVADOS DA MADEIRA**

---

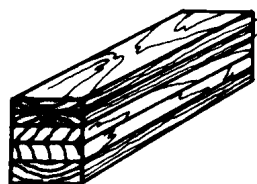
Segundo VAZ(1987), o consumo cada vez maior de materiais de construção e as crescentes dificuldades para obtenção de madeira maciça, com dimensões e qualidade adequadas às diversas necessidades, juntamente com a grande explosão da tecnologia de fabricação ocorrida pouco antes da metade deste século, conduziram ao desenvolvimento da indústria de produtos derivados da madeira.

VAZ afirma ainda que, dentre estes produtos, os compostos laminados constituem uma considerável porção dos derivados de madeira usados atualmente. São obtidos pela associação de lâminas de madeira, em sua forma original ou modificada, coladas com adesivos ou ligadas mecanicamente por elementos discretos, formando compostos paralelos ou transversais. Ainda segundo VAZ, a madeira compensada, ou simplesmente compensado, é o composto laminado transversal mais utilizado em aplicações estruturais.

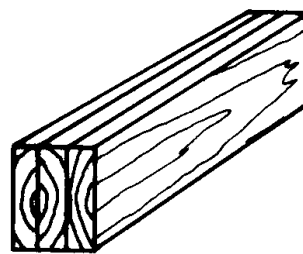
Um dos fatores que levou ao desenvolvimento de produtos à base de lâminas de madeira é a diminuição da resistência de uma peça da madeira maciça pelo enfraquecimento da seção devido à ocorrência de defeitos, tais como nó e medula, que reduzem significativamente as características de resistência e elasticidade da peça se comparada com a madeira sã. Grandes defeitos podem ser evitados quando as toras são cortadas em lâminas finas e depois coladas umas sobre as outras, reconstituindo o material.

Outra vantagem do compensado, é que pode ser produzido em chapas de grandes dimensões, a partir de toras de pequena seção, possibilitando a construção de grandes estruturas a partir de árvores de pequena idade.

A madeira laminada colada (MLC), composta por lâminas de espessura entre 1,5 e 3,0cm, podendo excepcionalmente chegar a 5cm, é um exemplo típico de laminação paralela. Os eixos longitudinais das lâminas coincidem com a direção de suas fibras e são paralelos ao eixo longitudinal da peça de laminado colado, figura 2-a-b.



(a) Madeira laminada colada horizontalmente



(b) Madeira laminada colada verticalmente

FIGURA 2 - Madeira laminada colada - fonte: VAZ(1987)

Uma maior distribuição dos defeitos, de acordo com RANTA-MAUNUS(1995), ainda pode ser conseguida se cortadas lâminas mais finas, como é o caso do Laminated Veneer Lumber (LVL), chamado de microlaminado por VAZ(1987), que é um produto semelhante ao compensado, exceto que as lâminas são coladas paralelas, sendo possível produzi-lo em grandes dimensões. Neste produto, o custo adicional de adesivo necessário devido ao grande número de linhas de cola é compensado pelo acréscimo de resistência e rigidez.

Outros produtos laminados existentes são os painéis sanduíches, compostos por lâminas de face de alta resistência e rigidez e por um núcleo de características inferiores, figura 3-a-b. (VAZ, 1987)

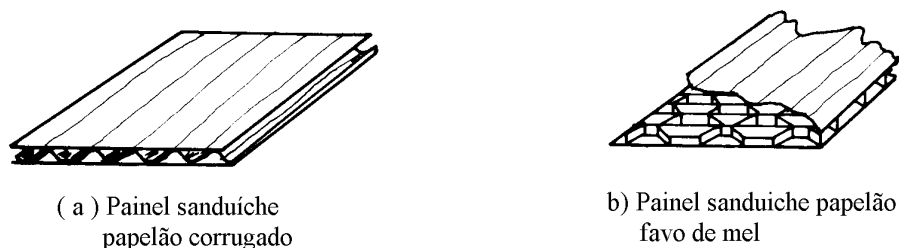


FIGURA 3 - Painéis sanduíche - fonte: VAZ(1987)

A vantagem da utilização de produtos derivados da madeira é a possibilidade de se trabalhar com elementos de grandes dimensões e que podem alcançar altos valores de resistência característica se comparados à resistência da madeira sã utilizada. (RANTA-MAUNUS, 1995)

Estes produtos têm grande utilização estrutural nos países com tradição no uso da madeira, porém o LVL ainda não é produzido no Brasil, e a MLC ainda é pouco utilizada, tendo um parque industrial extremamente restrito, restando ao compensado um grande campo de atuação, por ser um produto facilmente encontrado em grande parte do país, e produzido, por algumas empresas, com qualidade compatível com os padrões internacionais.

---

### 2.3. PRODUÇÃO

---

Compensados estruturais são produzidos, principalmente, com lâminas de madeiras leves, mas espécies de madeira dura também podem ser utilizadas. De qualquer maneira, uma chapa de compensado não precisa ser produzida toda com lâminas da mesma espécie de madeira, podendo ser utilizadas lâminas de menor resistência e rigidez nas camadas internas. A resistência e a rigidez do painel, segundo OLIN(1990), não são significativamente alteradas se as faces exteriores do painel de compensado forem produzidas com chapas mais rígidas e resistentes.

Apesar desta observação, a utilização de lâminas de diferentes espécies em uma mesma chapa deve ser evitada, pois a qualidade deste compensado pode ser alterada se não for seguido rigoroso critério de compensação das características das lâminas na composição da chapa, a fim de evitar o surgimento de tensões internas devido aos diferenciais de deformação causados pela aplicação de cargas ou variação de temperatura ou umidade.

A designação de uso final do compensado é função da espécie e da qualidade das lâminas do arranjo, bem como do tipo de adesivo usado na fabricação da chapa. Na fabricação de compensados basicamente têm sido utilizados adesivos à base de uréia, formol e fenol-formol.

Segundo KEINERT(1997), resinas fenólicas são produzidas sinteticamente a partir do fenol e do formaldeído. Estas se solidificam ou curam sob calor, portanto necessariamente devem ser prensadas a quente. Durante o processo de cura as resinas fenólicas sofrem mudanças químicas definitivas que as tornam completamente à prova d'água e resistentes ao ataque por microorganismos; portanto, são utilizadas para exposição a agentes externos.

Resinas uréicas, produzidas sinteticamente a partir da uréia e do formaldeído, também se solidificam sob calor, não tendo as mesmas características de resistência apresentadas pelas resinas fenólicas, com exposição limitada a usos interiores.



Desde a retirada da tora até a chapa final, a produção da madeira compensada passa por vários processos. A seqüência das etapas, bem como sua descrição foi encontrada em vários trabalhos, dentre estes, o mais completo está no texto de OLIVEIRA & FREITAS(1995), que foi a base para a descrição do processo apresentada a seguir:

### **2.3.1. Etapas de Produção das chapas de compensado**

#### **2.3.1.1. Preparo da tora**

Antes de serem desenroladas, ou transformadas em lâminas pelo torno laminador, as toras devem ser descascadas e acondicionadas em tanques contendo vapor ou água quente para que as mesmas se tornem amolecidas e de maior plasticidade, o que propicia a obtenção de lâminas menos quebradiças e mais lisas.

Para a produção de compensados normalmente são utilizadas as madeiras leves, de densidade baixa a média devido à sua relativa abundância, baixo custo e melhor trabalhabilidade. As madeiras de alta e média densidade, as chamadas madeiras nobres, são empregadas principalmente para a folheação ou para a produção de compensados especiais. Hoje em dia, algumas das espécies mais utilizadas para a indústria do compensado são pinus, virola, pessegueiro, cedro, morcegueira, muiratinga, hévea, copaíba, mogno, ipê e pau-ferro.

#### **2.3.1.2. Obtenção das Lâminas**

A produção das lâminas da madeira pode ser obtida por faqueamento, serradas ou corte em torno rotativo, sendo este último o método mais utilizado pela indústria. Esse torno é equipado com garras acopladas em semi-eixos, que fazem girar a tora contra a faca que avança automaticamente. A lâmina emerge entre a faca e a contra-faca (ou barra de pressão), sendo a função desta contra-faca a de exercer pressão sobre a madeira para prevenir a formação de fendas ou arrancamento de fibras nas lâminas produzidas. A figura 4 ilustra de forma esquemática um torno laminador com uma tora sendo desenrolada e as suas respectivas partes.

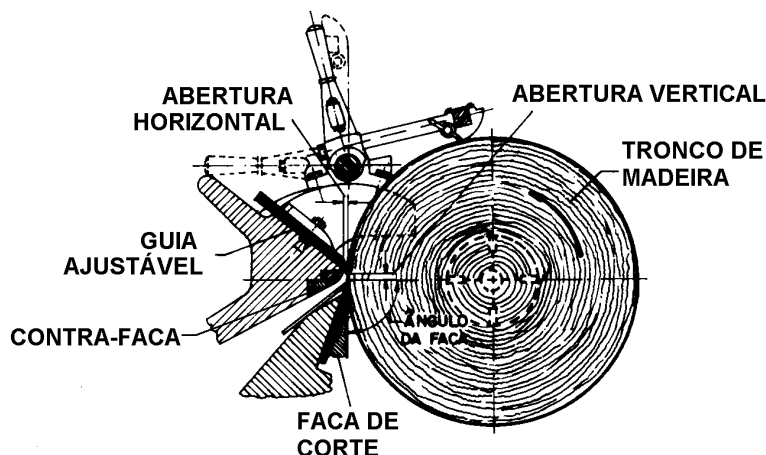


FIGURA 4 - Obtenção das lâminas por corte rotatório - fonte - VAZ(1987)

As lâminas possuem uma face firme, que é pressionada pela contra faca, e outra, que está em contato com a navalha, e que normalmente possui defeitos, tais como fissuras, que são dependentes da pressão exercida pela contra-faca sobre a mesma. Este processo se parece com um desenrolar da tora, produzindo uma faixa de madeira com espessura que varia de acordo com o tipo e classe de compensado que se quer produzir.

Após serem produzidas no torno, as lâminas são transportadas por esteiras a uma bancada com uma guilhotina, onde as lâminas verdes são cortadas em dimensões pré-estabelecidas e são retirados os defeitos. Antes de serem secas, deve-se também separar as lâminas do cerne das lâminas do alburno, uma vez que estas últimas apresentam teores de umidade substancialmente mais elevados que as primeiras.

### 2.3.1.3. Secagem e Classificação das Lâminas

A secagem das lâminas se faz com o objetivo de reduzir o seu teor de umidade a um teor predeterminado e produzir um material plano e flexível. A maioria dos secadores utilizados para essa finalidade são equipados com séries de rolos que transportam as lâminas através dos mesmos. A energia para a secagem normalmente é fornecida por vapor, e tais secadores podem atingir temperaturas bastante elevadas. A secagem é feita em um tempo muito reduzido (alguns minutos), e o teor de umidade final também é baixo, ou seja, por volta de 4 a 6% de teor de umidade.

Para se obter uma secagem uniforme e sem o aparecimento de defeitos, é necessária uma perfeita operação desses secadores, com secagem a uma temperatura inicial mais baixa e maior quantidade de umidade, seguido de um aumento de temperatura e conseqüente diminuição da umidade relativa no secador, à medida que o processo tende ao final. Em secadores modernos, todas estas operações de secagem de lâminas podem ser feitas automaticamente, mediante programação do sistema, levando em consideração diversos fatores, tais como espécie de madeira utilizada, espessura das lâminas, entre outros.

As lâminas secas devem ser empilhadas de acordo com a largura e a classe. Devem ser classificadas visualmente por pessoas treinadas, levando em consideração o tipo e tamanho dos defeitos, bem como o número e as características da grã das várias lâminas. As técnicas de empilhamento das lâminas também são importantes, a fim de evitar danos principalmente nas bordas das mesmas.

As lâminas que não forem utilizadas imediatamente após a secagem, devem ser acondicionadas em ambientes com umidade relativa e temperaturas controladas, a fim de manterem o teor de equilíbrio higroscópico, compatível com a necessidade do processo de produção das chapas.

#### **2.3.1.4. Junção das Lâminas e Colagem das Bordas**

Na confecção de grandes painéis de compensado, devem ser feitas as junções das lâminas mais estreitas, que devem formar, de preferência, as camadas mais internas do compensado. Esta união é feita de diversas maneiras, através de costuras com máquinas semelhantes àquelas utilizadas em confecções, através de grampeamento, ou ainda mesmo com adesivos. É importante ser feita, ainda nesta etapa, a eliminação de defeitos, tais como nós, esmoado, furos, entre outros, que podem ser cobertos com pedaços sadios do mesmo material.

### **2.3.1.5. Aplicação de Adesivo**

Originalmente, os adesivos eram aplicados através de pincéis, principalmente em pequenas fábricas, entretanto, nas operações de larga escala, a forma de aplicação predominante é através de rolos espalhadores. Atualmente utiliza-se um conjunto de rolos, todos revestidos de borracha, que têm a função básica de espalhar os adesivos, além de dosar a espessura desejada da camada de adesivo nas lâminas.

Outro método utilizado para espalhar o adesivo nas lâminas é através de cortina, que consiste em uma máquina com reservatório, que, com abertura controlada da saída do adesivo, possibilita a formação de um filme sobre a superfície da lâmina.

Para a aplicação do adesivo, fatores tais como ph, viscosidade, quantidade de cargas e componentes dos adesivos devem ser previamente analisados, a fim de se obter combinações ótimas de tais fatores que possibilitem uma união perfeita.

### **2.3.1.6. Prensagem do Compensado**

Imediatamente após o adesivo ser aplicado nas lâminas, deve-se proceder a montagem do compensado, seguido do carregamento da prensa. No caso da prensagem a frio, após serem empilhados em uma prensa de abertura única e aplicada a pressão adequada, a carga de chapas deve ser presa por grampos bem apertados a fim de manter a pressão original. Após o posicionamento dos grampos, a carga deve ser retirada da prensa e levada para local adequado, à temperatura ambiente.

Neste caso, a pressão pode variar de 6 a 10kg/cm<sup>2</sup>, e o tempo de prensagem será calculado com base no tempo de gelatinização do adesivo no copo vezes quatro. Normalmente esse tempo varia de 3 a 12 horas. É sempre recomendável dar uma pequena pressão inicial por aproximadamente 15 minutos antes da aplicação total da pressão. O tempo de prensagem pode ser reduzido tanto pela adição de catalisadores nos adesivos, quanto pelo aumento da temperatura ambiente acima de 20°C.

Adesivos termofixos, como aqueles à base de uréia e fenol formaldeído, curam-se mais rapidamente com aplicação de calor associado a prensagem. Tais prensas são constituídas de um determinado número de pratos aquecidos, entre os quais é posicionada uma determinada quantidade de chapas devidamente montadas.

No caso da utilização de uma prensa aquecida, o seu carregamento deve ser o mais rápido possível, a fim de evitar a secagem do adesivo antes da prensagem. O tempo de prensagem dependerá essencialmente da temperatura da prensa e do tipo de adesivo utilizado. A espessura do compensado também influencia o tempo final de prensagem.

Para temperaturas de prensagem variando de 100 a 160<sup>0</sup>C, o tempo de prensagem poderá se limitar a apenas alguns minutos. Quanto à pressão de colagem, no processo a quente, esta pode variar de 12 a 20kg/cm<sup>2</sup>, também dependendo da espécie de madeira entre outros fatores. KOLLMANN (1975) apud OLIVEIRA & FREITAS(1995), enfatiza três regras básicas a serem observadas nos processos de colagem a quente:

- 1 - Quanto mais rápido o tempo de cura do adesivo, maior é a precisão requerida do processo;
- 2 - O calor aplicado e o tempo de aquecimento devem atingir um mínimo necessário ao aquecimento ou pressão;
- 3 - Nunca tentar acelerar a velocidade de produção através da utilização excessiva de aquecimento ou pressão.

KOLLMANN (1975) apud OLIVEIRA & FREITAS(1995) enfatiza que o aquecimento prolongado irá reduzir a qualidade do compensado. A plasticidade de madeira aumenta rapidamente acima do ponto de ebulição da água, causando compressão indesejável nas chapas.

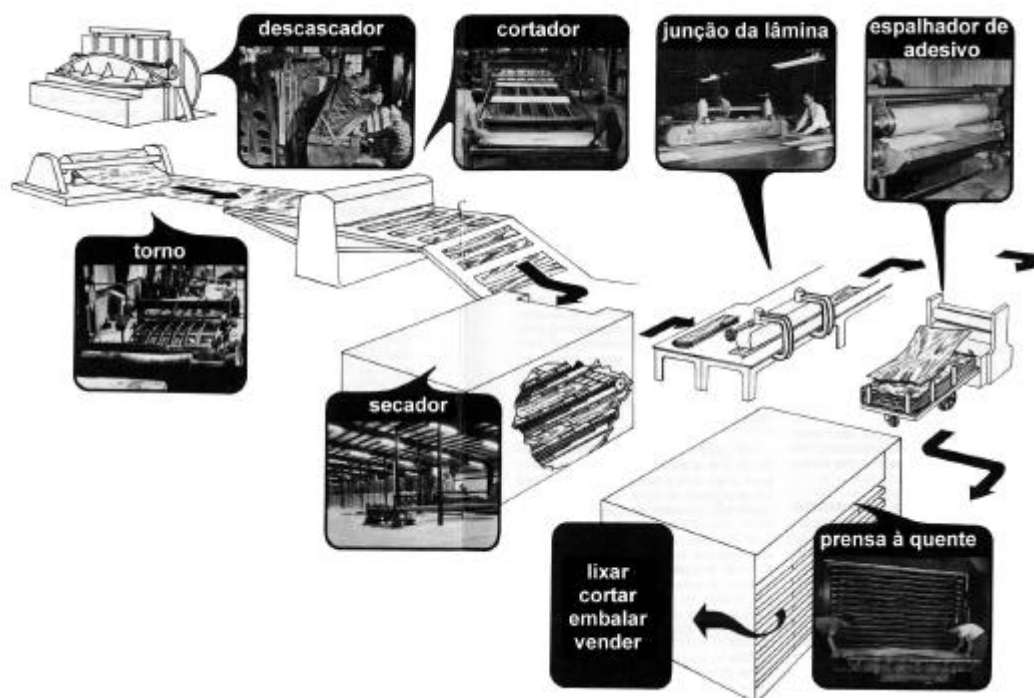


FIGURA 5 - Etapas de produção das chapas de compensado - fonte - HPMA

## 2.4. ESPECIFICAÇÕES

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:

A NBR 9531, “Chapas de madeira compensada – Classificação” classifica as chapas quanto ao local de utilização, considerando três tipos básicos:

IR – interior: Chapa colada com cola do tipo interior, destinada a utilização em locais protegidos da ação de água ou de alta umidade relativa. O mínimo de falha na madeira deve ser de 60%, quando submetida ao ensaio de cisalhamento da cola (NBR 9534/86) em chapas secas.

IM – Intermediária: Chapa colada com cola do tipo intermediária, destinada a utilização interna, mas em ambiente de alta umidade relativa, podendo eventualmente receber a ação de água. O

mínimo de falha na madeira deve ser de 60% quando submetida ao ensaio de cisalhamento da cola (NBR 9534/86) em chapas saturadas em água fria.

EX – Exterior: Chapa colada com cola à prova d’água, destinada ao uso exterior ou em ambientes fechados, onde é submetida a repetidos ciclos de umedecimentos e secagens ou ação d’água. O mínimo de falha na madeira deve ser de 80% quando submetido ao ensaio de cisalhamento da cola (NBR 9534/86) em chapas saturadas em água quente.

A NBR 9532/86, “Chapas de madeira compensada – Especificações” especifica as características geométricas e suas tolerâncias, e outras condições que devem ser seguidas por cada tipo de chapa. Segundo essa norma, todas as chapas, independentemente do tipo, exceto quando mencionado, deverão apresentar as seguintes características:

Montagem - Número de lâminas ímpar, lâmina de face e contraface paralela ao comprimento da chapa, não sendo admitido duas lâminas coladas entre si com a mesma orientação de grã.

Dimensões - As chapas devem ter dimensões de 2440mm por 1220mm, permitindo-se variações não superiores a  $\pm 2$ mm em qualquer direção. Outras dimensões são consideradas especiais. As dimensões devem ser tomadas no meio da largura e comprimento da chapa.

Forma - Todas as chapas devem ser retangulares, formando quatro ângulos retos, permitindo-se um desvio de no máximo 10”.

Espessuras - As chapas podem ter as espessuras de 4, 6, 9, 12, 15, 18 e 21mm. As tolerâncias aceitas para cada uma das espessuras deve ser determinada a, no mínimo, 50mm da borda da chapa, em um ponto tomado ao acaso.

TABELA 1 - Espessura, número mínimo de lâminas e tolerância - fonte: NBR 9532/85

Espessura (mm)	N. Mínimo de Lâminas	Tolerância (mm)
4		$\pm 0,5$
6	3	$\pm 0,6$
9	3	$\pm 0,7$
12	5	$\pm 0,8$
15	5	$\pm 1,0$
18	7	$\pm 1,0$
21	7	$\pm 1,0$
	9	

Essa norma também especifica as condições que devem ser seguidas por cada tipo de compensado, como segue:

**Compensado de uso geral - GER:**

Chapas de madeira compensadas classificadas genericamente como IR, de acordo com a NBR9531/85, cuja montagem admite pequenos cavalos (miolos sobrepostos) desde que não afetem a qualidade da superfície ou a resistência da chapa.

**Forma de concreto - FOR:**

Chapas de madeira compensada classificadas genericamente como EX, de acordo com a NBR9531/85, cuja montagem admite pequenos cavalos (miolo sobreposto) desde que não afetem a qualidade de superfície ou resistência da chapa. Esse tipo de chapa deve apresentar um módulo de elasticidade mínimo de  $4000 \text{ N/mm}^2$  de acordo com a NBR 9533, Compensado - Determinação da resistência à flexão estática.

**Decorativo:**

São chapas de madeira compensada, classificadas genericamente como IM, de acordo com a NBR9531/85, cuja montagem admite pequenos cavalos (miolo sobreposto) desde que não afetem a qualidade da superfície. São permitidas emendas desde que tenham grã e cor combinadas.

**Industrial - IND:**

São chapas de compensado classificadas genericamente como EX, de acordo com a NBR9531/85, cuja montagem admite pequenos cavalos, desde que não afetem a resistência da chapa.



**Naval - NAV:**

São chapas de madeira compensada, classificadas genericamente como EX, de acordo com a NBR 9531/85, cuja montagem considera todas as lâminas perfeitamente juntas na capa, contracapa e miolo. As laterais devem ser totalmente fechadas, admitindo-se o uso de resina epóxi ou similar à prova d'água para fechamento de miolo oco não superior à 5mm. Este tipo de chapa deve apresentar um módulo de elasticidade mínimo de  $6000\text{N/mm}^2$ , determinado de acordo com a NBR9533/86.

**Sarrafeado - SAR:**

São chapas de madeira compensada, classificadas genericamente como IR, de acordo com a NBR 9531/85, cujo miolo é constituídas por sarrafos com largura máxima de 40mm, colados lateralmente ou não, podendo ser constituído por três camadas (duas de lâminas e uma de sarrafo) ou um maior número de camadas. Os sarrafos do miolo devem ser uniformes, de modo a não afetarem a qualidade da superfície, permitindo-se miolo oco de até 50mm, com no máximo 20mm em cada lateral.

---

**2.5. PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E RIGIDEZ**

---

De acordo com OLIN(1990), com o posicionamento alternado de lâminas formando ângulo reto em relação às fibras, o compensado utiliza a resistência e a estabilidade dimensional natural da madeira na direção das fibras, proporcionando ao material maior resistência ao fendilhamento, melhor estabilidade dimensional, resistência ao empenamento e outras propriedades como discutido a seguir.

As propriedades de resistência e rigidez do painel de compensado são dependentes do lay-out, da direção das lâminas, das propriedades das espécies de madeira e do adesivo que compõem o compensado.

Segundo BODIG e JAYNE (1982), o volume de adesivo utilizado no compensado é quase sempre inferior a 1% do volume total do composto, assim, para finalidades práticas, a contribuição de sua rigidez nas propriedades da chapa é mínima. Entretanto, deve ser enfatizada a importância da qualidade da linha de cola e de sua durabilidade, a fim de garantir a união entre as lâminas, fundamental para a manutenção das características de resistência e elasticidade da chapa.

O compensado padrão, isto é, de número ímpar de lâminas, balanceado, com lâminas alternadas paralelas e adjacentes perpendiculares, pode ser considerado, para análise estrutural, como um material plano ortotrópico, ou seja, com simetria elástica, em relação a dois planos perpendiculares, sendo, como todo material ortotrópico, caracterizado por propriedades direcionais. (VAZ, 1987)

Como consequência do corte rotatório das toras, o plano das lâminas coincide com o plano longitudinal-tangencial (LT) da madeira. A variação dos parâmetros elásticos e de resistência de uma lâmina de madeira neste plano LT, segundo BODIG e JAYNE(1982), pode ser representada, para o caso do módulo de elasticidade, por um gráfico de coordenadas polares, conforme ilustrado na figura 6. Observa-se o módulo de elasticidade atingindo valor máximo na direção longitudinal e mínimo na direção tangencial.

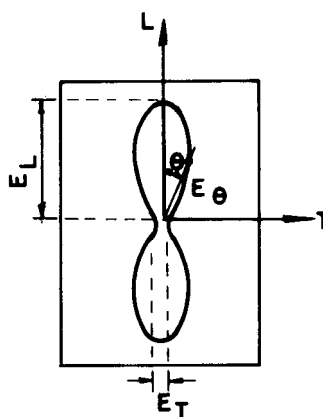


FIGURA 6 - Variação dos parâmetros característicos das lâminas de madeira no plano LT. -  
fonte - BODIG e JAYNE(1982)

A eficiência desta composição transversal pode ser visualizada pela análise dos parâmetros característicos da chapa, em função dos parâmetros das lâminas. A figura 7-a expõe, em linha cheia, a variação do módulo de elasticidade médio da composição de duas lâminas de madeira de mesma espécie e espessura, baseada na variação do módulo de elasticidade destas lâminas, apresentada na figura 6. Observa-se que os valores mínimos de  $E$  ocorrem nas direções de  $45^\circ$  com os eixos longitudinal e transversal.

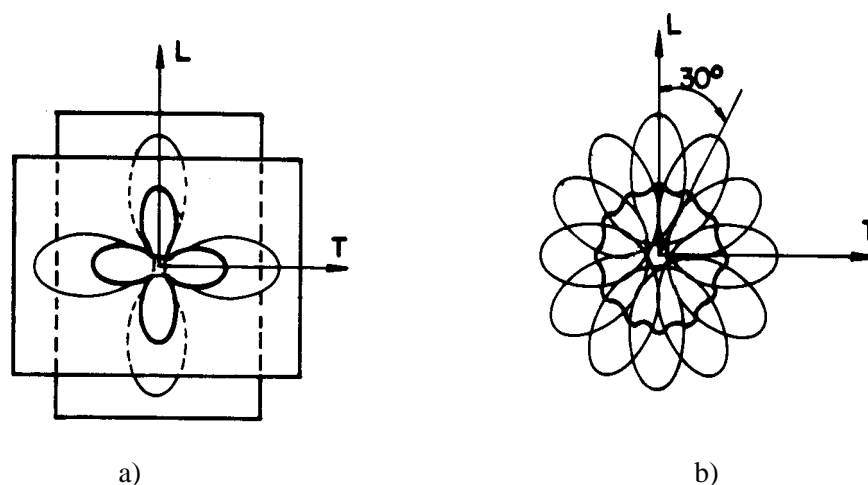


FIGURA 7 - Composição das lâminas e variação dos parâmetros elásticos dos compostos obtidos - fonte - BODIG e JAYNE(1982)

Na figura 7-b é apresentado, também em linha cheia, o diagrama para uma composição de lâminas, onde a direção das fibras nas lâminas é desalinhada de um ângulo de  $30^\circ$ . Neste caso, consegue-se um valor de  $E$  quase constante, aproximando-se assim a isotropia plana do material. (BODIG e JAYNE,1982)

A análise das propriedades elásticas do compensado é baseada no conhecimento dos parâmetros elásticos de cada lâmina isoladamente. As lâminas são consideradas homogêneas, isto é, os seus parâmetros elásticos são constantes, ao longo e através da espessura da lâmina.

Considerando-se o caso mais comum de compensado balanceado, com fibras adjacentes formando ângulos de  $90^\circ$  entre si, as direções principais ( $x$  e  $y$ ), podem ser definidas como: a direção  $x$  é paralela à direção das fibras da lâmina de face; a direção  $y$  é perpendicular à direção das fibras da lâmina de face e; a direção  $z$  é perpendicular ao plano  $xy$  (plano do painel).

A utilização do compensado em soluções estruturais práticas implica freqüentemente a utilização da lei de Hooke no estado plano de tensões, que, para materiais ortótropos, pode ser expressa como:  $\{\varepsilon\} = [S] \{\sigma\}$ .(RIBEIRO,1986)

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\text{sendo } S_{11} = \frac{1}{E_x}, \quad S_{22} = \frac{1}{E_y}, \quad S_{66} = \frac{1}{G_{xy}}, \quad S_{12} = S_{21} = -\frac{\nu_{xy}}{E_x} = -\frac{\nu_{yx}}{E_y}$$

A equação (2.1) é bastante utilizada, pois em diversos problemas nos quais se utiliza o compensado, as componentes de tensão  $\sigma_z$ ,  $\tau_{xz}$  e  $\tau_{yz}$  são nulas ou podem ser desprezadas, e a componente de deformação  $\varepsilon_z$  é pouco importante, refletindo apenas a variação da espessura do painel.

Explicitando-se o vetor das tensões através da inversão da matriz S, tem-se:  $\{\sigma\} = [C] \{\varepsilon\}$ , ou:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{21} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.2)$$

sendo:

$$C_{11} = \frac{E_x E_y}{E_y - E_x (\nu_{yx})^2}$$

$$C_{22} = \frac{E_x E_y}{E_x - E_y (v_{yx})^2}$$

$$C_{12} = C_{21} = \frac{v_{yx} E_x E_y}{E_y - E_x (v_{yx})^2}$$

$$C_{66} = G_{xy}$$

Assim:

$$[C] = [S]^{-1} \quad (2.3)$$

Como podemos observar, é importante o conhecimento dos parâmetros elásticos do compensado  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $G_{xy}$ ,  $v_{xy}$  e  $v_{yx}$  para a solução dos problemas nos quais o compensado é utilizado.

MARCH (1944), apresentou os fundamentos do tratamento matemático dos materiais ortotrópicos e a sua extensão à madeira e ao compensado. Em seu trabalho, apresentou formulação específica para a determinação dos parâmetros elásticos do compensado em função das propriedades das lâminas que o compõem. O módulo de elasticidade efetivo para uma placa de compensado balanceado, submetido à ação de forças no seu plano, pode ser expresso por:

$$\bar{E}_x = \frac{1}{t} \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (E_x)_i t_i}{\lambda_i} - \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(E_x)_i (v_{yx})_i t_i}{\lambda_i} \sum_{i=1}^n \frac{(E_y)_i (v_{xy})_i t_i}{\lambda_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{(E_y)_i t_i}{\lambda_i}} \right] \quad (2.4)$$

Onde  $\bar{E}_x$  é o módulo de elasticidade efetivo na direção x;

$(E_x)_i$  é o módulo de elasticidade da i-ésima lâmina na direção x;

$(E_y)_i$  é o módulo de elasticidade da i-ésima lâmina na direção y;

t é a espessura total do compensado;

$\lambda_i = 1 - (v_{xy})_i (v_{yx})_i$ , aproximadamente igual a 1;

$(\nu_{xy})_i$  o coeficiente de Poisson da  $i$ -ésima lâmina, significando a relação entre a deformação na direção  $y$  e a deformação na direção  $x$  para um esforço axial na direção  $x$ ;

$(\nu_{yx})_i$  o coeficiente de Poisson da  $i$ -ésima lâmina, significando a relação entre a deformação na direção  $x$  e a deformação na direção  $y$  para um esforço axial na direção  $y$ .

A expressão acima pode ser simplificada desprezando-se o termo seguinte ao sinal menos, sem introduzir-se com isso erro significativo. Substituindo-se  $\lambda_i$  por 1, tem-se:

$$\bar{E}_x = \frac{1}{t} \left( \sum_{i=1}^n (E_x)_i t_i \right) \quad (2.5)$$

O valor do módulo de elasticidade efetivo,  $\bar{E}_y$ , na direção  $y$  pode ser obtido de maneira análoga.

O módulo de elasticidade transversal efetivo  $G_{xy}$  também é definido de maneira análoga ao módulo de elasticidade longitudinal, como:

$$G_{xy} = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^n t_i (G_{xy})_i \quad (2.6)$$

Sendo  $(G_{xy})_i$  o módulo de elasticidade transversal da  $i$ -ésima lâmina.

Para os compensados de  $n$  lâminas da mesma espécie, o valor  $(G_{xy})_i$  é igual para todas as lâminas.

No caso de painéis compostos de lâminas de madeira da mesma espécie, obtidas por corte rotatório, o plano  $xy$  coincide com o plano longitudinal tangencial da madeira de origem (LT) e os valores de  $\bar{E}_x$  e  $\bar{E}_y$  podem ser expressos por:

$$\bar{E}_x = \frac{H}{E_b}, \quad \bar{E}_y = \frac{H}{E_a} \quad (2.7)$$

onde: 
$$H = \frac{E_a E_b - E_L^2 v_{TL}^2}{\lambda},$$

sendo  $\lambda = 1 - v_{LT} v_{TL}$

$$E_a = \frac{t_1 E_L + t_2 E_T}{t}$$

$$E_b = \frac{t_1 E_T + t_2 E_L}{t}$$

$t_1$  = soma das espessuras das lâminas com fibras paralelas a x;

$t_2$  = soma das espessuras das lâminas com fibras paralelas a y;

$t = t_1 + t_2$  = espessura total do painel;

$v_{LT}$  = coeficiente de Poisson da espécie de origem, dado pela relação entre a deformação na direção tangencial (T) e a deformação na direção longitudinal (L), para um esforço axial na direção L;

$v_{TL}$  = coeficiente de Poisson da espécie de origem, dado pela relação entre a deformação na direção longitudinal (L) e a deformação na direção tangencial (T), para um esforço axial na direção T.

Os valores dos coeficientes de Poisson podem ser expressos por:

$$\bar{v}_{yx} = \frac{E_L}{E_a} v_{TL} \quad \bar{v}_{xy} = \frac{E_L}{E_b} v_{TL} \quad (2.8)$$

De maneira geral, as chapas de compensado possuem características bastante peculiares, devido à sua composição em lâminas cruzadas. Estas particularidades envolvem desde a trabalhabilidade até as propriedades estruturais. Tais características estão transcritas a seguir.

### **2.5.1. Durabilidade**

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 para 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 ao tempo, a fim de garantir ou prolongar a vida útil do material.

Tratamentos são indicados para o compensado quando estes forem usados em áreas altamente sujeitas a apodrecimento e ataque de térmitas. (OLIN,1990) O aumento da durabilidade pode ser obtido pelo uso de madeiras selecionadas para as lâminas, por armazenamento especial e por proteção química.

### **2.5.2. Densidade**

STECK(1995) afirma que uma das propriedades físicas mais importantes dos produtos derivados da madeira é a densidade. Sendo dependente da quantidade de adesivo e da pressão utilizadas na produção do compensado, a sua densidade é geralmente maior que a da madeira maciça utilizada como matéria prima. Como na madeira maciça, as propriedades de resistência e rigidez do compensado estão correlacionadas com a densidade. Os valores das densidades de algumas chapas de compensado estão dados na Tabela 3.

### **2.5.3. Teor de umidade**

Assim como a madeira sólida, as lâminas são higroscópicas e, portanto, o teor de umidade do compensado depende das condições climáticas do ambiente a que está exposto (veja a Tabela 2). O teor de umidade de equilíbrio do compensado com o ambiente é menor que o da madeira maciça, devido às linhas de cola.



Quanto à permeabilidade, OLIVEIRA & FREITAS(1995) afirmam que o compensado difere da madeira sólida, devido ao aparecimento de pequenas fendas que ocorrem durante a laminação.

TABELA 2 - Teor de umidade de equilíbrio à temperatura ambiente de 20<sup>0</sup>C- fonte: STECK(1995)

umidade relativa do ar de	65%	30%	85%
Compensado	~10%	~5%	~15%
madeira maciça (madeira leve)	~12%	~6%	~17%

#### 2.5.4. Estabilidade dimensional

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) e reproduzido a seguir.

*Expansão e contração higroscópica:* Esta expansão na madeira maciça é, geralmente, insignificante na direção paralela às fibras, mesmo com grandes variações do teor de umidade. Porém, estas mudanças são significativas na direção perpendicular às fibras. No compensado, esta tendência à expansão na direção perpendicular é minimizada pelo cruzamento das lâminas que formam o compensado. OLIVEIRA & FREITAS(1995) colocam que a contração ou expansão volumétrica atinge 0,2% na faixa de variação higroscópica, sendo a expansão em espessura independente do tamanho do painel e espessura das lâminas, podendo atingir 0,9% em toda a variação higroscópica.

*Expansão térmica:* A expansão térmica na madeira maciça é aproximadamente dez vezes maior na direção normal se comparada à direção paralela. 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.

### **2.5.5. Trabalhabilidade**

Segundo OLIN(1990), o compensado é facilmente trabalhável, podendo ser cortado em qualquer dimensão, o que permite a execução de elementos fletidos, formando curvas com raios bem definidos.

Segundo publicação do Finnish Plywood International (FPI). Compensados são facilmente conectados 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. (FPI)

### **2.5.6. Resistência ao fogo**

A temperatura na qual o compensado entrará em combustão quando exposto à chama é próximo de 270°C. São necessárias temperaturas superiores a 400° para causar combustão espontânea. Quando expostos a um total desenvolvimento do fogo, estes materiais queimam a lenta e previsível velocidade linear de 0,64mm de espessura por minuto, o que permite que seja usado em certas construções resistentes ao fogo. Uma maior resistência ao fogo pode ser dado ao compensado com impregnação e/ou revestimento com produtos apropriados, ou com folhas metálicas não combustíveis. (FPI)

### **2.5.7. Resistência ao apodrecimento e ataques de insetos**

Quando o compensado for utilizado em condições permanentes de umidade, com teor de umidade de 20% ou superior, deve ser tratado com preservativo que dê proteção contra fungos e ataque de insetos através das lâminas. (FPI)

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 o compensado para uso exterior pode ser tratado, pois o adesivo utilizado não é afetado pela impregnação por pressão. (OLIN,1990)

### **2.5.8. Fatores que influenciam as propriedades de resistência e rigidez**

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;
- flexão no plano do painel.

É importante notar essa diferença, pois existe variação nas propriedades em relação à direção da chapa.

### **2.5.9. Resistência e rigidez à flexão**

A laminação cruzada do compensado resulta em propriedades físicas e mecânicas mais desejáveis para a utilização estrutural em elementos como almas de vigas, painéis de piso, etc. A resistência da madeira na direção paralela às fibras é muitas vezes maior que na direção perpendicular. A construção com fibras cruzadas, utilizada no compensado, aumenta significativamente a resistência e a rigidez na direção normal às fibras, se comparado com a madeira maciça. Portanto, painéis de compensado possuem, no plano da chapa, boa rigidez e resistência nas direções perpendicular e paralela às fibras da lâmina de face.

### **2.5.10. Tração e compressão**

A laminação cruzada confere ao compensado boa resistência à tração e à compressão 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.

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 contribuição do adesivo.

TABELA 3 – Resistência à compressão e densidade - fonte: STECK(1995)

	(1)		(2)		(3)		(4)		(5)
	t (mm)	f <sub>k</sub> (kN/cm <sup>2</sup> )	t (mm)	f <sub>k</sub> (kN/cm <sup>2</sup> )	t (mm)	f <sub>k</sub> (kN/cm <sup>2</sup> )	t (mm)	f <sub>k</sub> (kN/cm <sup>2</sup> )	
f <sub>c,0,k</sub>	12,0	1,50	12,0	1,99	12,5	1,39	15,5	1,26	58k <sub>2</sub>
	24,0	1,54	24,0	1,93	21,0	1,06	25,5	1,41	
f <sub>c,90,k</sub>	12,0	1,20	12,0	1,75	12,5	0,81	12,5	0,90	58(1-k <sub>2</sub> )
	24,0	1,14	24,0	1,81	21,0	0,77	25,5	0,97	
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )		410		550		410		410	550

onde:

- (1) compensado sueco P30, spruce, não tratado;
- (2) compensado finlandês, birch, lâminas de 1,4mm, tratado;
- (3) compensado produzido nos EUA classes C-D, espessura 1, grupo 1, não tratado;
- (4) Compensado canadense, Douglas fir, regular ou seleção regular de folhas, não tratado;
- (5) compensado alemão, beech.

Os valores de k<sub>2</sub> para os compensados alemães podem ser calculados pela fórmula:

$$k_2 = \frac{t_m - t_{m-2} + t_{m-4} - \dots \pm t_1}{tm}$$

onde:



TABELA 4 - Módulo de elasticidade das chapas de compensado - fonte: STECK(1995)

	(1)		(2)		(3)		(4)		(5)
	t (mm)	$E_{\text{médio}}$ (N/mm <sup>2</sup> )	t (mm)	$E_{\text{médio}}$ (N/mm <sup>2</sup> )	t (mm)	$E_{\text{médio}}$ (N/mm <sup>2</sup> )	t (mm)	$E_{\text{médio}}$ (N/mm <sup>2</sup> )	
$E_{t(c),0}$	12,0	720	12,0	850	12,5	680	12,5	600	$11000k_2$
	24,0	740	24,0	830	21,0	520	25,5	630	
$E_{t(c),90}$	12,0	480	12,0	750	12,5	460	12,5	440	$11000(1-k_2)$
	24,0	460	24,0	770	21,0	390	25,5	430	

O efeito das lâminas com direção perpendicular à direção do esforço aplicado nas propriedades elásticas e de resistência à compressão é pequeno quando comparado ao das lâminas com fibras paralelas ao esforço aplicado. Portanto, pode ser obtida uma boa aproximação das propriedades na compressão, considerando-se apenas as lâminas com fibras paralelas à direção do esforço aplicado.

### 2.5.11. Cisalhamento

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.

### 2.5.12. Resistência ao fendilhamento

Segundo OLIN(1990), as múltiplas camadas de finas lâminas de madeira, posicionadas ortogonalmente, permitem, em alguns casos, um espaçamento mínimo entre pino e borda de 1/4". A resistência ao fendilhamento é grande, desde que não haja um plano preferencial de ruptura já iniciado.

### **2.5.13. Resistência ao impacto e à cargas concentradas**

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)

## **2.6. UTILIZAÇÃO ESTRUTURAL**

---

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;
- ligações em treliças;
- painéis de piso;
- fôrmas para concreto;
- coberturas em arco;

Como pode-se observar nas figuras 8 a 15, nos países onde a utilização do compensado é bastante difundida, a tecnologia para construção com este material é bastante desenvolvida. No Brasil, porém, esta utilização ainda é muito pequena, pois apesar de produzirmos chapas de qualidade, não existem profissionais habilitados para dimensionamento e execução de projetos utilizando este tipo de estrutura.



FIGURA 8 - Estrutura em cúpula utilizando madeira compensada - fonte: FPI



FIGURA 9 - Estrutura em pórtico utilizando madeira compensada - fonte: IPL

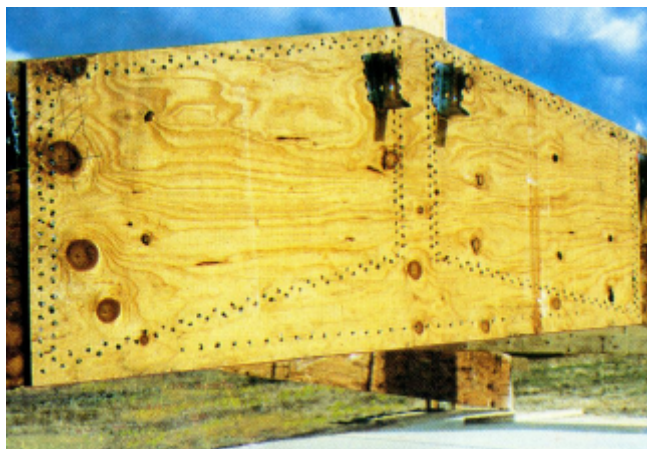


FIGURA 10 - Detalhe da cumeeira da estrutura em pórtico utilizando madeira compensada - fonte: IPL



FIGURA 11 - Vigas compostas com madeira compensada - fonte: FPI



FIGURA 12 - Estrutura de residência utilizando madeira compensada - fonte: IPL





FIGURA 13 - Trelças utilizando madeira compensada como cobrejuntas - fonte: FPI



FIGURA 14- Painéis de piso pré-fabricados utilizando madeira compensada - fonte: FPI



FIGURA 15 - Paredes externas utilizando madeira compensada - fonte: FPI

---

Entre as aplicações estruturais da madeira compensada no Brasil estão as construções rurais, das quais a publicação ABIMCE (1979) “Madeira compensada para construções rurais” apresenta sistemas construtivos para:

- habitações rurais;
- instalações para aves, bovinos, eqüinos, ovinos e suínos;
- silos;
- galpões;
- secadores de cereais;
- construções e instalações diversas (apiários, estufas, ripados para plantas).

A utilização da madeira compensada como parede em silos tem sido estudada no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira da Escola de Engenharia de São Carlos, resultando nas dissertações de mestrado de CALIL JR(1978), VAZ(1987) e FASSONI(1994).

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)<sup>1</sup>, 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 16.

---

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



FIGURA 16– Hangar no Campo de Marte, São Paulo - SP, construído pela TEKNO S/A - fonte: do autor

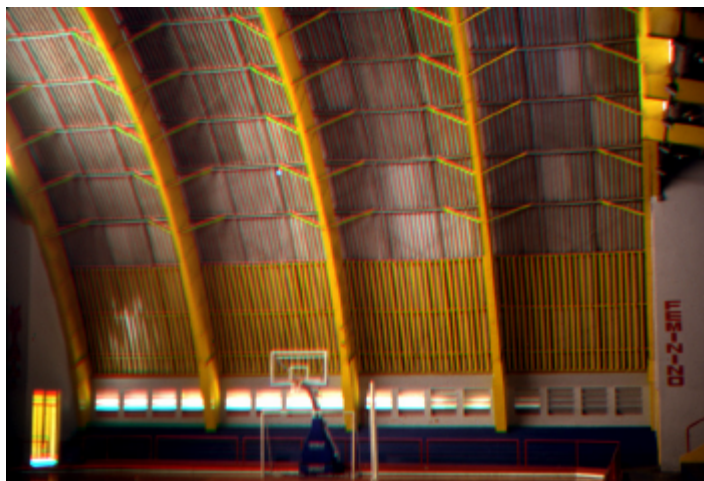


FIGURA 17 – Ginásio de esportes do São Carlos Clube, São Carlos - SP, construído pela TEKNO S/A – fonte: do autor

---

## 2.7. CONCLUSÕES

---

Do estudo sobre compensado realizado na bibliografia, concluiu-se:

1. A tecnologia da utilização do compensado como material estrutural vem sendo pouco aproveitada no nosso país. Porém, como podemos observar pelo estudo feito na bibliografia internacional, essa tecnologia encontra-se bastante desenvolvida em muitos países do mundo que priorizam a qualidade e o custo das construções, onde esse sistema construtivo se mostra bastante competitivo;
2. Trata-se de um produto derivado da madeira que apresenta ótimas propriedades físicas e mecânicas, conferidas principalmente pelo posicionamento de suas lâminas formando ângulos de  $90^0$  entre as fibras das lâminas adjacentes. Outro fator que torna o compensado um material de ótima qualidade é a sua constituição por finas lâminas de madeira, o que distribui os defeitos provenientes da madeira sã, tornando o produto final mais homogêneo;
3. A designação de uso final do compensado é função da espécie e da qualidade das lâminas do arranjo, bem como do tipo de adesivo usado na fabricação da chapa. Na fabricação do compensado basicamente têm sido utilizados adesivos à base de uréia, formol e fenol-formol;
4. Segundo vários autores, o compensado padrão, isto é, de número ímpar de lâminas, balanceado, com lâminas alternadas paralelas e adjacentes perpendiculares, pode ser considerado, para análise estrutural, como um material plano ortotrópico, ou seja, com simetria elástica, em relação a dois planos perpendiculares, sendo, como todo material ortotrópico, caracterizado por propriedades direcionais;
5. Devido à sua laminação cruzada, a madeira compensada tem alta resistência ao fendilhamento e ao cisalhamento, permitindo a cravação de pregos próximos às bordas e às extremidades da peça;

6. A durabilidade dos painéis de madeira compensada depende pouco da espécie de madeira que foi utilizada como matéria prima, sendo mais afetada pela espessura das lâminas, composição (uso de diferentes materiais na mesma chapa) e as propriedades e a quantidade do adesivo, que devem ser adequados ao ambiente ao qual o compensado está exposto. O aumento da durabilidade pode ser obtido pelo uso de lâminas selecionadas, armazenamento especial e por proteção química;
  
7. As propriedades estruturais do compensado são alteradas pelos fatores geométricos (número e espessuras das lâminas; composição), material (espécie de madeira; teor de umidade) e fatores de carga (tipo de solicitação; direção das tensões em relação às fibras das lâminas de face do compensado; duração da carga).

### 3. LIGAÇÕES

Segundo Stoy e Fonrobert, apud ALMEIDA (1990) a partir da segunda metade do século XVII, surgiu a idéia de utilização de elementos estruturais compostos em estruturas de madeira. Foram os grandes construtores da época, como Philibert Delorme, que se preocuparam com a dificuldade de encontrar grandes peças de madeira, com seções suficientes para atender às exigências dos esforços. Surgiu então a idéia da utilização de estruturas com elementos compostos, fabricados a partir de peças de pequenas dimensões, ligadas por elementos metálicos ou qualquer outro tipo de elemento que tivesse a mesma função.

Stoy e Fonrobert citam ainda outros grandes construtores do passado, como David Gilly, Emy e Stephan, que empregaram com bastante êxito as ligações mecânicas na construção de vigas e de arcos de seção composta utilizados em coberturas de grandes vãos.

Para o desenvolvimento das estruturas de madeira de seções compostas, é importante o conhecimento do comportamento das ligações. Os critérios de dimensionamento da antiga NB11 consideravam as uniões com grande deformabilidade, o que, segundo ALMEIDA(1990), inviabiliza a utilização de seções compostas de madeira maciça e madeira compensada, pois a consideração desta deformabilidade resultaria em grandes flechas de cálculo ou em um super-dimensionamento da estrutura.

De acordo com ALMEIDA(1987), a bibliografia disponível atualmente sugere que a resistência das ligações seja determinada diretamente por ensaios ou por meio de equações, formuladas a partir dos diagramas carga×deslocamento. Esses valores apresentam grande discrepância, gerando uma enorme incerteza para os usuários e, com isso, favorecendo o descrédito das estruturas de madeira.

JOHANSEN(1949) relatou que a resistência da ligação por parafuso depende do efeito de pino e do atrito entre as superfícies, causada pelo tensionamento do parafuso. Porém, os resultados de seus ensaios mostraram que este tensionamento é desprezível, concluindo que somente o efeito de pino deve ser computado.

A resistência das ligações por pinos, segundo JOHANSEN(1949), depende da resistência da madeira ao embutimento do parafuso ( $f_e$ ) e da resistência do pino à flexão( $f_y$ ). Tanto o embutimento quanto a flexão do pino são plásticos, portanto a capacidade de carga de um pino metálico pode ser formulada com base nesse comportamento.

O dimensionamento de ligações por pinos segundo a NBR 7190/97 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 carga máxima se dará pela flexão do pino ou pelo embutimento na madeira.

### **3.1. COMPORTAMENTO DAS LIGAÇÕES**

---

Em sua pesquisa na literatura, ALMEIDA(1987), observou, na maioria dos estudos encontrados, que a carga admissível da ligação é determinada através de equações empíricas, as quais são estabelecidas a partir de ensaios de uniões pregadas, por meio de um ajuste dos resultados obtidos.

Os métodos empíricos adotados para a determinação da carga de projeto são estabelecidos com as seguintes condições:

- a) adota-se um corpo de prova padrão;
- b) adota-se um coeficiente de segurança, que é aplicado à carga de ruptura ou à carga necessária para provocar um deslocamento relativo convencional entre as peças da ligação;
- c) para o ajuste das equações empíricas leva-se em consideração também a densidade básica da madeira.

ALMEIDA(1987) considerou inicialmente a resistência à compressão paralela às fibras da madeira como um bom parâmetro para ser usado na determinação da resistência da ligação pregada. Porém, ao analisar a configuração do prego, após a ruptura do corpo de prova, levantou a questão referente ao confinamento do prego na parede do furo, bem como a sua influência na resistência da ligação.

Segundo ele, a investigação deste fenômeno não poderia ser conduzida apenas teoricamente, pelo fato de a madeira ter um comportamento anisotrópico, sendo necessário considerar que o arranjo e a forma dos elementos anatômicos da madeira têm grande influência nas propriedades mecânicas, variando assim as propriedades deste material com relação ao ângulo de inclinação entre o carregamento e as fibras da madeira.

MACK(1960), apud ALMEIDA(1987), fazendo uma análise de seus resultados, concluiu que não só o diâmetro do prego tem influência na rigidez e na resistência última da ligação, mas também as espessuras das peças de madeira que compõem o corpo de prova influenciam os resultados.

### 3.1.1. Resistência das ligações

De acordo com a NBR 7190/97, a resistência de 1 pino, correspondente a uma dada seção de corte entre duas peças de madeira, é determinada em função das resistências de embutimento  $f_e$  das duas madeiras interligadas, da tensão limite de escoamento  $f_y$  do pino metálico, do diâmetro  $d$  do pino e de uma espessura convencional  $t$ , tomada como a menor das espessuras  $t_1$  e  $t_2$  de penetração do pino em cada um dos elementos ligados, representado na figura 18.

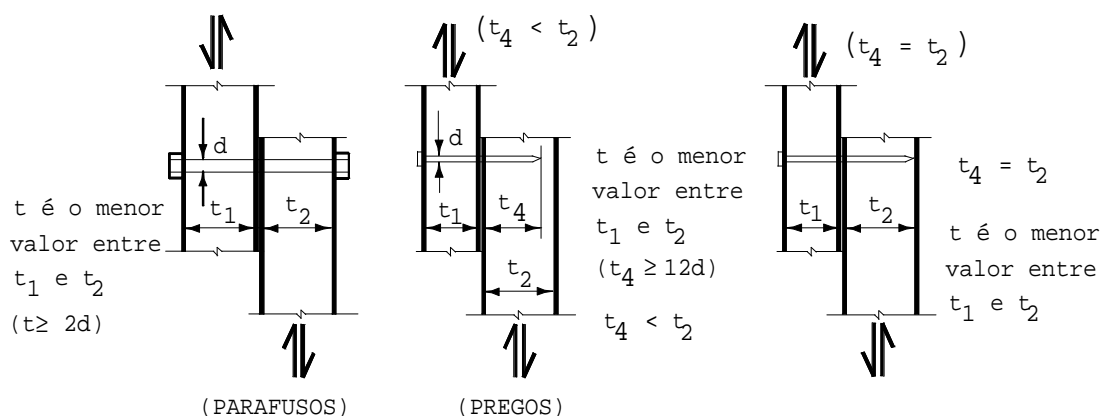


FIGURA 18 - Pinos em corte simples - fonte: NBR 7190/97



---

ALMEIDA(1987) acrescenta que o estado limite de elasticidade pode decorrer do início de plastificação por flexão dos pinos ou por início da plastificação local por compressão da madeira na parede dos furos.

Para estender o conceito de estados limites às uniões pregadas e parafusadas, a partir do diagrama de comportamento carga×deslizamento, ALMEIDA(1987) criou a definição de cargas de primeiro limite e de segundo limite. O primeiro limite correspondendo ao fim do regime elástico (estado limite de utilização) e o segundo limite correspondendo ao fim do deslizamento controlado (estado limite último), afirmando que a união somente pode suportar cargas superiores à carga de segundo limite à custa de grandes deformações, que provocam significativas modificações na geometria do sistema, gerando deslocamentos que não podem ser tolerados nas estruturas.

ALMEIDA (1990) propôs que as cargas de primeiro e de segundo limites fossem estabelecidas a partir da carga correspondente ao limite de proporcionalidade do deslizamento. Para essa finalidade, admitiu a carga de primeiro limite sendo igual a 80% do valor da carga correspondente ao limite de proporcionalidade e a carga de segundo limite correspondendo a 120% deste valor.

### **3.1.2. Modelos teóricos**

#### **3.1.2.1. 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  $f_c d$  praticamente sobre todo o pino, e uma distribuição das pressões, forças cortantes  $V$  e momentos  $M$ , como apresentados na figura 19.

A força transversal passa pelo zero duas vezes na extensão do pino a partir da extremidade livre do mesmo até o ponto onde a direção da pressão muda. O momento de flexão do pino na ligação começa com zero e a equação de equilíbrio é dada por:

$$R = f_e dz \quad (3.1)$$

$$M_{\max} = f_e dx^2 = \frac{1}{2} f_e dz^2 \quad (3.2)$$

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

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

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

Se o pino não for suficientemente rígido, ele será fletido, como mostra a figura 20. No limite de escoamento do pino na flexão, o momento é  $\frac{\pi}{32} f_y d^3$  e a carga transversal é zero. Entre as curvaturas, o embutimento é tão grande que a pressão é praticamente  $f_c d$ .

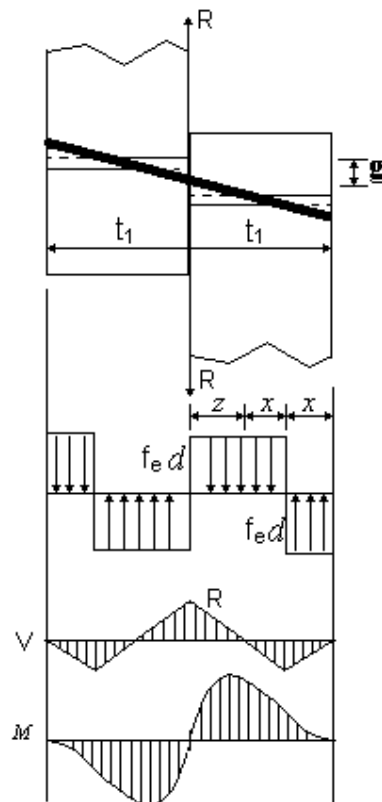


FIGURA 19 - Ligação com pino rígido e uma seção de corte - fonte: JOHANSEN(1949)



Na união, a distribuição de tensões corresponde à apresentada na figura 19, e em cada metade da madeira a distribuição das pressões corresponde à da figura 20.  $V$  sendo zero,  $M_{\max}$  e  $M_{\min}$  devem ocorrer à mesma distância  $z$  da junção, e nos dois casos  $f_e dz$  deve ser igual à  $\frac{1}{2}R$ . O ponto onde  $V=0$  na ligação localiza-se a uma distância duas vezes maior que aquela onde a pressão muda de sinal, figura 19, que vale  $t_1=z+2x$ . Na seção do pino onde  $M = M_{\max}$  e  $V = 0$  a equação do momento será:

$$\frac{1}{2}R = f_e dz \text{ e } x = \frac{1}{2}(t_1 - z) \quad (3.9)$$

$$M_{\max} = \frac{\pi}{32} f_y d^3 = \frac{1}{2}Rz - f_e dx^2 = f_e dz^2 - \frac{1}{4}f_e d(t_1 - z)^2 \quad (3.10)$$

$$z = \frac{t_1}{3} \left( \sqrt{4 + \frac{3\pi f_y d^2}{8f_e t_1^2}} - 1 \right) \quad (3.11)$$

Esta última podendo ser aproximada por:

$$R = \left( \frac{1}{4}f_e t_1^2 + \frac{3}{5}f_y d^2 \right) \sqrt{\frac{f_e}{f_y}} \quad (3.12)$$

resultando uma aproximação muito boa.

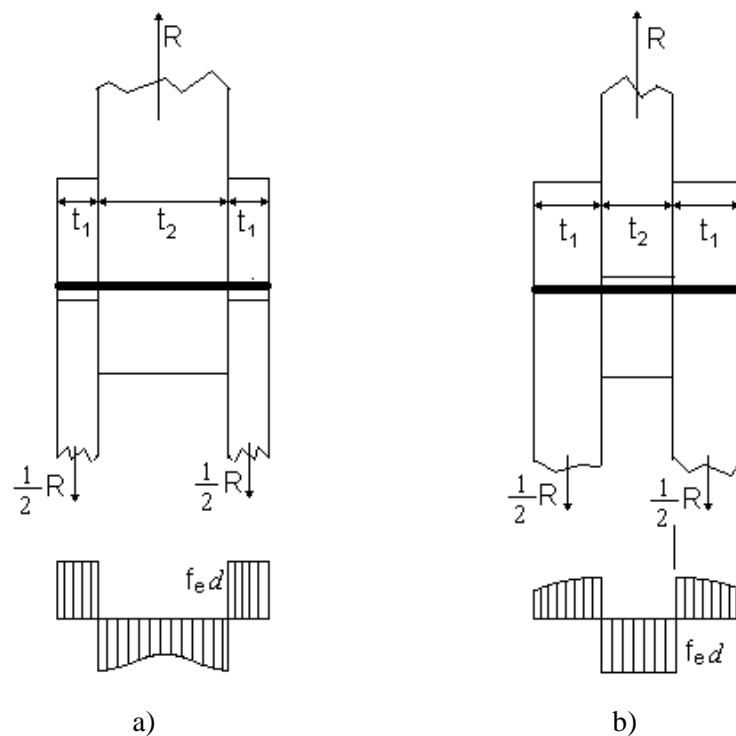


FIGURA 21 - Ligação com pino rígido e duas seções de corte - fonte: JOHANSEN(1949)

Na região entre as curvaturas, onde o pino foi fletido, a madeira deve estar em estado plástico, e a pressão no pino será  $f_e d$  novamente.

O ponto onde  $V=0$  e  $M$  é  $M_{\text{máx}}$  ou  $M_{\text{mín}}$ , deve ocorrer à mesma distância  $z$  da junção, e a força transversal na ligação deve ser:  $\frac{1}{2}R = f_e dz$ .

Tem-se ainda a equação de momento para o pino entre as curvaturas:

$$M_{\text{max}} + M_{\text{min}} = 2 \frac{\pi}{32} f_y d^3 = \frac{1}{2} R z = f_e dz^2 \quad (3.13)$$

$$z = \sqrt{\frac{\pi f_y d^2}{16 f_e}} = 0,442 \sqrt{\frac{f_y}{f_e}} d^2 \quad (3.14)$$

$$R = 0,885 \sqrt{f_y f_e} d^2 \quad (3.15)$$

### 3.1.2.2. 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 carga 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 carga 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:

$$R = \sqrt{2M_{np}q_u} \quad (3.16)$$

Substituindo o valor de  $q_u=f_e d$  na equação (3.16) tem-se:

$$R = \sqrt{2M_{np}f_e d} \quad (3.17)$$

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 (3.17) obtém-se :

$$R = 0,6d^2 \sqrt{f_y f_e} \quad (3.18)$$

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 carga admissível da ligação pregada, para pregos solicitados a corte simples,

$$\text{sendo que: } R_{adm} = 0,8d^2 \sqrt{\sigma_{s,adm} \sigma_{w,adm}} \quad (3.19)$$

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

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

### 3.1.2.3. Método da NBR 7190/97:

O valor de cálculo da resistência de um pino metálico correspondente a uma única seção de corte é determinado pela NBR 7190/97 em função do valor do parâmetro  $\beta$ , onde:

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

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

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

sendo  $f_{yd}$  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

$$\beta \leq \beta_{lim}$$

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

II. Flexão do pino

$$\beta \geq \beta_{lim}$$

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

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

---

## 3.2. GEOMETRIA DA LIGAÇÃO

---

### 3.2.1. Pré-furação

ALMEIDA(1987) estudou o comportamento de ligações pregadas, analisando os vários fatores que influenciam seu comportamento. Um dos pontos estudados foi o efeito da pré-furação das peças de madeira, onde observou que para a cravação do prego na madeira deve primeiramente ser feita uma pré furação, utilizando broca com diâmetro ligeiramente inferior ao diâmetro do prego. Por esta razão, ao ser cravado, o prego induz uma pressão em toda a parede do furo, provocando um estado múltiplo de tensões, mesmo sem a presença de carregamento na ligação.

Essa pressão inicial acarreta uma inevitável plastificação da madeira no entorno do prego. A diferença entre o diâmetro do prego e o diâmetro do furo deve ser suficientemente pequena para que as deformações produzidas pela penetração do prego fiquem circunscritas essencialmente ao material no entorno do furo, sem criar um estado de tração generalizado que conduza ao fendilhamento da madeira.

ALMEIDA(1987) concluiu também que, quando a pré-furação é feita com diâmetros adequados, fica eliminado o risco de fendilhamento e que, além disso, o posterior carregamento da ligação não produz deslizamento de ajuste. Assim, nessas ligações, mantém-se o comportamento elástico até que se dê o início de plastificação da madeira por compressão localizada ou do prego por flexão. Desse modo, em regime elástico, não há necessidade de consideração de qualquer deformabilidade concentrada nas uniões pregadas, como sugeria a antiga norma brasileira NBR 7190/82, mesmo para cargas de serviço.

Segundo WILKINSON & ROWLANDS(1981), pequenas mudanças na relação entre o diâmetro do pino e pré-furação podem ter um efeito bastante significativo nas tensões na vizinhança do furo. Este, provavelmente, é o fator que provoca a maior variabilidade em resultados observados em ensaios de ligações por parafusos. Se a relação  $r/R$  diminui, a tensão abaixo do furo aumenta.



Ainda segundo ALMEIDA(1987), o efeito da penetração do prego na madeira é um problema bastante discutido pelos pesquisadores e códigos normativos, que se dedicam ao estudo do comportamento e da resistência de uma ligação pregada de madeira. Em alguns códigos normativos, a questão é apenas mencionada, sem a preocupação de especificar as bitolas das brocas a serem utilizadas e a influência do efeito da pré-furação no valor da carga admissível da ligação.

A NBR 7190/97 especifica que em uniões pregadas deve, obrigatoriamente, ser feita a pré-furação da madeira, com diâmetro  $d_0$  não maior que o diâmetro  $d_{ef}$  do prego, com os valores usuais:

coníferas:  $d_0 = 0,85 d_{ef}$

dicotiledôneas:  $d_0 = 0,98 d_{ef}$

onde  $d_{ef}$  é o diâmetro efetivo medido nos pregos a serem usados.

A norma britânica BSI (The British Standard Code Of Practice CP112-1952), apud ALMEIDA(1987), permite o uso de brocas de diâmetro até 80% do diâmetro do prego, mas não especifica se o valor da carga admissível de projeto é alterado quando utilizada a pré-furação.

No item 6.2.3 da norma DIN 1052, a mínima espessura da madeira, *mín a*, em mm (a qual não deve ser menor que 24 mm) para ligações sem pré-furação pode ser calculada como segue:

$$\min a = d_n(3+0,8d_n), \quad (3.25)$$

onde  $d_n$  é o diâmetro do furo, em mm.

Onde pregos são cravados com pré-furação (mencionado no item 6.2.5 da DIN) a espessura mínima da madeira, diferente da obtida pela equação (4.25), é permitida para pinos de 4,2 mm e maiores. Em tais casos, a espessura da madeira pode ser reduzida a seis vezes o diâmetro do prego. No caso de espessuras menores, a carga admissível deve ser diminuída de um valor correspondente a razão  $a/6d_n$ .

Em seu item 6.2.4, a DIN 1052 especifica a carga admissível por prego, para corte simples ou múltiplos, como sendo igual a  $m \cdot z_{ul} N_1$ , com  $m$  sendo o número de planos de cortes, desde que a profundidade mínima de cravação do prego seja respeitada.

O item 6.2.5 da DIN 1052 permite que, se os pregos forem cravados sob pré-furação de aproximadamente  $0,9 d_n$  de diâmetro e com um comprimento igual ao comprimento do prego, a carga do prego pode ser assumida como 1,25 vezes a calculada pela equação (3.26).

$$zulN_1 = \frac{500 \times d_n^2}{10 + d_n} \quad (3.26)$$

Ainda, no item 6.2.6, a DIN permite que se considere 1,5 vezes a carga obtida pela equação (3.26) para ligações pregadas entre peças de madeira de alta densidade ou dessas madeiras com compensado (constituídos de no mínimo 7 lâminas). Uma condição para o aumento da carga é que os furos tenham aproximadamente  $0,9d_n$ . A espessura da madeira deve ser no mínimo seis vezes o diâmetro do prego. Quando a espessura menor for utilizada, a carga admissível deve ser diminuída.

O item 6.2.7 da DIN 1052 permite que a carga admissível do prego especificada nos itens 6.2.2 e 6.2.5 seja aplicável às ligações pregadas em conjunção com compensado ou com chapas de aglomerado, desde que a penetração do prego na madeira compensada tenha um comprimento mínimo de  $3d_n$ , para  $d_n$  menor que 4,2 mm, e  $4 d_n$ , para  $d_n$  excedendo 4,2 mm.

No caso de ligações por pregos entre compensados e madeira leve, a carga admissível no prego obtida da equação (3.26), item 6.2.5, deve ser acrescida de 20% e a espessura mínima do compensado reduzida em 25%.

Segundo ALMEIDA(1987), no laboratório de Estruturas, do Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações da Escola Politécnica (PEF), da Universidade de São Paulo, foram realizados vários ensaios de cravação de pregos em madeira, inclusive com a espécie Jatobá (*Hymenaea Courbaril*), com resistência à compressão em torno de  $f_{c0} = 90$  MPa e com teor de umidade de 15 %. Observou-se que na condição de umidade seca (15%), para madeiras com resistência à compressão acima de 60 MPa, as prescrições das Normas DIN 1052 e BSI não são suficientes para impedir o aparecimento de fendilhamento longitudinal às fibras. Para se fazer a cravação nas madeiras com resistência à compressão em torno de 90 MPa, com teor de umidade de 15%, foi necessário utilizar brocas com 98% do diâmetro do prego. Para madeiras pertencentes às classes C50 e C60, com o mesmo teor de umidade, foram necessárias brocas com 85% do diâmetro do prego.

### 3.2.2. Espaçamentos

WILKINSON & ROWLANDS(1981), baseados em ensaios em corpos de prova de madeira carregados por pinos metálicos, afirmam que, sob algumas condições, as tensões são fortemente influenciadas pela distância de extremidade. Contudo, os resultados numéricos e experimentais indicam que as tensões abaixo do pino são pouco alteradas para distâncias de extremidade maiores que  $8R$ . Reduzindo a distância de extremidade abaixo deste valor, ocorre uma influência na forma e na grandeza da distribuição de tensões. Pequenas distâncias de borda permitem à madeira deformar mais facilmente ao redor do pino. Tal facilidade de deformações tem sérios efeitos: reduz a tensão de compressão radial imediatamente abaixo do pino, pode realocar a máxima tensão radial para longe do eixo de simetria, aumenta a tensão longitudinal nas bordas do furo, aumenta e realoca a máxima tensão de cisalhamento abaixo do furo.

A NBR 7190/97 recomenda os seguintes espaçamentos entre pinos nas ligações:

- a) entre os centros de dois pinos situados em uma mesma linha paralela à direção das fibras: pregos e cavilhas:  $6d$  ; parafusos:  $4d$  ;
- b) do centro do último pino à extremidade de peças tracionadas:  $7d$ ;
- c) do centro do último pino à extremidade de peças comprimidas:  $4d$ ;
- d) entre os centros de dois pinos situados em duas linhas paralelas à direção das fibras, medido perpendicularmente às fibras :  $3d$ ;
- e) do centro de qualquer pino à borda lateral da peça, medido perpendicularmente às fibras, quando o esforço transmitido for paralelo às fibras:  $1,5d$ ;
- f) do centro de qualquer pino à borda lateral da peça, medido perpendicularmente às fibras, quando o esforço transmitido for normal às fibras, do lado onde atuam tensões de tração normal:  $1,5d$ ;
- g) do centro de qualquer pino à borda lateral da peça, medido perpendicularmente às fibras, quando o esforço transmitido for normal às fibras, do lado onde atuam tensões de compressão normal:  $4d$ .

Estes espaçamentos estão representados na figura 22.

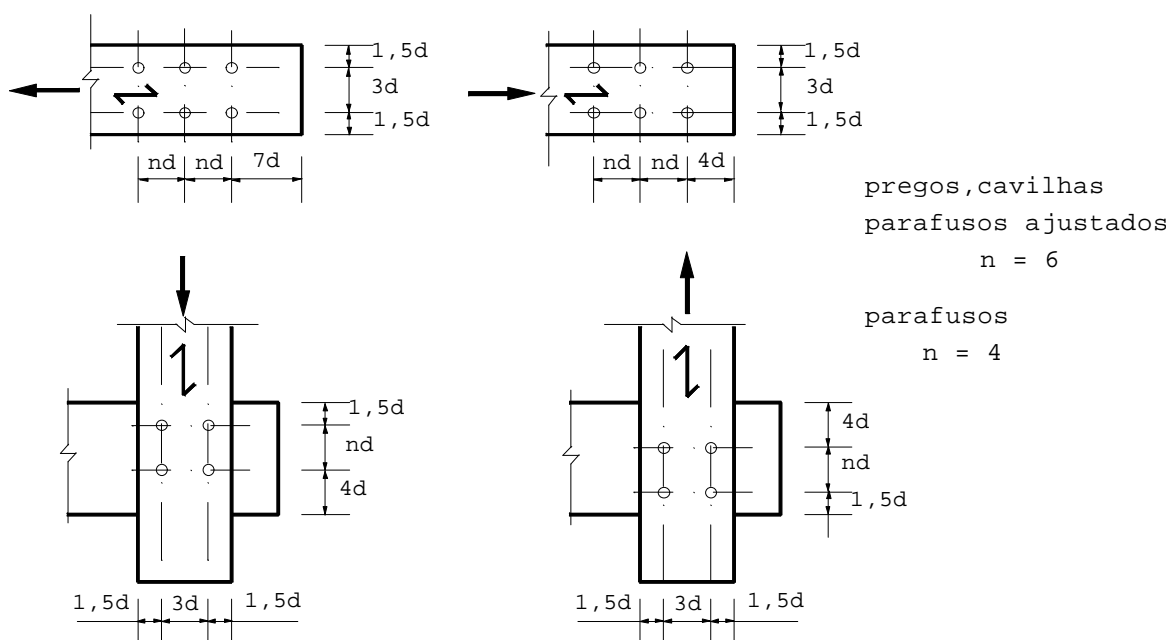


FIGURA 22 - Espaços em ligações com pinos metálicos - fonte: NBR 7190/97

O item 6.2.10 da DIN 1052 apresenta os espaçamentos mínimos e distâncias paralelas à direção do esforço em peças de pequena espessura, dados na tabela 5.

TABELA 5 - Espaçamento mínimo entre pregos segundo a DIN 1052 – fonte: DIN 1052

		Espaçamento mínimo entre pregos	
Espaçamento	direção	sem pré-furação <sup>1)</sup>	com pré furação
entre pregos	// às fibras	10d <sub>n</sub> 12d <sub>n</sub> <sup>2)</sup>	5d <sub>n</sub>
	⊥ às fibras	5d <sub>n</sub>	5d <sub>n</sub>
da borda carregada	// às fibras	15d <sub>n</sub>	10d <sub>n</sub>
	⊥ às fibras	7d <sub>n</sub> 10d <sub>n</sub> <sup>2)</sup>	5d <sub>n</sub>
da borda descarregada	// às fibras	7d <sub>n</sub> 10d <sub>n</sub> <sup>2)</sup>	5d <sub>n</sub>
	⊥ às fibras	5d <sub>n</sub>	3d <sub>n</sub>

<sup>1)</sup> pré furação é essencial para Douglas Fir quando o diâmetro do pino é  $\geq 3,1$  mm  
<sup>2)</sup> quando d<sub>n</sub> excede 4,2 mm

O item 6.2.11 da DIN especifica que, quando não houver pré-furação, o espaçamento dos pregos e suas distâncias até a borda perpendicular às fibras devem ser maior que  $5d_n$ . Permite também que o espaçamentos mínimos dados na tabela 5, sejam multiplicados por um fator 0,85 para o compensado, em ligações de compensado com madeira maciça. A mínima distância na madeira compensada deve ser tomada como  $3d$  para uma borda (ou extremidade) descarregada e  $(3+4\text{sen}\alpha)d$  para a borda (ou extremidade) carregada.

Segundo EHLBECK & WERNER (1995), para ligações de compensado com madeira maciça, o EUROCODE 5 permite uma redução de 15% nos espaçamentos especificados para ligações de madeira maciça com madeira maciça. Os valores mínimos para espaçamento no compensado em relação à borda não carregada ou à extremidade não carregada deve ser  $3d$ , para a borda carregada ou para a extremidade carregada  $(3+4\text{sin}\alpha)d$ .

O espaçamento mínimo entre pinos metálicos na direção paralela às fibras ( $a_1$ ), dado como  $(4+3|\text{cos}\alpha|)d$  para pregos e parafusos e  $(3+4|\text{cos}\alpha|)d$  para outros pinos, pode ser reduzido à um mínimo de  $4d$ , onde  $\alpha$  é o ângulo de inclinação do carregamento em relação às fibras. Neste caso, a capacidade de carga é diminuída devido ao perigo de fendilhamento. Portanto, a resistência ao embutimento característica  $f_{h,0,k}$  deve ser reduzida por um fator de espaçamento  $K_a$ :

$$\text{para ligações por parafusos: } K_a = \sqrt{\frac{a_1}{(4+3|\text{cos}\alpha|)d}} \quad (3.27)$$

$$\text{para ligações por pregos: } K_a = \sqrt{\frac{a_1}{(3+4|\text{cos}\alpha|)d}} \quad (3.28)$$

Esta norma observa que para o compensado o fator de espaçamento  $K_a$  pode ser desconsiderado.

A norma Canadense não diferencia para parafusos os espaçamentos para compensado em relação ao dado para a madeira maciça. Os espaçamentos recomendados para ligações em madeira por parafusos são:

- Espaçamento entre parafusos na mesma coluna:
  - carregamento perpendicular às fibras: deve ser limitado pelo elemento estrutural conectado e não deve ser menor que  $3d$ ;

- 
- Espaçamento entre colunas
    - ⇒ carregamento paralelo às fibras :  $2d$ ;
    - ⇒ carregamento perpendicular às fibras:
      - $2,5 d$  para relação espessura/diâmetro = 2;
      - $5 d$  para relação espessura/diâmetro  $\geq 6$ ;
      - no intervalo de 2 a 6, interpolar linearmente;
  - Distância de extremidade:
    - $7d$  para membros tracionados;
    - $4d$  ou  $50 \text{ mm}$ , o que for maior, para peças comprimidas ou carregadas perpendicularmente às fibras;
  - Distância de borda:
    - para carregamento perpendicular às fibras  $4d$  e para as bordas não carregadas  $1,5d$ ;
    - Para peças carregadas paralelamente às fibras:  $1,5d$  ou metade da distância entre coluna, o que for maior;
  - Para pregos:
    - os espaçamentos dependem da espécie de madeira.

Também não faz diferenciação para o compensado, apenas na espessura mínima das peças, que deve ser  $5d$  para madeira serrada ou  $3d$  para o compensado.

---

### 3.3. EMBUTIMENTO

---

Os conceitos básicos de resistência ao embutimento foram apresentados por ALMEIDA(1987), no primeiro estudo sobre o embutimento de pinos metálicos em ligações de madeira realizado no Brasil, onde 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.

Segundo Almeida, 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.

O prEN 383(1993) define a resistência ao embutimento como sendo a tensão média de compressão quando aplicada carga máxima na peça de madeira, ou de compostos de madeira, sob ação de um pino linear rígido.

WILKINSON & ROWLANDS(1981) relatam estudos sobre as tensões ao redor do furo, aplicadas por um parafuso, em placas de Sitka spruce. A análise foi feita considerando estado plano de tensões avaliada por medidas de deformações e considerando a lei de Hooke. Afirmam que, embora seja assumido um comportamento linear para a madeira, o problema é significativamente não linear devido ao incremento de área de contato com o carregamento.

ALMEIDA(1987) verificou que a resistência de embutimento das madeiras está diretamente relacionada com sua resistência à tração normal às fibras. Porém admitiu que, como o estudo da resistência à tração normal é recente, não se dispondo de resultados suficientes para uma análise mais ampla, o valor limite pode ser determinado em função da razão entre a resistência de embutimento e a resistência à compressão, ambas na mesma direção em relação às fibras.

De acordo com ALMEIDA(1987), um parâmetro importante no estudo das ligações pregadas de madeira é a relação entre a resistência de esmagamento local da madeira ( $f_{we}$ ), que ocorre devido à pressão da haste do prego sobre a parede do furo, e a resistência à compressão paralela às fibras da madeira ( $f_{wc,0}$ ).

Na determinação das propriedades das madeiras, a NBR 7190/97 permite a caracterização simplificada da resistência da madeira serrada de espécies usuais a partir dos ensaios de compressão paralela às fibras. Para espécies usuais de madeira maciça, na falta de determinação experimental, permite-se adotar as seguintes relações para valores característicos das resistências:

$$f_{e90,k}/f_{c0,k} = 0,25$$

$$f_{e0,k}/f_{c0,k} = 1,0$$

$$f_{e90,k}/f_{c0,k} = 0,25$$

A Norma não cita valores específicos para chapas de compensado, porém sabe-se que os valores acima citados não podem ser usados neste caso, pois, devido à compensação das propriedades de rigidez e resistência proporcionada pela laminação cruzada, as relações  $f_{c90,k}/f_{c0,k}$  e  $f_{e90,k}/f_{c0,k}$  devem ser próximas de 1 (um).

A NBR 7190/97 especifica que os esforços resistentes das peças estruturais de madeira em geral devem ser determinados com a hipótese de comportamento elasto-frágil do material, isto é, com um diagrama tensão×deformação linear até a ruptura tanto na compressão quanto na tração paralela às fibras.

### **3.3.1. Considerações sobre a distribuição das tensões**

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 da espécie de madeira utilizada. A figura 23 apresenta, de forma esquemática, o estado de confinamento do prego na madeira após sua cravação.

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  $f_{we}$ , depende da resistência da madeira num estado múltiplo de tensões.

Esse parâmetro de resistência da ligação foi definido como a razão entre a carga determinada no ensaio, realizado de acordo com o método proposto pelo autor, e a área diametral da parede do furo.

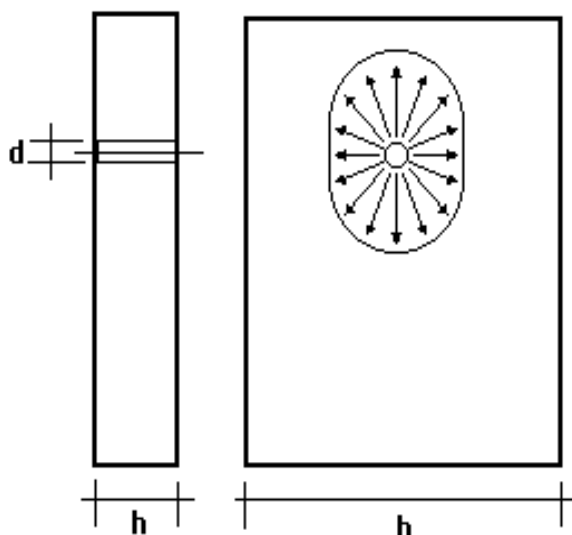


FIGURA 23 - Estado de tensões causado pela cravação do prego - fonte: ALMEIDA(1987)

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 mesma definição foi adotada por JOHANSEN(1949), que também 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.

Em seu trabalho, SMITH(1982) afirma que a carga do conector é transmitida à madeira pela combinação entre o comportamento da tensão radial e da tensão de cisalhamento tangencial. As grandezas relativas e absolutas destas duas componentes variam ao redor da circunferência do pino e com o embutimento.

---

SMITH(1982) ainda acrescenta que a distribuição das tensões para corpos de prova de embutimento por tração e corpos de prova de embutimento por compressão são bastante diferentes. Nos casos onde a largura do corpo de prova é bem grande se comparada com o diâmetro do pino, as características da tensão de embutimento tenderão a se aproximar das situações de embutimento por compressão, ressaltando que os resultados de “ensaios de embutimento por compressão” devem ser aplicados às ligações carregadas à compressão. Os resultados dos ensaios de embutimento por tração devem ser aplicados às ligações carregadas à tração.

Segundo WHALE & SMITH (1986b), para a implantação de métodos de cálculo mais racionais é necessário conhecer as características de carga×deformação e das propriedades de resistência de vários tipos de ligações mecânicas, pois a falta de tais informações pode levar a análises inseguras de estruturas e componentes.

Em seu trabalho foram realizados ensaios de embutimento com corpos de prova de compensado e de madeira maciça. Também foram ensaiadas, para aferir o modelo matemático utilizado pelos autores, ligações compostas por madeira maciça com madeira maciça e madeira compensada com madeira maciça. Nestes modelos, os valores encontrados nos ensaios de embutimento foram utilizados como base de dados para obter os resultados por elementos finitos.

Originalmente, a resistência de peças de compensado tem sido interpretada como combinação de resultados de duas direções, derivada da contribuição separadamente das lâminas paralelas e perpendiculares ao carregamento. Soluções de simulações numéricas efetuadas por WHALE & SMITH (1986b), contudo, resultaram em diferenças desprezíveis entre as contribuições das propriedades das lâminas paralelas e perpendiculares. Provavelmente devido ao pequeno diâmetro de pregos envolvido.

### 3.3.2. Cálculo da resistência ao embutimento:

A resistência ao esmagamento local da madeira pela haste do prego ( $f_{we}$ ), também designada por resistência ao embutimento, foi determinada por MACK(1960), apud ALMEIDA(1987), em função da carga última ( $q_u$ ) por unidade de comprimento da haste do prego. O valor de  $q_u$

$$\text{é dado por: } q_u = \frac{F_u}{nt_1} \quad (3.29)$$

Onde  $F_u$ : carga última obtida no ensaio

$n$ : número de pregos

$t_1$ : espessura da peça central

Dividindo-se o valor de  $q_u$  pelo diâmetro do prego, obtém-se a resistência convencional de

$$\text{embutimento } (f_{we}), \text{ dada por: } f_{we} = \frac{F_u}{nt_1 d} \quad (3.30)$$

Essa resistência é convencional, pois as tensões de compressão no plano diametral do furo não têm distribuição uniforme.

Segundo o EUROCODE 5 (1993), os seguintes valores de resistência ao embutimento característicos devem ser usados para pregos de até 8 mm em ligações de madeira maciça com madeira maciça, para todos os ângulos em relação às fibras:

$$\text{sem pré-furação: } f_{e,k} = 0,082 \rho_k d^{-0,3} \text{ N/mm}^2 \quad (3.31)$$

$$\text{com pré-furação: } f_{e,k} = 0,082 (1-0,01d)\rho_k \text{ N/mm}^2 \quad (3.32)$$

com  $\rho_k$  em  $\text{kg/m}^3$  e  $d$  em mm.

O EUROCODE ainda apresenta valores para ligações pregadas de painéis com madeira maciça. No caso de painéis de compensado, os seguintes valores de resistência ao embutimento característicos devem ser usados:

$$f_{e,k} = 0,11 \rho_k d^{-0,3} \text{ N/mm}^2 \quad (3.33)$$

com  $\rho_k$  em  $\text{kg/m}^3$  e  $d$  em mm.

Para ligações por parafusos de até 30 mm de diâmetro os seguintes valores característicos de embutimento devem ser utilizados, para carregamentos formando um ângulo  $\alpha$  em relação à direção das fibras fibra:

$$f_{e,\alpha,k} = \frac{f_{e,0,k}}{k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (3.34)$$

onde:  $f_{e,0,k} = 0,082(1-0,01d)\rho_k \text{ N/mm}^2$

$K_{90} = 1,35+0,015d$  para madeiras moles

$K_{90} = 0,90+0,015d$  para madeiras duras

com  $\rho_k$  em  $\text{kg/m}^3$  e  $d$  em mm

O item do EUROCODE 5 que trata de ligações parafusadas de compensado com madeira maciça, especifica as mesmas regras que são utilizadas para ligações de madeira maciça com madeira maciça.

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. Equações para a determinação da resistência característica de embutimento, para alguns painéis, foram desenvolvidas experimentalmente pela realização de um grande número de ensaios de embutimento.

Uma das principais razões para a adaptação das equações de Johansen para ligações no EUROCODE 5, segundo HILSON(1995), é que novos materiais, em particular chapas de derivados de madeira e novos tipos de conectores (pinos), podem ter sua resistência característica de embutimento e momento máximo de flexão calculados pelo desenvolvimento de equações empíricas.

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.

A norma DIN 1052 (1988) apresenta uma tabela com os módulos de deslizamento para vários tipos de ligações, com madeira leve, madeira dura, compensado, aglomerado, etc., bem como combinações de materiais e o valor do deslocamento a ser considerado na ruptura destas ligações, bastante interessantes para a análise da rigidez de ligações.

A norma australiana para dimensionamento de estruturas de madeira também apresenta um conjunto de equações para a análise de deformações em ligações. Essa norma apresenta as seguintes considerações com relação ao uso de pregos e parafusos para ligações em compensado com madeira maciça:

A capacidade de carga para carregamento lateral em uma ligação de pregos ou parafusos, entre compensado e madeira maciça, pode ser tomada como sendo 10% maior que os valores dados pelas ligações de madeira maciça, exceto se o diâmetro do conector, seu comprimento e a espessura do compensado possam ser tais que:

$$t_0/D > 1,5 \quad t_p/D > 10 \quad t_w/D > 10$$

onde  $D$  = diâmetro do parafuso, em mm

$t_0$  = espessura do compensado, em mm

$t_p$  = penetração do prego, em mm

$t_w$  = espessura da madeira.

Analisando a equação para resistência ao embutimento da madeira maciça, (3.31) cuja constante é 0,082 e a equação para compensado, (3.33), cuja constante é 0,11, somadas a esta última observação da norma australiana, observamos que a resistência ao embutimento da madeira compensada pode ser considerada maior que a resistência ao embutimento da madeira maciça utilizada como matéria prima.

### 3.4. MODOS DE RUPTURA

---

De acordo com ALMEIDA(1987), a definição dos estados limites de uma estrutura exige um claro entendimento de seus modos de ruína. A simples análise de diagramas carga×deformação não permite essa definição.

Em seus ensaios, SMITH(1982) notou que, continuando o carregamento em um período inicial de embutimento, uma zona de esmagamento se desenvolve abaixo do conector. Observou ainda que existem dois estados de deformação final observados nos corpos de prova testados: apenas esmagamento e esmagamento com fendilhamento.

O estado de esmagamento com fendilhamento representa o processo completo de deformação e ruína. Apenas esmagamento representa o mesmo processo, exceto que um dos critérios de parada, o de deslocamento excessivo de 12,5 mm do topo do corpo de provas, foi alcançado sem que o mecanismo de ruptura por fendilhamento tenha se iniciado.

Segundo SMITH(1982), não é possível determinar em qual estágio do ensaio a ruptura na madeira se inicia ou em qual estágio as rupturas existentes se propagam, a menos que técnicas especiais sejam usadas para observar a microestrutura da madeira durante o carregamento. Para os corpos de prova nos quais o pino carrega a madeira perpendicular às fibras, três modos de ruptura final podem se desenvolver a partir da primeira falha:

Modo 1: A primeira fissura cresce rapidamente e resulta em uma ruptura por fendilhamento com uma pequena deformação plástica no corpo de prova fendilhado.

Modo 2: Com deslocamentos do pino  $\leq 12,5$  mm o primeiro fendilhamento é contido e ocorre um esmagamento e um deslizamento da madeira abaixo do pino, como um aumento do embutimento.

Modo 3: Este modo é a combinação dos modos 1 e 2, isto é, quando o embutimento é acrescido, ocorre um esmagamento e deslizamento da madeira combinada com um lento crescimento da fissura dominante.

Em seus ensaios, SMITH(1982) utilizou pinos metálicos suficientemente rígidos e dimensões de CP apropriadas para evitar o modo de ruptura pela fluência do pino. Neste caso, portanto, foi observado apenas os modos de ruptura que ocorrem na madeira.

ALMEIDA(1987), em seus ensaios com ligações pregadas de madeira, não restringiu a deformação por flexão do prego, observando os seguintes modos de ruptura:

I - Ruptura da emenda por plastificação dos pregos: A ligação pregada de madeira apresentou grandes deformações em decorrência da plastificação do prego por flexão, com eventual esmagamento parcial da parede do furo. A resistência da ligação foi estabelecida como a carga correspondente a plastificação dos pregos.

II - Ruptura da emenda por embutimento do prego na madeira: Em geral este modo de ruptura ocorreu quando a ligação pregada foi feita com madeira de baixa resistência ou quando na emenda existiam peças de espessuras muito pequenas. Outro parâmetro importante no aparecimento deste modo de ruptura foi a relação entre a resistência de embutimento da madeira e o diâmetro do prego. Quando o diâmetro do prego foi aumentado, também aumentou a sua resistência à flexão e, portanto, pode-se aumentar a força transmitida à madeira. O aumento do diâmetro também diminuiu a resistência de embutimento em virtude da pressão específica na parede do furo. Todavia, para madeiras de baixa resistência à compressão a relação  $K = f_{we}/f_{wc}$  tendeu a um valor abaixo da unidade, mostrando a importância da verificação desses parâmetros para o dimensionamento das ligações.

III - Ruptura por fendilhamento da madeira. Este modo ocorreu pela ruptura por tração da madeira ao longo de planos paralelos à direção da força transmitida pelo prego à madeira.

Este modo de ruptura ocorre em duas situações distintas: no ato da cravação dos pregos durante a montagem da ligação e quando a ligação pregada foi solicitada por carregamentos externos.

A primeira ocorreu na fabricação da ligação, por ter sido utilizada pré-furação insuficiente. A relação ideal entre o diâmetro do prego e o diâmetro da broca deve ser determinada experimentalmente. Se na montagem da ligação estas variáveis não forem devidamente controladas, ocorrerá um fendilhamento prematuro sob ação das cargas externas.

A ruptura por fendilhamento devido ao carregamento depende de vários fatores, sendo mais importante o espaçamento entre pregos e a distância dos pregos às bordas das peças da ligação.

Afirma ainda que este modo de ruptura não pode ser controlado por limitações dos valores das tensões, mas sim por regras construtivas que limitem os espaçamentos mínimos para cada situação de uso dos pregos nas ligações.

Porém, sobre esta última observação, a DIN 1052 admite que, para espessuras menores que o mínimo calculado por  $\min a$ , deve ser feita uma redução na carga admissível segundo a razão  $a/6d_n$  para se considerar o efeito do fendilhamento. Da mesma maneira, o EUROCODE 5 admite espaçamentos menores que os especificados, desde que se considere um fator  $K_a$  de diminuição da resistência ao embutimento, já apresentado no item 3.2.2., para prevenir o fendilhamento.

Da análise dos modos de ruptura e dos valores experimentais, ALMEIDA(1990) afirma que a resistência ao embutimento das madeiras está diretamente relacionada com sua resistência à tração normal às fibras. Com isso, a espessura da peça de madeira passa a ser um parâmetro muito mais importante na resistência de embutimento do que habitualmente admitido. Esta observação pode não ser aplicável ao compensado, que apresenta modos de ruptura diferentes dos observados na madeira maciça, não apresentando ruptura por fendilhamento,

### **3.5. MÉTODOS DE ENSAIOS**

---

Para a determinação experimental da resistência ao embutimento da madeira, foram estudados alguns métodos especificados por normas estrangeiras, ou propostas por pesquisadores, onde cada uma possui suas particularidades. Estes métodos estão descritos a seguir, e foram de grande importância para a definição do método e análise dos ensaios realizados neste trabalho.

#### **3.5.1. Método da NBR 7190/97**

Segundo a NBR 7190/97, “Projeto e dimensionamento de estruturas de madeira”, a resistência é determinada convencionalmente pela máxima tensão que pode ser aplicada a corpos de prova isentos de defeitos do material considerado, até o aparecimento de fenômenos particulares de comportamento, além dos quais há restrição de emprego do



material em elementos estruturais. De modo geral estes fenômenos são os de ruptura ou de deformação específica excessiva.

De acordo com a NBR 7190/97, a rigidez dos materiais é medida pelo valor médio do módulo de elasticidade, determinado na fase de comportamento elástico-linear. Em seu anexo B, apresenta a metodologia de ensaio que deve ser seguida para a determinação das resistências de embutimento da madeira, nas direções paralela e normal às fibras, em um lote considerado homogêneo.

Nesse anexo, a resistência de embutimento ( $f_{we}$  ou  $f_e$ ) é definida pela razão entre a força  $F_e$ , que causa a deformação específica residual de 2‰, e a área de embutimento do pino  $A_e=td$ , determinada no ensaio do corpo-de-prova mostrado na figura 24.

Para essa finalidade, as resistências de embutimento nas direções paralela e normal às fibras,  $f_{e0}$  e  $f_{e90}$ , em MPa, devem ser determinadas a partir do diagrama tensão×deformação específica de embutimento mostrado na figura 16. Essas resistências são calculadas pelas expressões:

$$f_{e0} = \frac{F_{e0}}{td} \quad (3.40)$$

$$f_{e90} = \frac{F_{e90}}{td} \quad (3.41)$$

onde:

$F_{e0}$  e  $F_{e90}$  são as forças aplicadas respectivamente nas direções paralela e normal às fibras, correspondentes às deformações residuais de  $\epsilon=2‰$ , em Newton (N);

$t$  é a espessura do corpo-de-prova, em metro (m);

$d$  é o diâmetro do pino, em metro (m).

Os valores característicos das resistências de embutimento paralelo e normal às fibras  $f_{e0,k}$  e  $f_{e90,k}$  devem ser determinados pelo estimador, dado na seção 3 desta mesma norma.

O corpo-de-prova para a resistência de embutimento na direção paralela às fibras deve ter forma prismática, de seção retangular, com  $8d$  de largura e  $2d$  de espessura correspondentes a  $\beta=t/d=2$ , com comprimento ao longo das fibras de  $18d$ . Para a resistência de embutimento na direção normal às fibras, o corpo de prova deve ter as mesmas dimensões anteriores, tomando-se o eixo maior na direção normal às fibras da madeira, como indicado na figura 24.

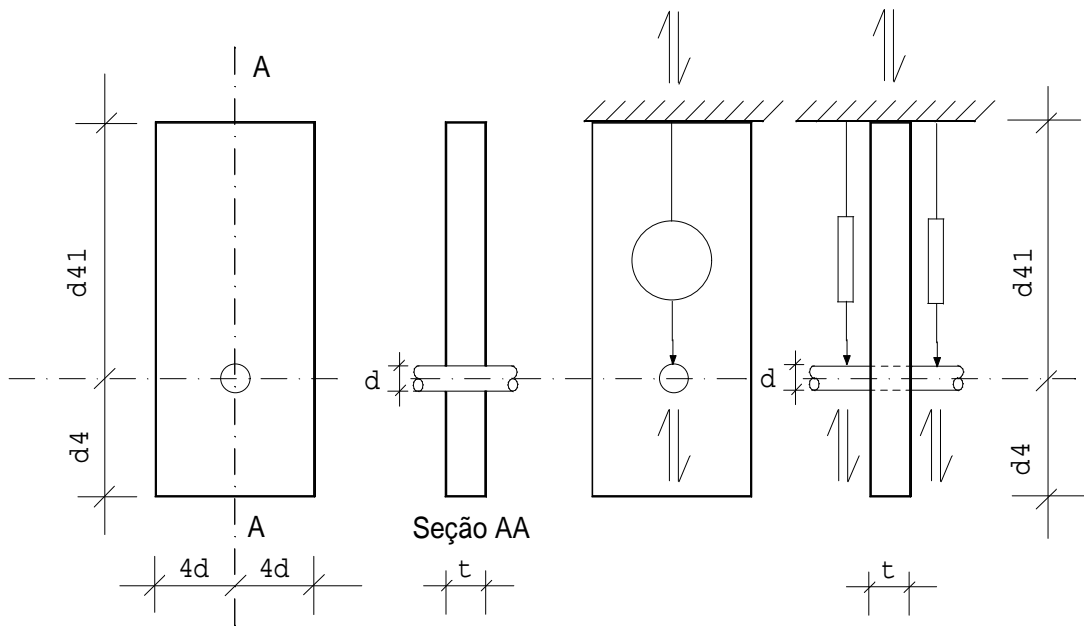


FIGURA 24 - Corpo-de-prova para ensaio de embutimento segundo a NBR 7190/97  
fonte - NBR 7190/97, anexo B

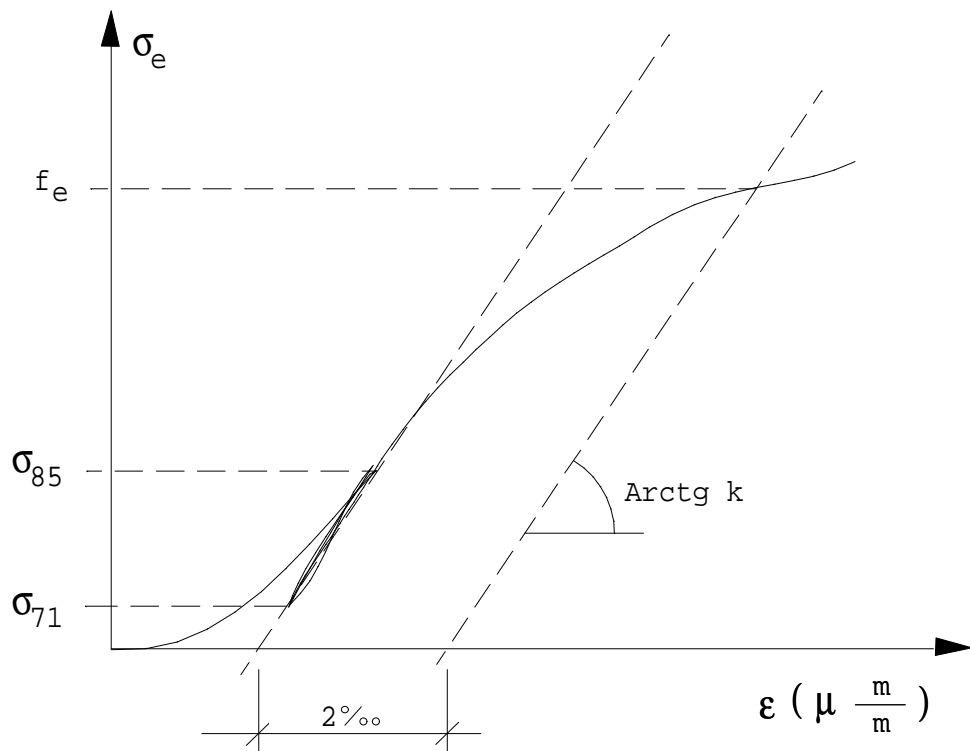


FIGURA 25 - Diagrama tensão×deformação específica de embutimento - fonte: NBR  
7190/97, anexo B

Segundo os procedimentos adotados pela NBR 7190/97 para os ensaios de embutimento, as medidas do deslocamento relativo devem ser feitas com uma base de referência de 14d. A resistência ( $f_{e\theta,est}$ ) deve ser estimada por meio do ensaio destrutivo de um corpo-de-prova gêmeo, selecionado da mesma amostra a ser investigada. Essa resistência estimada  $f_{e\theta,est}$  deve ser dada pela carga máxima do ensaio.

Conhecida a resistência de embutimento estimada,  $f_{e\theta,est}$ , o carregamento deve ser aplicado com dois ciclos de carga e descarga, de acordo com o procedimento especificado no diagrama da figura 26. A taxa de carregamento deve ser de 10 MPa por minuto;

Os registros das cargas e das deformações devem ser feitos para cada ponto do diagrama de carregamento mostrado na figura 26, e os ensaios devem ser feitos nas direções paralela e normal às fibras ( $\theta = 0^\circ$  e  $90^\circ$ ).

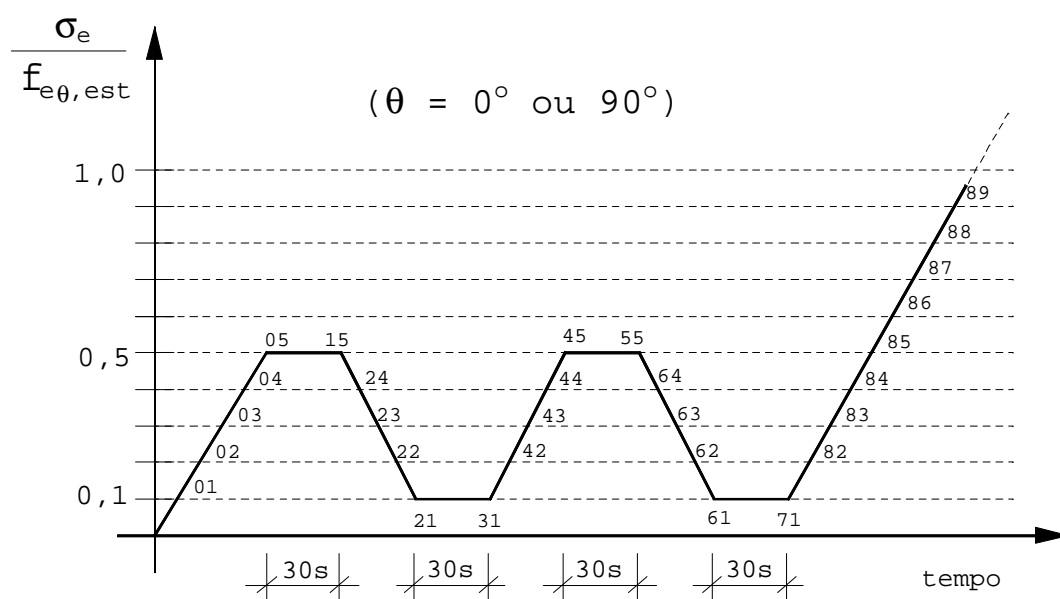


FIGURA 26 -Diagrama de carregamento para ensaio de embutimento segundo a NBR 7190/97 - fonte: NBR 7190/97, anexo B

De acordo com a NBR 7190/97, os resultados das resistências de embutimento nas direções paralela e normal às fibras devem ser apresentados com valores característicos, acompanhados dos respectivos teores de umidade. Estes valores devem ser apresentados em relatórios técnicos, especificados na seção 4 desta norma.

### 3.5.2. Método do prEN383/1993

O prEN 383, do Comitê Europeu de Normalização, especifica os métodos de laboratório para determinação da resistência ao embutimento, e fornece valores bases para madeira maciça, madeira laminada colada e chapas de derivados de madeira (compensado, etc.), com ligações por pinos metálicos.

Segundo o prEN 383, resistência ao embutimento é a tensão média de compressão quando aplicada carga máxima na peça de madeira ou de compostos de madeira sob ação de um pino linear rígido. O eixo do pino deve ser perpendicular à superfície da madeira, e o carregamento deve ser perpendicular ao seu eixo.

De acordo com o método de ensaio especificado pelo prEN 383, o corpo de prova deve ter forma retangular, prismática, de madeira ou derivado de madeira, com um pino posicionado com seu eixo perpendicular à superfície do corpo de prova. As dimensões dos corpos de prova são dadas na Tabela 6 e na figura 27. A espessura  $t$  deve estar entre  $1,5d$  e  $4d$  para atender os requisitos do ensaio.

Para chapas de madeira compensada, a espessura do corpo de prova deve ser a espessura em que o painel é produzido. Nos ensaios realizados neste trabalho, onde foram utilizadas as espessuras comerciais das chapas de compensado de 12mm e 18mm, e pinos de 4,4mm a 16mm, as relações entre espessura das chapas e o diâmetro do pino situam-se entre 0,75 e 4,1, não tendo sido observado nenhum problema no decorrer dos ensaios devido à relação  $t/d$ .

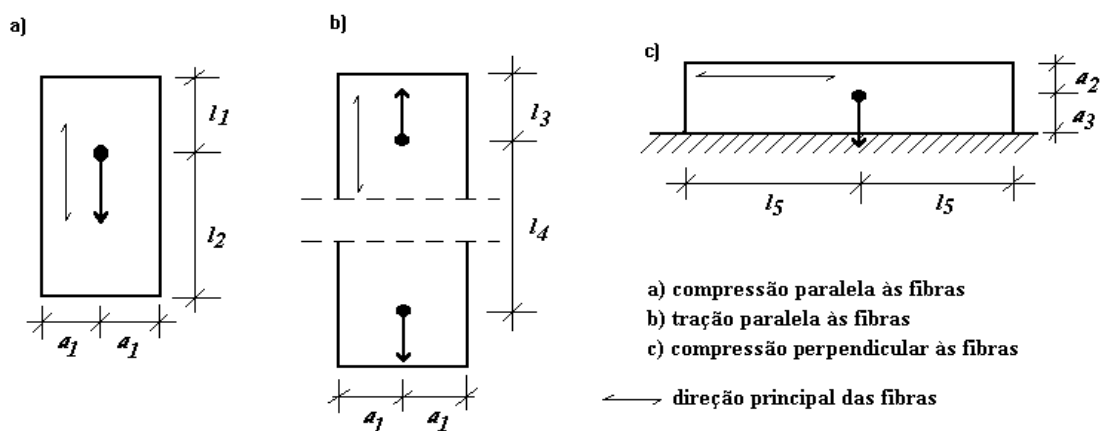


FIGURA 27 - Corpos de prova segundo o prEN 383 (1993) - fonte: prEN 383(1993)

Como pode ser observado na figura 27, o prEN 383 apresenta um corpo de prova para ensaio de embutimento perpendicular às fibras. Para ensaios em compensados, onde a laminação cruzada confere grande resistência nas direções paralela e perpendicular às fibras das lâminas da face, o corpo de prova para ensaios normais pode ser o mesmo utilizado para ensaios na direção paralela a estas fibras, sendo desprezado portanto o corpo de prova c) da figura 27. Ainda, a NBR 7190/97 especifica o mesmo corpo de prova para embutimento na direção normal e na direção paralela mesmo para a madeira maciça.

Os dispositivos de ensaio, segundo o prEN 383, devem ser tais que não haja atrito entre as placas metálicas e o corpo de provas que possam influenciar as medidas. O equipamento deve assegurar que não haja influência nos resultados relativos a excentricidades, torção, etc.

TABELA 6 - Dimensões e espaçamento dos pinos nos corpos de prova segundo o prEN383 - fonte: prEN383(1993)

medida	pregos sem pré-furação	pregos com pré-furação	parafusos	material do corpo de prova
a1	5d	5d	3d	compostos de madeira (madeira compensada)
l1	20d	12d	7d	
l2	20d	12d	7d	
l3	20d	12d	7d	
l4	40d	40d	30d	
a2	5d	5d	2d	madeira maciça ou com uma direção principal de fibras
a3	5d	5d	4d	
l5	20d	12d	7d	

O prEN 383 especifica as condições para a preparação dos corpos de provas: antes de posicionar o pino, a madeira deve ser acondicionada até atingir massa constante em ambiente com umidade relativa de  $(65\pm 5)\%$  e a temperatura de  $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ . Depois de produzido o corpo de prova, este deve ser acondicionado novamente no mesmo ambiente. Considera-se obtida a massa constante quando os resultados de duas pesagens consecutivas, no intervalo mínimo de 6h, não apresenta diferença maior que 0,1% da massa da peça.

Para a montagem dos corpos de provas de madeira, o conector deve ser posicionado no corpo de prova da mesma maneira que seria posicionado na prática, ou seja, com ou sem pré-furação para os pregos, com folga para os parafusos e justo para as cavilhas.

Especifica também que o corpo de prova deve ser posicionado simetricamente, e a carga deve ser aplicada no eixo do corpo de prova.

Como roteiro de ensaio, o prEN 383 especifica que na aplicação da carga, esta deve ser elevada até  $0,4F_{\text{máx,est}}$  e mantida por 30 segundos. A carga deve então ser reduzida para  $0,1F_{\text{máx,est}}$  e mantida por 30 segundos. Em seguida a carga pode ser aumentada até que a carga máxima seja alcançada, ou quando a deformação for  $w_0 + 5\text{mm}$ , onde  $w_0$  é a deformação inicial. A carga deve ser aumentada ou diminuída na mesma razão de constante de carregamento×tempo. Esta razão deve ser ajustada para que a carga máxima seja atingida com  $(300\pm 120)$  segundos, conforme a figura 28.

A leitura das deformações  $w_{01}$ ,  $w_{04}$ ,  $w_{11}$ ,  $w_{14}$ ,  $w_{21}$ ,  $w_{24}$ ,  $w_{26}$  e  $w_{28}$ , que correspondem aos pontos 01, 04, 11, 14, 21, 24, 26 e 28 como mostrado na figura 28, as curvas de carga×deformação devem ser plotadas para todos os corpos de prova. A deformação na carga máxima  $F_{\text{máx}}$  também deve ser lida. Quando a curva carga×deformação não é fornecida, medidas de deformação devem ser feitas a cada incremento de  $0,1F_{\text{máx,est}}$  na carga.

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:

$$f_e = \frac{F_{\text{max}}}{d \times t} \quad (3.42a)$$

$$f_{e,est} = \frac{F_{\text{max,est}}}{d \times t} \quad (3.42b)$$

Para as medidas de deformação, os seguintes valores, se relevantes, devem ser calculados:

$$\text{deformação inicial: } w_i = w_{04} \quad (3.43)$$

$$\text{deformação inicial modificada: } w_{i,mod} = 4/3(w_{04} - w_{01}) \quad (3.44)$$

$$\text{deformação elástica: } w_e = 2/3(w_{14} + w_{24} - w_{11} - w_{21}) \quad (3.45)$$

$$\text{módulo básico inicial: } K_i = \frac{0,4f_{e,est}}{w_i} \quad (3.46)$$

$$\text{módulo básico: } K_s = \frac{0,4f_{e,est}}{w_{i,mod}} \quad (3.47)$$

$$\text{módulo de elasticidade básico: } K_i = \frac{0,4f_{e,est}}{w_e} \quad (3.48)$$

deformação a  $0,6 F_{máx}$

deformação a  $0,8 F_{máx}$

A curva carga×deformação medida deve, se relevante, ser corrigida em função da curva de calibração do equipamento.

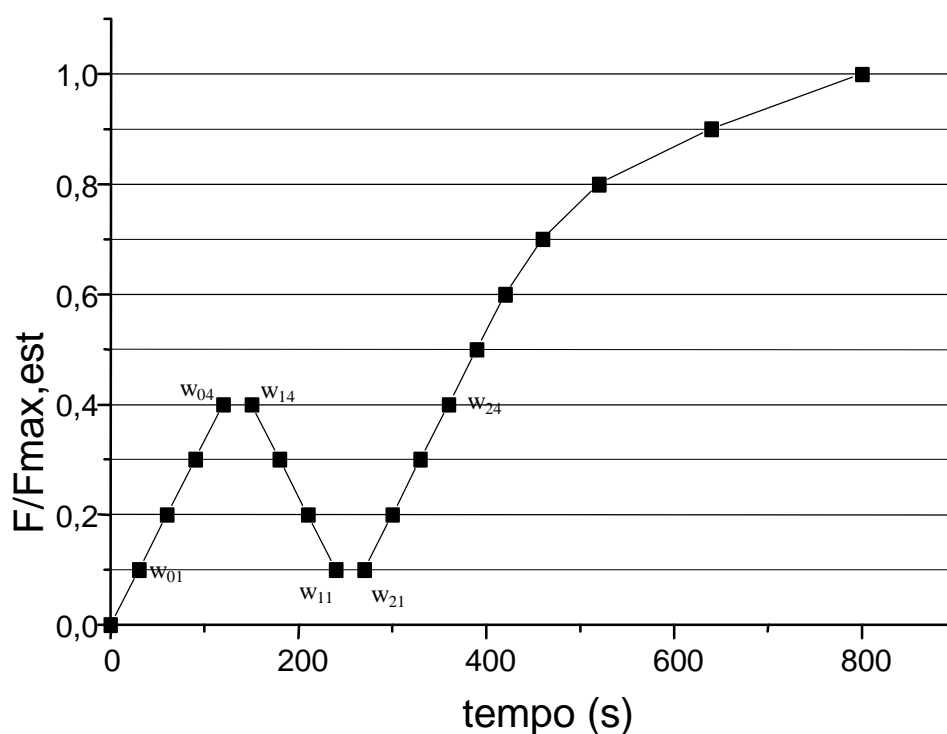


FIGURA 28 - Diagrama de carregamento para ensaio de embutimento segundo o prEN 383 (1993) - fonte: prEN383(1993)

A figura 28, extraída do prEN383(1993) apresenta uma pequena incoerência com o método de ensaio proposto no texto. O diagrama  $F/F_{max,est} \times tempo$ , deixa de ter acréscimos constantes de carregamento×tempo a partir de 400 segundos. O texto, porém, especifica que a carga deve ser aumentada ou diminuída na mesma razão constante de carregamento×tempo. Visando manter a fidelidade das informações obtidas nas fontes, a figura 28 foi representada de forma idêntica à apresentada no prEN.

### 3.5.3. Método de SMITH(1982)

Segundo SMITH(1982), a altura e a largura do corpo de provas de embutimento de pinos em madeira devem ser suficientes para prevenir falhas devido à fendilhamento com um pequeno embutimento, e a espessura pequena o bastante para assegurar que a deformação do pino devido à flexão seja desprezível. Contudo, a espessura do corpo de prova não pode ser pequena a ponto de ocorrer flambagem local na placa na região do conector, e a relação altura/espessura do corpo de prova não pode ser grande a ponto de permitir a perda de estabilidade do corpo de prova, que também pode ocorrer devido a uma assimetria geométrica ou assimetria devido à variabilidade do material.

Estes são claramente alguns conflitos entre o comportamento requerido e a escolha da geometria para o corpo de provas de embutimento. Outros fatores que influenciam a relação carga×embutimento segundo SMITH,1982 são:

- a) peso específico da madeira;
- b) direção do carregamento em relação às fibras;
- c) orientação dos anéis de crescimento e efeitos da classificação da peça de madeira;
- d) umidade da madeira no momento do ensaio;
- e) variação da umidade da madeira durante o ensaio quando este for de longa duração;
- f) geometria do conector;
- g) coeficiente de atrito da superfície do conector;
- h) método de confecção do corpo de prova;
- i) encaixe do conector se utilizada pré-furação;
- j) história do carregamento prévio da madeira;
- k) velocidade de carregamento.

Segundo o especificado por SMITH(1982) para a realização dos ensaios, o material do ensaio deve ser estocado antes da preparação do corpo de provas e novamente antes do ensaio em condições controladas de  $20\pm 3$  °C de temperatura e  $65\pm 2\%$  de umidade relativa do ar, até que o equilíbrio da umidade seja atingido. A umidade e o peso específico devem ser medidos após cada ensaio.



Para o carregamento, SMITH(1982) especifica que a carga a ser aplicada nos corpos de prova do ensaio deve ser de deslocamento contínuo de 0,05 inch./min. (1,27mm/min.). As medidas de carga×embutimento e deslocamento devem ser contínuas, com precisão de  $\pm 1\%$ .

A relação de deformação constante deve ser lida até que se atinja uma deformação de 12,5 mm ou ocorra uma falha prematura devido ao fendilhamento da madeira. A duração do ensaio, sem falhas prematuras, é de aproximadamente 10 minutos.(SMITH,1982)

Ainda segundo SMITH(1982), a pré-furação deve ser feita imediatamente antes do ensaio, e todos os furos devem ser bem ajustados com os pinos, sem grande folga e com superfície lisa.

SMITH(1982), que mediu o embutimento como sendo o deslocamento do topo de corpo de prova, onde foi aplicado o carregamento, em relação ao pino, afirma que as deformações medidas e embutimento real não são iguais. Pois, negligenciando a deformação do equipamento, a deformação do topo é dada por:

$$\text{deformação do topo} = \text{embutimento} + \text{encurtamento devido à compressão do C.P.} + \text{deformação devido à flexibilidade da máquina de ensaio}$$

Os resultados experimentais de WHALE & SMITH (1986a), forneceram dados para calibração de modelos de elementos finitos, para gerar informações sobre as propriedades características de ligações, pregadas ou parafusadas, necessárias para se escrever códigos normativos, tais como o BS 5268 Part 1 e o EUROCODE 5. Em seus ensaios, o acondicionamento dos corpos de prova e a metodologia dos ensaios foram idênticos ao realizado por SMITH(1982).

A folga nos furos dos corpos de prova de madeira para parafusos foi de 1,5 mm maior que o diâmetro nominal do parafuso. Cada prego foi posicionado manualmente nos corpos de prova, tomando-se o cuidado de mantê-lo perpendicular ao corpo de prova e que não causasse danos no mesmo. Foi feita pré-furação com broca de 0,8d para corpos de prova de madeiras duras.

Segundo WHALE & SMITH (1986a), os ensaios de embutimento são sensíveis ao detalhamento dos dispositivos de ensaio, especialmente nos estágios iniciais, afirmando que os dispositivos normalizados devem ser adaptados.

No trabalho de WHALE & SMITH (1986b), foram incorporados no programa de testes quatro painéis de compensado produzidos a partir de diferentes espécies de madeira: compensados de Finish birch, North American Douglas Fir, Finish spruce e French pine. Cada chapa de compensado foi produzida com lâminas de uma mesma espécie de madeira. A espessura comercial das chapas de compensado foram utilizadas para os corpos de prova. Os resultados foram distribuídos ao longo de artigos técnicos e implementados nos itens de cálculo de ligações do EUROCODE 5

As verificações dos modelos teóricos desenvolvidos por WHALE & SMITH (1986b) foram adicionalmente reforçadas por experimentos. Os ensaios com compensado foram realizados em uma ampla gama de geometrias e materiais variados. Entre estes, foram realizados 100 ensaios em ligações de madeira maciça com madeira compensada. Adicionalmente, 80 ensaios de embutimento foram realizados com compensados produzidos com lâminas de espécies de madeira diferentes. Estes foram incorporados para verificar o método proposto de previsão de propriedades de embutimento de compensados montados arbitrariamente, baseados no conhecimento de suas propriedades totais.

#### **3.5.4. Método de ALMEIDA(1987)**

ALMEIDA(1987) propôs um método de ensaio com carregamentos monotônicos, onde considerou dois limites de referência para os ensaios, determinando-se o primeiro limite pelo início do deslizamento controlado e o segundo limite pelo fim do deslizamento controlado.

ALMEIDA(1990) considerou como carga de primeiro limite o valor correspondente ao aparecimento de um deslizamento de 0,02 mm, sob carga constante, e como carga de segundo limite aquela correspondente a um deslizamento de 0,1 mm. Esses valores foram adotados após sistemáticas investigações experimentais comparando os valores dos ensaios rápidos com crescimento contínuo de carregamento e ensaios rápidos com incrementos de carga aplicados em intervalos de tempo iguais.

O ensaio cíclico repetitivo comprovou o método de ensaio proposto para a determinação da carga correspondente ao fim do regime elástico, comprovando também que não há nenhuma influência significativa do atrito entre as peças, até o início do deslizamento controlado, na resistência e rigidez da ligação.

ALMEIDA(1987) utilizou três tipos de corpos de prova em seus ensaios:

Tipo I: três peças de madeira; (compressão)

Tipo II: duas peças metálicas e um corpo de prova de madeira;(compressão)

Tipo III: quatro peças metálicas e dois corpos de prova de madeira. (tração)

### **3.6. RESULTADOS DE ENSAIOS ENCONTRADOS NA BIBLIOGRAFIA**

---

Os vários ensaios com os corpos de prova do tipo III (de tração), realizados por ALMEIDA(1990) mostram que eles apresentam rupturas diferentes daquelas existentes nos corpos de prova tipos I e II submetidos à compressão.

Nos ensaios de compressão, em virtude do atrito entre o corpo de prova e os pratos da máquina de ensaio, formam-se mecanismos resistentes que impedem o fendilhamento da madeira e, com isso, altera-se o modo de ruptura da peça. Este mecanismo não ocorre quando o corpo de prova é submetido à tração.

Deste modo, ALMEIDA(1990) recomenda que o corpo de prova a ser adotado para as futuras investigações da resistência ao embutimento devem ser do tipo III. É importante lembrar que esta conclusão é devida à restrição ao fendilhamento causada pelo confinamento do topo do corpo de prova no prato da máquina de ensaio. Como o fenômeno do fendilhamento não ocorre no compensado, a utilização de ensaios de embutimento por compressão não incorporaria tais distorções nos resultados finais.

ALMEIDA(1990) verificou, através dos resultados dos ensaios, que a relação entre espessura da peça de madeira e o diâmetro do pino ( $\beta=t/d$ ), para madeiras de alta resistência, tem um valor limite em torno de dois, pois, para as relações com valores menores de dois, a resistência de embutimento tende a ser menor que a resistência à compressão paralela ou normal às fibras, dependendo do caso em questão.

BATISTA(1996) realizou ensaios de embutimento em cinco espécies de madeiras: Jatobá, Cupiúba, Garapa, Pinus Elliotti e Eucalipto Citriodora, utilizando a metodologia apresentada pela NBR 7190/97, encontrando valores que discordam da afirmação de ALMEIDA(1990).

Baseado em seus ensaios, ALMEIDA(1987) afirma que a ligação por pregos apresentou um comportamento de um sólido elástico, durante o transcorrer de um ensaio repetitivo. Através dos diagramas obtidos nos ensaios, conclui que o modelo matemático adotado para a determinação das cargas de primeiro e segundo limites fornece bons resultados.

SMITH(1982) realizou ensaios com corpos de prova de European whitewood (spruce) com um único pino metálico circular, de 4 mm, 8 mm ou 16 mm de diâmetros, em um furo de mesmo diâmetro, onde o conector carrega a madeira paralela ou perpendicular às fibras. Para o conector de 4 mm foram ensaiados corpos de prova com duas espessuras e para conectores de 8 e 16 mm com três espessuras.

SMITH(1982) admite que a porção côncava inicial da curva carga×embutimento seja devido à um posicionamento desigual do conector na superfície do furo, devido à ocupação de alguma folga entre o pino e o furo e/ou irregularidades na sua superfície ou acomodação da base do corpo de provas nos pratos da máquina.

Analisando os resultados experimentais, SMITH(1982) conclui que, para todos os corpos de prova ensaiados, a relação média carga×embutimento pode ser bem modelada pela expressão:

$$P = (P_0 + P_1 w)(1 - \exp(-kw/P_0)) \quad (4.50)$$

onde: P é carga por unidade de comprimento para um embutimento w

$P_0$ ,  $P_1$  e k são constantes, cujos valores não são apresentados pelo autor.

Afirma ainda que as relações individuais carga×embutimento não seriam bem modeladas por alguma simples expressão explícita, a menos que a expressão tivesse muitos graus de liberdade.

As seguintes conclusões foram encontradas por SMITH(1982):

i) O efeito da espessura do corpo de prova pode ser observado como resultado de:

- a) deformação por flexão do pino;
- b) efeito de volume;
- c) erro na medida do embutimento

A influência de a) depende da espessura do corpo de provas e da eficácia do engastamento das extremidades aplicadas ao conector.

ii) A deformação por flexão devida ao material do conector tem a maior influência nos resultados dos testes de conectores de pequeno diâmetro. A deformação por flexão é considerada como sendo a principal causa do efeito de espessura observado para os corpos de prova de conectores de 4 mm de diâmetro.

iii) Se o conector for tensionado além da sua tensão de escoamento, em qualquer estágio do ensaio, a influência da deformação devido à flexão do conector deverá ser maior nos pequenos embutimentos.

iv) O efeito de volume, associado com o incremento da espessura do corpo de prova, somente é observado se uma madeira sujeita a imperfeições for incluída entre os corpos de prova. O efeito do volume é considerado como sendo a principal causa no efeito de espessura no corpo de provas para conectores de 16 mm de diâmetro.

SMITH(1982) ainda afirma que, quando o conector carrega a madeira perpendicularmente às fibras, não há efeito significativo da espessura do corpo de prova para qualquer um dos corpos de prova testados.

A densidade da madeira foi utilizada como base para a extrapolação dos resultados do embutimento para outras espécies que não foram testadas neste trabalho.

WHALE & SMITH (1986a), realizaram ensaios de ligações reais de madeira maciça com madeira maciça e de madeira maciça com chapas de fibra de madeira, com pregos e parafusos. Os resultados foram comparados com os obtidos a partir do modelo teórico e do modelo de elementos finitos, onde utilizou as características de embutimento obtidas dos ensaios dos respectivos materiais como parâmetros de entrada nesses modelos teóricos.

---

Como foi previamente encontrado por SMITH(1982), para ligações com pinos metálicos de seção circular, WHALE & SMITH(1986a) também mostraram que com seu método é possível estabelecer a rigidez inicial da ligação com aproximação de  $\pm 20\%$  e a carga última de ruptura com  $\pm 10\%$ .

Os ensaios das ligações tiveram suas conclusões sustentadas por ensaios em duas vigas dimensionadas segundo critérios de códigos normativos, onde os resultados dos ensaios das ligações foram capazes de prever a rigidez da ligação com a precisão mencionada acima.

Deve-se observar que, embora o compensado possua uma maior densidade seca, em comparação às madeiras maciças, o ajuste por regressão linear para os dados do compensado são razoavelmente próximos aos obtidos pela regressão linear dos dados de madeira maciça. Os autores afirmam que é possível, portanto, que o aumento das propriedades de resistência dos compensados possam ser tomadas como uma função relacionada com a densidade relativa derivada das espécies de madeira maciça, e a adoção de uma extrapolação da curva pode ser considerada.

Os corpos de prova de embutimento do compensado foram condicionados, fabricados e testados da mesma forma que os realizados por SMITH(1982) e WHALE & SMITH(1986a). Baseado em todas as comparações, concluíram que as propriedades de embutimento para compensados montados arbitrariamente podem ser previstas satisfatoriamente pelo uso de métodos de extrapolação puramente baseados na densidade do compensado como um todo.

Segundo WHALE & SMITH (1986b), para compensados com pregos de diâmetro menor que 4mm, não houve diferenças significativas entre as propriedades de embutimento das chapas solicitadas paralela ou perpendicularmente às fibras.

---

## 3.7. CRITÉRIOS DE SEGURANÇA NAS LIGAÇÕES

---

### 3.7.1. Estados Limites

A norma brasileira para projeto e dimensionamento de estruturas de madeira, NBR 7190/97, se baseia nos conceitos de estados limites para o dimensionamento das estruturas de madeira. A seguir estão transcritos alguns trechos desta norma, onde estão definidos estes conceitos:

“Estados limites

Estados Limites de uma Estrutura

Estados a partir dos quais a estrutura apresenta desempenhos inadequados às finalidades da construção.

Estados Limites Últimos

Estados que, por sua simples ocorrência, determinam a paralisação, no todo ou em parte, do uso da construção.

No projeto, usualmente, devem ser considerados os estados limites últimos caracterizados por:

- a) perda de equilíbrio, global ou parcial, admitida a estrutura como corpo rígido;
- b) ruptura ou deformação plástica excessiva dos materiais;
- c) transformação da estrutura, no todo ou em parte, em sistema hipostático;
- d) instabilidade por deformação;
- e) instabilidade dinâmica (ressonância).

Estados Limites de Utilização

Estados que por ocorrência, repetição ou duração causam efeitos estruturais que não respeitam as condições especificadas para o uso normal da construção, ou que são indícios de comprometimento da durabilidade da construção.

No projeto, usualmente devem ser considerados os estados limites de utilização, caracterizados por:

- a) deformações excessivas, que afetem a utilização normal da construção, comprometam seu aspecto estético, prejudiquem o funcionamento de equipamentos ou instalações ou causem danos aos materiais de acabamento ou às partes não estruturais da construção;
- b) vibrações de amplitude excessiva que causem desconforto aos usuários ou causem danos à construção ou ao seu conteúdo.”

Segundo WHALE & SMITH (1986a), para a filosofia do dimensionamento pelos estados limites ser corretamente implementada, é necessário o conhecimento das características de carga×deformação e das propriedades de resistência de vários tipos de ligações mecânicas. A má modelação de tais características pode corromper os estados limites de resistência e de utilização em suas equações para componentes da madeira.

De acordo com ALMEIDA(1987), pelo fato de a ligação pregada apresentar excessivas deformações após a fase elástica, considera-se como ruína da emenda a ocorrência de deslizamentos com plastificações exageradas. O Estado Limite Último de resistência das uniões pregadas é definido pelo final do deslizamento controlado. Este estado foi identificado em função das análises realizadas nos ensaios preliminares e nos ensaios cíclicos repetitivos, realizados em seu trabalho. Tais ensaios mostraram que o comportamento da ligação além do segundo limite é inadequado para o uso da estrutura, pois, mesmo para carregamentos constantes, os deslizamentos crescem progressivamente, acarretando grandes deformações, que, com o tempo, comprometem a segurança da estrutura, particularmente em virtude do efeito subjetivo que o estado de deformações exageradas acarreta.

ALMEIDA(1987) afirma que a ocorrência do estado limite último de plastificação das emendas, em geral, não acarreta colapso das estruturas. No entanto, esse estado se constitui em estado limite último para a certificação da segurança sob a ação de carregamentos especiais ou de construção, definidos na norma de Ações e Segurança nas Estruturas pois, sob a ação desses carregamentos, não se pode admitir que o equilíbrio dependa do aparecimento de grandes deformações permanentes.

O valor da carga máxima de ensaio com efeitos de segunda ordem, segundo ALMEIDA(1987), deve ser considerado para o caso de uma ação excepcional. Deste modo definiu:

$F_{1L}$  : Primeiro limite ou início do deslocamento controlado;

$F_{2L} = F_u$  segundo limite, que deve ser considerado como sendo a carga última da ligação pregada para carregamentos normais e especiais ou de construção.

$F_{máx} = F_{ruptura}$  : Carga de ruptura da ligação, somente considerada para as cargas excepcionais.



A ruptura da emenda por fendilhamento representa o aparecimento de um Estado Limite Último, pois não se pode garantir a estabilidade da estrutura após a ocorrência deste fendilhamento. A segurança relativa ao estado limite último de fendilhamento não é garantida na fase de cálculo da estrutura, mas sim pelo respeito às regras construtivas referentes à pré-furação, ao espaçamento entre os pregos e aos afastamentos relativos às bordas das peças da ligação. (ALMEIDA,1987)

Para os Estados Limites de Utilização deve ser garantida a segurança em relação ao início de plastificação das emendas, ou seja, início do deslizamento controlado, garantindo-se assim o comportamento elástico da ligação.

Para o dimensionamento das uniões, as cargas teóricas de primeiro e de segundo limites devem ser afetadas por coeficientes de minoração das resistências. (ALMEIDA,1987)

---

### 3.8. 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 à flexão do pino e da resistência ao embutimento da madeira. Tanto na ruptura por flexão do pino quanto no embutimento na madeira o comportamento é plástico. O efeito do atrito entre as peças é desprezível.

3) A resistência ao embutimento do compensado é fortemente afetada pela espessura da peça de madeira, pelos espaçamentos entre pinos, borda e extremidade, pela pré-furação, e depende das características da madeira, sendo a densidade e a resistência à compressão paralela os parâmetros mais utilizados na elaboração de fórmulas para determinação do embutimento.

4) Para as ligações pregadas, deve sempre ser feita a pré-furação antes da cravação, com diâmetro levemente inferior ao do prego. Ao ser cravado, o prego induz um estado múltiplo de tensões no entorno do furo, mesmo sem a aplicação de carregamento externo. Quando esta pré-furação não é bem feita, pode ocorrer o fendilhamento da ligação ainda no ato de cravação do prego.

5) Nas ligações parafusadas, pequenas variações na relação entre o diâmetro do furo e o diâmetro do parafuso podem causar variações significativas nas tensões na vizinhança do furo. Decrescendo essa relação, a tensão no contato entre pino e furo é acrescida. O comportamento dessa ligação é altamente não linear pois, com o aumento da carga, aumenta a área de contato devido à cravação do pino na madeira.

6) Apesar da não linearidade do comportamento do embutimento, bem como a não linearidade da distribuição das cargas entre a madeira e o pino, todos os autores consideram estes parâmetros como lineares, já que as relações carga×embutimento só seriam bem expressas por uma expressão explícita, se esta tivesse grande número de parâmetros.

7) Os modos de ruptura que ocorrem nas peças de madeira devido ao embutimento de pinos metálicos são esmagamento e esmagamento com fendilhamento, e, a menos que se utilize técnicas especiais, não é possível prever em que estágio do carregamento se iniciou a ruptura da madeira, ou em qual estágio as rupturas existentes se propagaram.

8) A distribuição das tensões nos ensaios de embutimento por tração é bastante diferente da distribuição das tensões de embutimento de ensaio de compressão. A distribuição de tensões por embutimento por tração de pregos em madeira compensada se aproxima das características de tensão de embutimento de compressão.

9) O corpo de prova deve ter largura e a altura suficientes para prevenir o fendilhamento com um pequeno embutimento, e a espessura deve ser pequena o suficiente para que a deformação devido à flexão do pino metálico seja desprezível, porém grande o suficiente para prevenir a flambagem, tanto global quanto local, do corpo de prova. As espessuras comerciais dos compensados devem ser as utilizadas nos corpos de prova.

10) Pode-se concluir, segundo apresentado em algumas normas internacionais, que o embutimento na madeira compensada tem um comportamento diferenciado em relação à madeira maciça, sendo que essas normas apresentam coeficientes de majoração da resistência ao embutimento para compensado, além de permitir menores espaçamentos entre pinos, bordas e extremidades e dispensar a pré-furação. Esse comportamento deve-se ao fato de o compensado ter um comportamento mais próximo de um material isotrópico que a madeira maciça, e ter menor tendência ao fendilhamento. Apesar dessa diferenciação, resultados de ensaios relatados na bibliografia afirmam que a curva carga×embutimento pode ser prevista pelo mesmo equacionamento utilizado para madeira maciça, mesmo para compensados montados com lâminas de diferentes espécies, posicionadas aleatoriamente.

## 4. METODOLOGIA

A metodologia adotada para a determinação da resistência ao embutimento da madeira compensada, objeto de estudo deste trabalho, é baseada 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, a metodologia especificada nesta norma não é diretamente aplicável para madeira compensada. Assim, algumas adaptações foram feitas baseadas no estudo da bibliografia e estão propostas como método de ensaio de embutimento de pinos metálicos para a madeira compensada.

Entre essas adaptações está a espessura do corpo de prova, que foi adotado como sendo a espessura comercial em que são produzidas estas chapas, como é proposto pelo prEN383(1993). Outra particularidade da madeira compensada é a alta resistência ao fendilhamento e ao cisalhamento em relação à madeira maciça, podendo ser diminuídas as outras dimensões do corpo de prova, sem que se corra o risco de uma ruptura precoce antes de uma deformação por embutimento satisfatória. Nos ensaios realizados neste trabalho, porém, os corpos de prova foram moldados com as relações altura,largura/diâmetro do pino especificadas pela NBR 7190/97 para madeira maciça, apresentadas na figura 29.

A metodologia utilizada nos ensaios de embutimento deste trabalho está descrita a seguir, já incluídas as adaptações necessárias à execução dos ensaios em madeira compensada.

Todos os ensaios de embutimento foram realizados na Máquina Universal DARTEC; trata-se de uma máquina universal de ensaios, com capacidade para 100kN, servocontrolada, ligada a um computador que, por meio de um software específico, gerencia as operações do atuador e faz as leituras de carga e deformações automaticamente.

Os ensaios de embutimento foram realizados em oito chapas de madeira compensada compostas de diferentes números de lâmina, adesivos, matéria prima etc. produzidas por quatro indústrias diferentes. São elas:

TABELA 7 – Descrição das chapas de compensado utilizadas nos ensaios

Fabricante	Tipo	Espessura nominal (mm)	No. De lâminas
Gethal	Plastificado/formas	18	9
Gethal	Plastificado/formas	12	7
Formplus	Plastificado/formas	18	13
Formplus <sup>2</sup>	Plastificado/formas	18	9
Dissenha	Plastificado/formas	18	10
Dissenha	Plastificado/formas	12	8
Dissenha	Naval	15	10
Wagnerit	Plastificado/formas	18	9

Com essa variedade de chapas, buscou-se avaliar a variabilidade das propriedades de embutimento do compensado em função de sua produção, número de lâminas, qualidade do adesivo, espessura, etc.. Para tanto, também foram executados ensaios de caracterização das chapas de compensado segundo as normas ABNT.

Segundo a NBR 7190/97, a resistência de embutimento ( $f_{we}$  ou  $f_e$ ) é definida pela razão entre a força  $F_e$  que causa a deformação específica residual de 2‰, e a área de embutimento do pino  $A_e=td$ , determinada no ensaio do corpo-de-prova mostrado na figura 29.

As resistências de embutimento nas direções paralela e normal às fibras das lâminas das faces do compensado,  $f_{e0}$  e  $f_{e90}$ , em MPa, devem ser determinadas a partir do diagrama tensão×deformação específica de embutimento mostrado na figura 30. Estas resistências são dadas pelas expressões:

$$f_{e0} = \frac{F_{e0}}{td} \quad (4.01)$$

$$f_{e90} = \frac{F_{e90}}{td} \quad (4.02)$$

onde:

- $F_{e0}$  e  $F_{e90}$  são as forças aplicadas respectivamente nas direções paralela e normal às fibras das lâminas das faces do compensado, correspondentes às deformações residuais de  $\varepsilon=2\%$ , em Newton (N);
- $t$  é a espessura do corpo-de-prova, em centímetros (cm);
- $d$  é o diâmetro do pino, em centímetros (cm).

Para a madeira compensada, o corpo-de-prova para a resistência de embutimento pode ser o mesmo para a aplicação da carga na direção paralela e normal às fibras das faces do compensado; este corpo de prova deve ter forma prismática, de seção retangular de  $8d$  de largura, comprimento de  $18d$  e espessuras, como já foi dito, devem ser tomadas as comerciais em que a chapa é produzida, como indicado na figura 29.

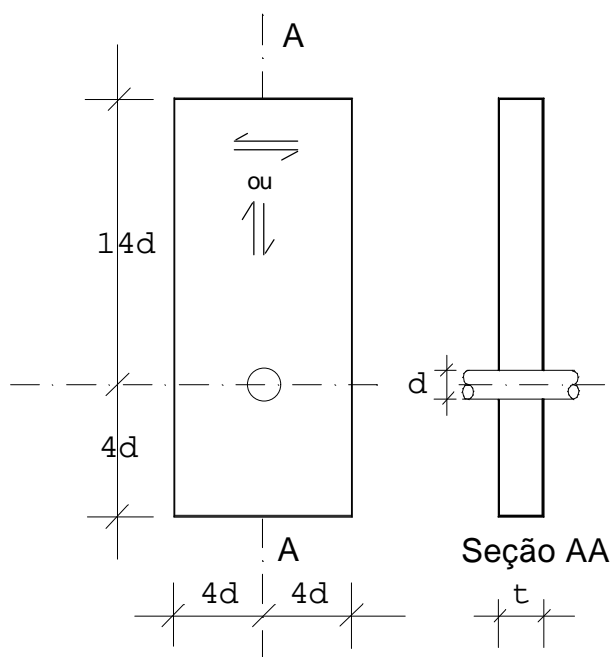


FIGURA 29 - Corpo-de-prova para ensaio de embutimento segundo a NBR 7190/97 - fonte - NBR 7190/97, anexo B

<sup>2</sup> Esta chapa foi denominada neste trabalho de formplus 20, devido à sua espessura média ser de 19,5mm, apesar de ser comercializado como sendo de 18mm de espessura

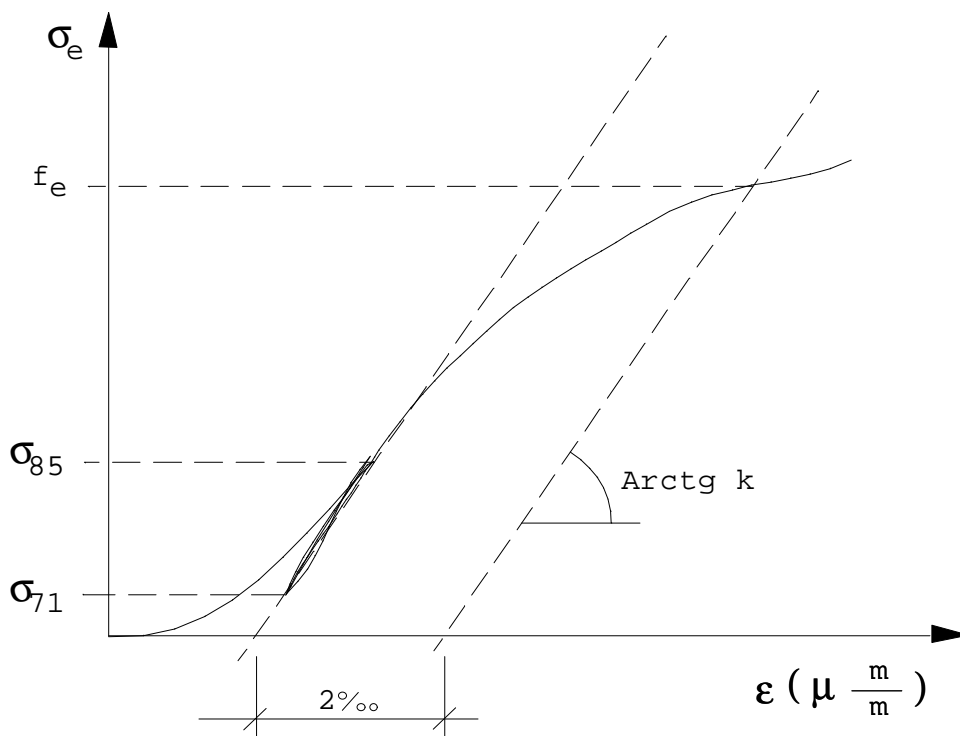


FIGURA 30 - Diagrama tensão×deformação específica de embutimento - fonte: NBR 7190/97, anexo B

Os seguintes procedimentos devem ser adotados segundo a NBR 7190/97:

- para a determinação da resistência de embutimento as medidas dos lados dos corpos-de-prova devem ser feitas com precisão de 0,1 mm ;
- a NBR 7190/97 recomenda que, para a determinação da deformação específica, devem ser feitas medidas do deslocamento relativo entre o pino e a extremidade do corpo-de-prova, em duas faces opostas do corpo-de-prova. Não se utilizou esse procedimento devido à condição do equipamento (máquina universal DARTEC), onde se fizeram as leituras eletronicamente pelos sensores do equipamento, que medem o deslocamento absoluto dos pratos da máquina, conforme a figura 31;

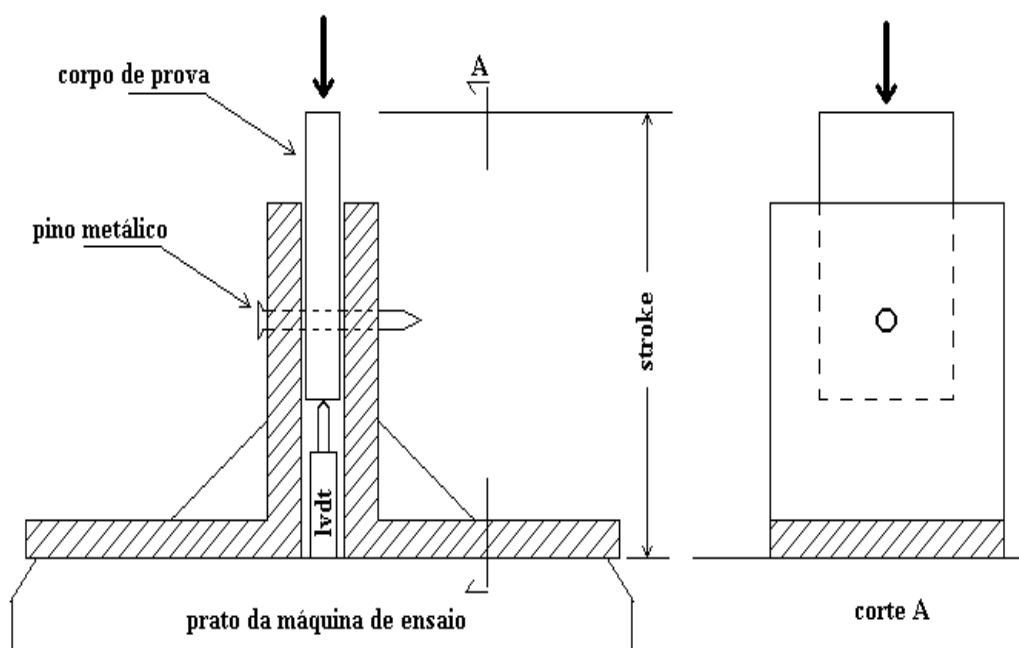


FIGURA 31 - Dispositivo utilizado nos ensaios de embutimento - fonte: do autor

- c) as medidas do deslocamento relativo devem ser feitas por transdutores de deslocamentos com precisão de 0,01 mm, com uma base de referência de  $14d$ , não havendo necessidade de serem corrigidas pela subtração da correspondente deformação total da máquina de ensaio (efeito mola). Essa correção somente deve ser feita se a deformação da máquina de ensaio for significativa, podendo por isso alterar o valor da resistência de embutimento em mais de 5% ;
- d) para as medidas dos deslocamentos relativos utilizaram-se os recursos da máquina universal Dartec, onde os deslocamentos dos pratos da máquina (stroke), correspondentes ao comprimento de referência de  $14d$ , são medidos automaticamente pelo transdutor existente no atuador (stroke). Também utilizou-se, em alguns ensaios, um transdutor posicionado de forma a medir o deslocamento absoluto entre a região da madeira descarregada e um ponto fixo externo (lvdt), conforme a figura 31, sendo estas duas medidas feitas com precisão de  $10^{-2}$ mm e  $10^{-5}$ mm respectivamente;
- e) para o ensaio de embutimento deve ser estimada a resistência ( $f_{e\theta,est}$ ) por meio do ensaio destrutivo de um corpo-de-prova gêmeo, selecionado da mesma amostra a ser investigada;
- f) a resistência estimada  $f_{e\theta,est}$  é dada pela carga máxima do ensaio preliminar no caso de ruptura da madeira, ou pela estimativa do limite de proporcionalidade no caso de deformação excessiva da madeira;



- g) conhecida a resistência de embutimento estimada,  $f_{e\theta,est}$ , o carregamento deve ser aplicado com dois ciclos de carga e descarga, de acordo com o procedimento especificado no diagrama da figura 32. A taxa de carregamento deve ser de 10 MPa por minuto;
- h) para o ajuste do corpo-de-prova na máquina de ensaio deve-se utilizar uma rótula entre o atuador e o corpo-de-prova;
- i) os registros das cargas e das deformações são feitos automaticamente pelos sensores da Máquina Dartec, sendo realizadas aproximadamente 6 leituras por segundo, de onde pode se obter a curva carga×deslocamento correspondente ao carregamento mostrado na figura 32; esta seqüência de carregamento e descarregamento especificada pela NBR 7190/97 foi programada no software que gerencia as operações da máquina, cumprindo rigorosamente as recomendações de norma;
- j) foram realizadas três repetições para cada ensaio, fazendo uma quarta quando a diferença entre os resultados das três primeiras ultrapassaram 20%;
- k) os ensaios foram feitos nas direções paralela e normal às fibras da face do compensado ( $\theta = 0^\circ$  e  $90^\circ$ ).

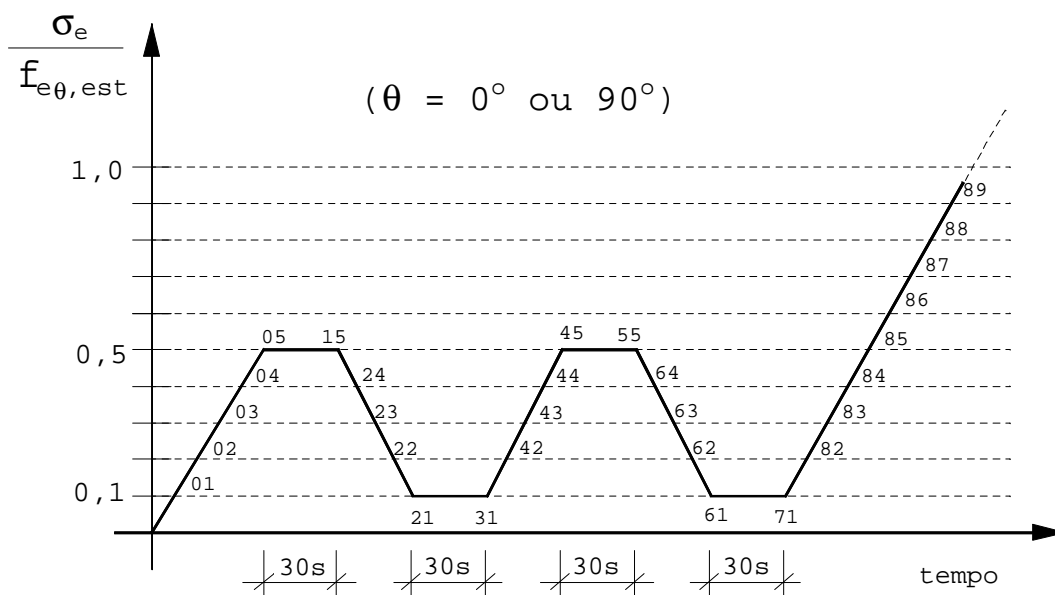


FIGURA 32 - Diagrama de carregamento para ensaio de embutimento segundo a NBR 7190/97 - fonte: NBR 7190/97, anexo B

Foram realizados inicialmente ensaios para avaliar os efeitos da pré-furação, utilizado-se corpos de prova para pregos de 4,4mm, pré furando-se os corpos de prova com 50%, 70% 80% 90% e 100%, além de ensaios com corpos de prova sem pré-furação.

Nos primeiros ensaios, foram feitas leituras pelo stroke da máquina e pelo lvdt (ver figura 31), a fim de analisar a influência da deformação do corpo de prova devido à compressão, na leitura do deslocamento puramente por embutimento. Concluiu-se desta análise que as medidas poderiam ser feitas apenas pelo stroke, facilitando a realização dos ensaios.

Os ensaios de embutimento foram realizados com pregos de diâmetros 4,4mm, 5,4mm e 6,4mm e parafusos de 10mm, 12,5mm e 16mm, que representam uma gama de variação de  $\beta$  de 0,75 a 4,5. Os corpos de prova para ensaios de embutimento de pregos foram pré-furados com brocas de 0,85d, por ser o recomendado pela NBR 7190/97 para coníferas, apesar de ter sido verificado nos ensaios iniciais que a pré-furação não influencia a resistência ao embutimento.

Todas as chapas utilizadas foram ensaiadas à compressão, visando caracterizar o material e auxiliar na análise da resistência ao embutimento nestes materiais. Os corpos de prova utilizados nos ensaios de compressão normal e paralela foram de 1,8cm×1,8cm de base, por 6,0cm de altura, para as chapas de 18mm, de 1,5cm×1,5cm de base por 4,5cm de altura para compensados de 15mm e de 1,2cm×1,2cm de base por 3,5cm para as chapas de 1,2cm de espessura.

Devido à inexistência de uma norma brasileira específica para ensaio de compressão em madeira compensada, foram realizados alguns ensaios preliminares para observar o comportamento deste material na compressão. Em primeiro lugar observou-se que a ruptura do corpo de prova se deu após grandes deformações, semelhante ao que ocorre nos ensaios de compressão normal na madeira maciça. Devido a essa observação, adotou-se como resistência à compressão, a tensão que provoca uma deformação residual de 2‰ no corpo de prova, semelhante ao método da NBR 7190/97 para a análise dessa solicitação. Utilizou-se como comprimento de referência o comprimento total do corpo de prova, e o valor da deformação lido pelo stroke da máquina DARTEC.

Como segunda observação, verificou-se que a resistência à compressão do compensado na direção perpendicular às fibras das lâminas de face é equivalente à da direção paralela. Assim, os corpos de prova na direção normal foram preparados com as mesmas dimensões dos corpos de prova da direção paralela, como apresentado anteriormente.

Para completar a caracterização do compensado, todas as chapas foram caracterizadas segundo as normas ABNT específicas para madeira compensada. Estes ensaios foram de:

- Determinação do teor de umidade (NBR 9584/85);
- Determinação da massa específica aparente (NBR 9485/85);
- Determinação da absorção de água (NBR 9486/85);
- Determinação da resistência à flexão estática (NBR 9533/86);
- Determinação da resistência da colagem ao esforço de cisalhamento (NBR 9534/86);
- Determinação do inchamento (NBR 9535/96).

Paralelamente à análise experimental, foi realizada uma modelação numérica, por elementos finitos, utilizando o software para análises numéricas ANSYS 5.2, disponível no departamento de Engenharia de Estruturas (SET). Nessa análise, foram testados vários tipos de elementos discretos apresentados pelo programa, considerando o problema plano e espacial. Foi simulado o ensaio de embutimento considerando o compensado como material de comportamento puramente elástico e de comportamento elasto-plástico.

O objetivo dessa análise numérica é calibrar um modelo numérico para futuras simulações do comportamento do compensado em dimensionamento de estruturas. Algumas simplificações utilizadas pelos equacionamentos teóricos foram testadas, a fim de analisar sua validade. Considerações sobre a ortotropia ou isotropia do material também foram analisadas com estas modelagens.

Esta etapa foi realizada junto com a análise experimental devido à necessidade do conhecimento das propriedades de resistência e elasticidade para a formulação do modelo teórico.

## 6. CONCLUSÕES

A madeira compensada se apresenta como uma ótima solução para ser utilizada em grandes estruturas, onde seriam necessárias peças de madeira maciça de grandes seções, que elevariam os custos e inviabilizariam sua utilização. Com a madeira compensada, as estruturas de madeira passam a contar com uma tecnologia que reúne alta qualidade, durabilidade e otimização, quesitos necessários para a evolução das estruturas de madeira, tornando-as modernas e altamente competitivas no atual mercado brasileiro e mundial.

Neste trabalho, várias considerações foram feitas a respeito das características do compensado, entre as quais destaca-se a laminação cruzada, característica que o diferencia dos outros derivados da madeira, propiciando ao material alta resistência ao cisalhamento e ao fendilhamento, equilíbrio entre as propriedades de resistência e rigidez nas direções paralela e normal às fibras das lâminas de face, resistência ao impacto, menor ocorrência de defeitos que na madeira maciça, entre outros.

A análise dos resultados dos ensaios e dos modelos numéricos forneceu dados que levaram a diversas conclusões a respeito do comportamento da madeira compensada, das considerações sobre embutimento e dos métodos de ensaio de embutimento em madeira compensada. Essas conclusões são resumidas nos itens a seguir:

1. A madeira compensada mostrou-se bastante resistente ao fendilhamento provocado pela cravação do prego, não tendo sua resistência ao embutimento diminuída quando cravado pregos sem pré-furação. Também não apresentou variação da resistência ao embutimento em função do diâmetro de pré-furação. Observou-se, porém, uma sensível diminuição da rigidez do embutimento quando não foi feita a pré-furação, ou quando esta foi feita com diâmetros muito pequenos.

2. Em todos os ensaios de embutimento realizados, o modo de ruptura foi caracterizado exclusivamente por deformação excessiva, sem que ocorresse ruptura por cisalhamento ou fendilhamento do corpo de provas, mesmo quando este foi levado a grandes deformações acima de 12,5mm, notando que o compensado suporta acréscimo de carga mesmo após plastificação excessiva na região do entorno do pino.
3. Foi observado nos ensaios que as propriedades de resistência e rigidez do compensado apresentam valores muito próximos nas direções normal e paralela. Observou-se também que a resistência ao embutimento do compensado é significativamente superior à resistência à compressão na direção considerada. Essas observações mostram um comportamento diferente da madeira maciça que, segundo a NBR7190/97, pode ser simplificarmente determinado por:  $f_{c,90} = 0,25f_{c,0}$  e  $f_{e,0} = 1,0f_{c,0}$ . Assim, propõe-se a inclusão de uma menção a esse comportamento do compensado em uma futura revisão desta norma.
4. A análise estatística mostrou que não existe correlação entre a resistência ao embutimento e o diâmetro do pino, ou seja, a resistência ao embutimento não sofre variação quando se aumenta ou diminui o diâmetro do pino metálico. Já o módulo de elasticidade no embutimento mostrou grande correlação com o diâmetro do pino, havendo aumento do módulo de elasticidade em função do aumento do diâmetro do pino. Essa conclusão é muito importante na escolha do diâmetro do pino no dimensionamento de ligações semi-rígidas.
5. Foi observada também uma grande correlação entre a resistência ao embutimento e a resistência à compressão, bem como com o módulo de elasticidade na compressão, confirmando a tese de que a resistência ao embutimento do compensado é diretamente relacionada à resistência à compressão da chapa, sendo a resistência à compressão um bom parâmetro para se prever a resistência ao embutimento. As equações de regressão resultantes dessas análises foram:

$$f_{e,0} = 1,24 + 0,887f_{c,0}$$

$$f_{e,90} = 1,41 + 0,950f_{c,90}$$

6. Entre as características físicas do compensado, a massa específica foi a que apresentou o maior coeficiente de correlação com as propriedades de resistência e elasticidade, fazendo desta o melhor parâmetro para previsão das propriedades do compensado. Foram encontradas duas equações que podem ser utilizadas para correlacionar a resistência ao embutimento com a massa específica. A equação (A) obtida da regressão linear dos valores obtidos nos ensaios, mais precisa, e a equação (B), simplificada, adaptada do Eurocode.

$$f_c = -1,89 + 0,00873 \times \rho \quad (A)$$

$$f_c = 0,0057 \times \rho \quad (B)$$

Assim, na falta de valores reais obtidos experimentalmente, recomenda-se a utilização dessas equações para a determinação da resistência ao embutimento de compensados, desde que suas características estejam de acordo com as especificações das normas ABNT para este material.

7. Ao contrário do que prevê a DIN 1052, para determinação da resistência e dos módulos de elasticidade do compensado, a porcentagem de área de fibras na direção do carregamento não apresentaram correlação significativa com nenhuma dessas propriedades. Teor de umidade e coeficiente de inchamento também não apresentaram correlação com outras propriedades de rigidez e resistência.
8. A análise numérica revelou que o compensado não segue as considerações feitas pelos modelos de comportamento isótropo ou ortótropo convencionais, como apresentado por muitos autores. O módulo de elasticidade do material possui uma variação particular em função da inclinação do esforço, tendo os valores máximos nas direções paralelas ou perpendiculares às fibras das lâminas de face e mínimos nas inclinações de aproximadamente  $45^\circ$  em relação a esses eixos.

9. A aplicação do carregamento simplificado pela consideração de carga distribuída apresentou valores diferentes dos apresentados pelo carregamento aplicado por pino rígido, resultando em deslocamentos diferentes dos que ocorrem na prática. A distribuição de tensões também mostrou-se diferente da que ocorre quando a solicitação é aplicada por um pino rígido, podendo-se afirmar que a consideração da carga distribuída é uma simplificação que pode conter erros na determinação do módulo de elasticidade e na resistência ao embutimento.
10. Os melhores resultados da modelação numérica foram encontrados utilizando elemento *SHELL91*, considerando comportamento elasto-plástico do compensado, com embutimento aplicado por pino rígido, respeitando as características geométricas, de resistência e rigidez das lâminas que compõem o compensado.
11. A caracterização das chapas de compensado utilizadas nos ensaios mostrou que algumas indústrias não cumprem as recomendações das normas ABNT referentes a este material, produzindo chapas com dimensões fora do padrão comercial, com número par de lâminas e apresentando resistência do adesivo abaixo do exigido. Entre todas as chapas ensaiadas, apenas as da marca Gethal seguiram todas as especificações das normas ABNT. Apesar disto, as propriedades de resistência e elasticidade apresentaram valores compatíveis com os padrões internacionais. Para a utilização em estruturas permanentes, porém, recomenda-se a utilização de compensados que possuam todas as características recomendadas pelas normas específicas, a fim de garantir sua durabilidade e seu bom comportamento estrutural.
12. A espessura comercial do compensado pode ser utilizada como espessura do corpo de prova, pois não foi observado durante os ensaios nenhum fenômeno de flambagem local decorrente da pequena espessura em relação à altura do CP mesmo para as chapas de 12mm e pinos de 16mm.

13. Apesar da resistência ao embutimento não sofrer alteração em função do tipo de leitura de deformação, a rigidez da ligação foi bastante alterada, alcançando diferença média de 15% entre a rigidez medida pelo lvdt em comparação com a medida pelo stroke, tornando-se bastante significativo quando esse parâmetro for utilizado no dimensionamento de ligações semi-rígidas.

Finalizando, a metodologia proposta pela NBR 7190/97 para determinação da resistência ao embutimento da madeira maciça pode também ser aplicada ao compensado, alterando simplesmente a espessura do corpo de prova, onde se deve utilizar a espessura comercial do compensado. A especificação do medidor de deslocamento entre o pino e a extremidade comprimida do corpo de provas (representada pelo stroke) também poderia ser alterada para a medição do deslocamento entre a extremidade livre e o pino, que resultaria em módulos de elasticidade no embutimento sem a influência da deformação provocada pela compressão e portanto mais precisos.



## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA COMPENSADA (ABIMCE). Madeira compensada para construção rural - manual de aplicação. São Paulo: ABIMCE, 1979. 31p.
- 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.
- 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.
- 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.
- COMITÊ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO (CEN). 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.
- FINNISH PLYWOOD INTERNATIONAL. Handbook of finnish plywood, blockboard and laminboard. CI/SfB Technical Publication nº 25. Helsinki, sd. 29p.
- 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.
- 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 Engeneering. Zurick. vol. 9. p. 249-262. 1949.
- KEINERT JR., S. Produção de compensados. In: Revista da Madeira, n. 24, 1995. p:42-45.
- MARCH, H. W. Stress-strain relations in wood and plywood considered as orthotropic materials. USDA-FS-FPL, Madison, 1944. 25p.
- NATIONAL STANDARDS OF CANADA. Engeneering 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.
- 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, 1986. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 214p.
- 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.
- 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. Madisson. vol. 21. N. 11. 7p. 1981.