

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**AVALIAÇÃO TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE VIGAS EM  
“T” PRÉ-FABRICADAS DE MADEIRA COM FLANGE DE  
PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS (LVL) E ALMA DE  
PAINÉIS DE PARTÍCULAS ORIENTADAS (OSB) E  
COMPENSADO**

**AIRTON MAURO DE LÁRA SANTOS**

**ORIENTADOR: PROF. DR. CLÁUDIO HENRIQUE SOARES DEL  
MENEZZI**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**PUBLICAÇÃO: PPGEFL.DM - 90/2008  
BRASÍLIA/DF: FEVEREIRO – 2008**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**AVALIAÇÃO TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE VIGAS EM “T” PRÉ-  
FABRICADAS DE MADEIRA COM FLANGE DE PAINÉIS DE LÂMINAS  
PARALELAS (LVL) E ALMA DE PAINÉIS DE PARTÍCULAS ORIENTADAS  
(OSB) E COMPENSADO**

**AIRTON MAURO DE LÁRA SANTOS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA FLORESTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

**APROVADA POR:**

---

**CLÁUDIO HENRIQUE SOARES DEL MENEZZI, Doutor (Departamento de Engenharia Florestal  
UnB)  
(Orientador)**

---

**AILTON TEIXEIRA DO VALE, Doutor (Departamento de Engenharia Florestal UnB)  
(Examinador interno)**

---

**MÁRIO RABELO DE SOUZA, Ph.D., (Serviço Florestal Brasileiro)  
(Examinador Externo)**

---

**JOAQUIM CARLOS GONÇALEZ, Doutor (Departamento de Engenharia Florestal UnB)  
(Suplente)**

**Brasília, 22 de fevereiro de 2008**

## FICHA CATALOGRÁFICA

SANTOS, AIRTON MAURO DE LÁRA

Avaliação teórica e experimental de vigas em “I” pré-fabricadas de madeira com flange de painéis de lâminas paralelas (LVL) e alma de painéis de partículas orientadas (OSB) e compensado.

xv, 94p., 210 x 297 mm (EFL/FT/UnB), Mestre, Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Florestal

1. Produtos Engenheirados de Madeira (PEM)

2. Vigas em “I” de madeira

3. Painéis de lâminas paralelas (LVL)

4. Chapas de partículas orientadas (OSB)

I. EFL/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SANTOS, A. M. L. (2008). Avaliação teórica e experimental de vigas em “I” pré-fabricadas de madeira com flanges de painéis de lâminas paralelas (LVL) e alma de painéis de partículas orientadas (OSB) e compensado. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, Publicação PPGEFL.DM-90/2008, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 94p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Airton Mauro de Lára Santos.

TÍTULO: Avaliação teórica e experimental de vigas em “I” pré-fabricadas de madeira com flange de painéis de lâminas paralelas (LVL) e alma de painéis de partículas orientadas (OSB) e compensado.

GRAU: Mestre

ANO: 2008

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Airton Mauro de Lára Santos  
Qs 07, rua 214, casa 02, Águas Claras.  
71.967-720 Águas Claras – DF – Brasil.

## AGRADECIMENTOS

- À Deus por ter me dado força e sabedoria;
- Aos meus queridos pais, Airton e Ana, que graças aos seus esforços e dedicações tive acesso desde o início da vida escolar a um ensino de excelente qualidade, esses que sempre fizeram de tudo para nos dar o melhor; por seus exemplos de fé, de pais e de seres humanos;
- A minha amada noiva, co-responsável por esse trabalho e futura esposa, Gabriela, que me deu força e incentivos para que eu não desistisse dessa jornada. Sem ela não teria conseguido terminar meus trabalhos;
- Aos meus irmãos e eternos amigos Daniel e Pedro;
- Ao meu orientador, Prof. Cláudio Henrique Soares Del Menezzi, por toda sua dedicação, amizade, disponibilidade, conhecimento, incentivo em todo esse tempo de mestrado;
- Aos meus queridos avós: Nair e Ruy e Miriam e João Batista por todo o seu carinho e torcida;
- A todos meus familiares, padrinhos e amigos que sempre me apoiaram;
- À Universidade de Brasília, em especial o Departamento de Engenharia Florestal, que me proporcionou da graduação a pós-graduação ensino público e de qualidade;
- Ao Laboratório de Produtos Florestais - LPF, do Serviço Florestal Brasileiro - SFB, e todos os funcionários, por terem me proporcionado à execução desse trabalho. Agradecimento especial ao setor de Engenharia nas pessoas do Mário Rabelo, João Evangelista e Júlio Eustáquio, que me deram todo suporte na execução dos trabalhos;
- À ESALQ/USP, na pessoa do Prof. Geraldo Bortoletto Júnior, que no Laboratório de Laminação nos deu todo suporte técnico e material para a produção dos LVL;
- Aos amigos, Frederico, Joana e Miriam, que se dispuseram de maneira sem igual para trabalharem em Piracicaba na produção dos LVL; e ao Ariel, que mesmo sem nos conhecer nos acolheu em sua casa como se fossemos velhos amigos e nos fez sentir como se fosse a nossa casa;
- À empresa Schenectedy Crios, da cidade de Rio Claro/SP, que me doou toda a resina utilizada na produção dos LVL;
- Ao Laboratório de Química, Adesivo e Borracha Natural do LPF, onde tive meu primeiro contato na área de tecnologia da madeira. Agradeço especialmente a Esmeraldo Okino (Anne) Francisco Lopes, e Marcos Santana por seus exemplos e por terem me dado a oportunidade de aprender meus primeiros passos;
- Ao Incra SR(28)/DFE que me deu a liberação para que assistisse às aulas. E em especial a todos os amigos e colegas de trabalho que me ajudaram, torceram e agüentaram, durante toda essa jornada;
- A todas as pessoas que torceram e rezaram por mim durante toda a minha vida e em especial nesse mestrado.

A meus Pais,

Airton Mauro Correia Santos e  
Ana Angélica de Lára Santos.

A minha Noiva,

Gabriela Seixas Ivo.

Aos meus Avós

Nair Correia Santos,  
Ruy de Souza Santos,  
Miriam Barreto Ribeiro Dantas de Lára e  
João Batista Gadelha de Lára.

A meus Irmãos,

Daniel de Lara Santos e  
Pedro Henrique de Lara Santos.

Aos meus Familiares e Amigos.

Dedico

## RESUMO

### AVALIAÇÃO TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE VIGAS EM “I” PRÉ-FABRICADAS DE MADEIRA COM FLANGE DE PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS (LVL) E ALMA DE PAINÉIS DE PARTÍCULAS ORIENTADAS (OSB) E COMPENSADO

**Autor:** Airton Mauro de Lára Santos

**Orientador:** Dr. Cláudio Henrique Soares Del Menezzi

**Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais**

**Brasília, fevereiro de 2008**

Os produtos engenheirados de madeiras (PEM) vêm se expandindo globalmente, estes são produzidos a partir da junção de mais de um composto de madeira, utilizando a melhor propriedade de cada um desses elementos, dando qualidade e eficiência as estruturas. As vigas em “I” pré-fabricadas de madeira, que usam painéis estruturais para o material da alma e a madeira serrada de pequena dimensão ou compostos estruturais de madeira - *structural composite lumber* (SCL) para os flanges, são consideradas a segunda geração dos PEM. Este produto substitui a utilização de grandes volumes de madeira serrada em aplicações de assoalho e telhado, para os edifícios residenciais e comerciais. Os objetivos do presente trabalho foram de estimar para as vigas em “I” por meio de modelos teóricos a rigidez a flexão ( $EI$ ), módulo de ruptura ( $f_M$ ) e flecha ( $\delta$ ), e comparar estes valores com os valores obtidos experimentalmente por meio de ensaios de flexão estática; e comparar as vigas em “I” produzidas com diferentes compostos. Foram produzidos dois tipos de vigas em “I” uma com os flanges de painéis de lâminas paralelas (LVL) e alma de compensado e outra com os flanges de LVL e a alma de chapas de fibras orientadas (OSB). A alma e os flanges foram ensaiados para que suas propriedades fossem utilizadas nos modelos teóricos. Depois de realizados os ensaios de flexão estática os valores experimentais foram comparados por análise da variância com os valores teóricos. Para as vigas em “I” com alma de compensado somente para o  $f_M$  não foi observada diferença significativa entre os valores experimentais e teóricos, para as demais variáveis  $E_M$  e  $\delta$  observou diferenças significativas. Para as vigas em “I” com a alma de OSB todas as variáveis estudadas,  $E_M$ ,  $f_M$  e  $\delta$ , não apresentaram diferenças significativas entre os valores teóricos e experimentais. As vigas em “I” com a alma de OSB apresentaram valores médios de  $E_M$  e  $f_M$ , 14,923e 28,7 MPa, superiores aos valores médios 10,115 e 20,0 MPa para  $E_M$  e  $f_M$  das vigas em “I” com alma de compensado. Para as vigas em “I” com alma de OSB foi possível estimar de forma confiável os valores de  $E_M$ ,  $f_M$  e  $\delta$ , validando assim os modelos teóricos utilizados, já para as vigas com alma de compensado os modelos não puderam ser validados, por apresentarem diferenças significativas entre os valores teóricos e experimentais. As vigas em “I” com alma de OSB apresentaram melhores propriedades mecânicas do que as vigas em “I” com alma de compensado, além de valores de  $\delta$  inferiores.

**Palavras-chave:** produtos engenheirados de madeira (PEM), vigas em “I” pré-fabricadas de madeira, painéis de lâminas paralelas (PLP), painéis de partículas orientadas (OSB) e compensado.

## **ABSTRACT**

### **THEORETICAL AND EXPERIMENTAL BEHAVIOR OF WOOD I-JOISTS, MADE FROM LAMINATED VENEER LUMBER (LVL) FLANGE AND WEBBED WITH ORIENTED STRANDBOARD (OSB) AND PLYWOOD.**

**Author: Airton Mauro de Lára Santos**

**Advisor: Dr. Cláudio Henrique Soares Del Menezzi**

**Post-graduate Program on Forest Sciences**

**Brasília, february of 2008**

The *engineered wood products* (EWPs) are products that have expanded globally. They are produced from the junction of more than one wood composite, using the best property of each one, providing qualified and efficient structures. The wood I-joists are produced using structural panels on the web and lumber or structural wood composite lumber (SCL) on the flanges. They are considered as the second generation of EWPs. This product replaces the use of large quantity of timber in floor and roof applications for both residential and commercial buildings. The aims of the study were to estimate theoretically the bending stiffness ( $EI$ ), modulus of rupture ( $f_M$ ) and deflection ( $\delta$ ), and compare it with the values obtained experimentally. Further study was done to evaluate the effect of web type on these variables. Two types of I-joist were produced: oriented strand board (OSB) webbed I-joist and plywood webbed I-joist. For plywood webbed I-joist the results pointed out that no significant difference between the experimental and theoretical  $f_M$  values were observed. However, for  $E_M$  and  $\delta$  significant differences were identified. On the other hand, for OSB webbed I-joist significant differences between theoretical and experimental values of the evaluated variables were not identified. The I-joist with the web of OSB showed mean values of  $E_M$  and  $f_M$ , 14,923 and 28.7 MPa, above the average values 10,115 and 20.0 MPa for  $E_M$  and  $f_M$  the I-joist with web of offset. For I-joist with web of OSB was possible to estimate reliable data of  $E_M$ ,  $f_M$  and  $\delta$ , thus validating the theoretical models used. For the plywood webbed I-joists the models could not be validated, due to significant differences between the experimental and theoretical values. The OSB webbed I-joist presented better mechanical properties than the plywood webbed I-joist and also lower values  $\delta$ .

**Key-words:** engineered wood products (EWP), prefabricated wood I-joists, laminated veneer lumber (LVL), oriented strandboard (OSB) and plywood.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2. HIPÓTESES</b> .....	3
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	4
<b>3.1 PEM</b> .....	4
<b>3.1.1 Painéis estruturais de madeira</b> .....	5
<b>3.1.2 Vigas em “T”</b> .....	9
<b>3.2 ADESIVOS</b> .....	12
<b>3.3 NORMALIZAÇÃO</b> .....	14
<b>3.4 ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS DE MADEIRA</b> .....	16
<b>3.5 RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS APLICADA ÀS VIGAS EM “T”</b> .....	17
<b>3.6 MODELO TEÓRICO E EXPERIMENTAL</b> .....	22
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	26
<b>4.1 AMOSTRAGEM</b> .....	26
<b>4.2 MATÉRIA-PRIMA E MONTAGEM DA VIGA EM “T”</b> .....	26
<b>4.2.1 Produção dos LVL</b> .....	26
<b>4.2.2 Montagem das vigas em “T”</b> .....	31
<b>4.3 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS COMPOSTOS DE MADEIRA</b> .....	32
<b>4.3.1 Propriedades dos flanges</b> .....	32
<b>4.3.2 Propriedades da alma</b> .....	35
<b>4.3.3 Ensaio de ligação interna (LVL) e resistência na linha de cola (LVL/Compensado e LVL/OSB)</b> .....	35
<b>4.4 AVALIAÇÃO TEÓRICA DAS VIGAS EM “T”</b> .....	36
<b>4.5 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DAS VIGAS EM “T”</b> .....	38
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	41
<b>5.1 PROPRIEDADES DOS FLANGES</b> .....	41
<b>5.1.1 ENSAIO DAS EMENDAS</b> .....	41
<b>5.1.2 AVALIAÇÃO NÃO-DESTRUTIVA DOS FLANGES</b> .....	43
<b>5.2 PROPRIEDADES DA ALMA</b> .....	44



<b>5.3</b>	<b>ENSAIO DE LIGAÇÃO INTERNA (LVL) E RESISTÊNCIA NA LINHA DE COLA (LVL/COMPENSADO E LVL/OSB) .....</b>	<b>47</b>
<b>5.4</b>	<b>ENSAIO DAS VIGAS EM “I” .....</b>	<b>48</b>
<b>5.4.1</b>	<b>Propriedade geométrica da Viga em “I” .....</b>	<b>48</b>
<b>5.4.2</b>	<b>Avaliação mecânica das Vigas em “I” .....</b>	<b>49</b>
<b>5.5</b>	<b>AVALIAÇÃO VISUAL DAS RUPTURAS DAS VIGAS EM “I” .....</b>	<b>61</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>66</b>
	<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>67</b>
	<b>APÊNDICES.....</b>	<b>73</b>

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1. ADESIVOS DE MADEIRA CATEGORIZADOS DE ACORDO COM SEU DESEMPENHO ESTRUTURAL PREVISTO EM NÍVEIS VARIANDO DA EXPOSIÇÃO AMBIENTAL.....	14
TABELA 2. DISTRIBUIÇÃO DAS 66 LÂMINAS EM CATEGORIAS. ....	28
TABELA 3. PROPRIEDADES DA RESINA CR-7010.....	29
TABELA 4. FORMULAÇÃO DO ADESIVO UTILIZADO NA PRODUÇÃO DOS LVL.....	29
TABELA 5. $E_M$ E $F_M$ PARALELO E PERPENDICULAR DOS PAINÉIS DE COMPENSADO E OSB. ....	44
TABELA 6. DIMENSÕES E PROPRIEDADE GEOMÉTRICA DAS VIGAS EM “I”. ....	49
TABELA 7. VALORES TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS DOS $E_M$ E $F_M$ DAS VIGAS EM “I”, COM A ALMA DE COMPENSADO E FLANGE DE LVL.....	51
TABELA 8. VALORES TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS DOS $E_M$ E $F_M$ DAS VIGAS EM “I”, COM A ALMA DE OSB E FLANGE DE LVL.....	55
TABELA 9. ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA O $E_M$ DAS TRÊS EMENDAS. ....	73
TABELA 10. ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA O $F_M$ DAS TRÊS EMENDAS. ....	73
TABELA 11. ANÁLISE DE REGRESSÃO ENTRE OS $E_{ME}$ E $E_{MD}$ .....	73
TABELA 12. ANÁLISE DE VARIÂNCIA ENTRE O $E_M$ PARALELO E PERPENDICULAR DO COMPENSADO, COM SIGNIFICÂNCIA DE 5%. ....	74
TABELA 13. ANÁLISE DE VARIÂNCIA ENTRE O $F_M$ PARALELO E PERPENDICULAR DO COMPENSADO, COM SIGNIFICÂNCIA DE 5%. ....	74
TABELA 14. ANÁLISE DE VARIÂNCIA ENTRE O $E_M$ PARALELO E PERPENDICULAR DO OSB, COM SIGNIFICÂNCIA DE 5%.....	74
TABELA 15. ANÁLISE DE VARIÂNCIA ENTRE O $F_M$ PARALELO E PERPENDICULAR DO COMPENSADO, COM SIGNIFICÂNCIA DE 5%. ....	74
TABELA 16. ANÁLISE DE VARIÂNCIA ENTRE O $E_M$ PARALELO DO COMPENSADO E OSB, COM SIGNIFICÂNCIA DE 5%.....	75
TABELA 17. ANÁLISE DE VARIÂNCIA ENTRE O $F_M$ PARALELO DO COMPENSADO E OSB, COM SIGNIFICÂNCIA DE 5%.....	75
TABELA 18. ANÁLISE DE VARIÂNCIA ENTRE O $E_M$ PERPENDICULAR DO COMPENSADO E OSB, COM SIGNIFICÂNCIA DE 5%.....	75
TABELA 19. ANÁLISE DE VARIÂNCIA ENTRE O $F_M$ PERPENDICULAR DO COMPENSADO E OSB, COM SIGNIFICÂNCIA DE 5%.....	75
TABELA 20. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA RESISTÊNCIA NA LINHA DE COLA ENTRE LVL/OSB E LVL/COMPENSADO, COM SIGNIFICÂNCIA DE 5%. ....	76

TABELA 21. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA TENSÃO DE CISALHAMENTO ENTRE O LVL/OSB E LVL/COMPENSADO, COM SIGNIFICÂNCIA DE 5%. .....	76
TABELA 22. ANÁLISE DE REGRESSÃO ENTRE O $E_M$ DA VIGA EM “I” COM ALMA DE COMPENSADO E O $E_{ME}$ DO FLANGE, COM SIGNIFICÂNCIA DE 5%. .....	76
TABELA 23. ANÁLISE DE REGRESSÃO ENTRE O $F_M$ DA VIGA EM “I” COM ALMA DE COMPENSADO E O $E_{ME}$ DO FLANGE, COM SIGNIFICÂNCIA DE 5%. .....	76
TABELA 24. ANÁLISE DE VARIÂNCIA ENTRE O $E_M$ TEÓRICO E EXPERIMENTAL, COM 5% DE SIGNIFICÂNCIA. ....	77
TABELA 25. ANÁLISE DE VARIÂNCIA ENTRE O $F_M$ TEÓRICO E EXPERIMENTAL, COM 5% DE SIGNIFICÂNCIA. ....	77
TABELA 26. ANÁLISE DE VARIÂNCIA ENTRE A FLECHA TEÓRICA E EXPERIMENTAL, COM 5% DE SIGNIFICÂNCIA. ....	77
TABELA 27. ANÁLISE DE REGRESSÃO ENTRE O $E_M$ TEÓRICO E EXPERIMENTAL. ....	77
TABELA 28. ANÁLISE DE REGRESSÃO ENTRE O $F_M$ TEÓRICO E EXPERIMENTAL. ....	77
TABELA 29. ANÁLISE DE REGRESSÃO PARA A EQUAÇÃO PROPOSTA NO MODELO TEÓRICO DAS FLECHAS .....	78
TABELA 30. ANÁLISE DE VARIÂNCIA ENTRE O $E_M$ TEÓRICO E EXPERIMENTAL, COM 5% DE SIGNIFICÂNCIA. ....	78
TABELA 31. ANÁLISE DE VARIÂNCIA ENTRE O $F_M$ TEÓRICO E EXPERIMENTAL, COM 5% DE SIGNIFICÂNCIA. ....	78
TABELA 32. ANÁLISE DE VARIÂNCIA ENTRE A FLECHA TEÓRICA E EXPERIMENTAL, COM 5% DE SIGNIFICÂNCIA. ....	78
TABELA 33. ANÁLISE DE REGRESSÃO ENTRE O $E_M$ TEÓRICO E EXPERIMENTAL. ....	78
TABELA 34. ANÁLISE DE REGRESSÃO ENTRE O $F_M$ TEÓRICO E EXPERIMENTAL. ....	79
TABELA 35. ANÁLISE DE REGRESSÃO PARA A EQUAÇÃO PROPOSTA NO MODELO TEÓRICO DAS FLECHAS .....	79
TABELA 36. ANÁLISE DE VARIÂNCIA ENTRE O $E_M$ EXPERIMENTAL DA VIGA EM “I” COM A ALMA DE COMPENSADO E A ALMA DE OSB, COM 5% DE SIGNIFICÂNCIA. ....	79
TABELA 37. ANÁLISE DE VARIÂNCIA ENTRE O $E_M$ EXPERIMENTAL DA VIGA EM “I” COM A ALMA DE COMPENSADO E A ALMA DE OSB, COM 5% DE SIGNIFICÂNCIA. ....	79

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. VIGAS EM “I” COM O FLANGE DE LVL E A ALMA DE COMPENSADO E OSB .....	10
FIGURA 2. TIPOS COMUNS DE JUNÇÕES ENTRE OS FLANGES (MACEDO, ET AL., 1999).....	11
FIGURA 3. TIPOS DE JUNÇÕES ENTRE O FLANGE E ALMA (USDA, 1999).....	12
FIGURA 4. CÓDIGO DAS PRINCIPAIS FALHAS EM VIGAS EM “I” (ASTM, 2005).....	15
FIGURA 5. SEÇÃO TRANSVERSAL DA VIGA EM “I”.....	18
FIGURA 6. ESQUEMA ESTÁTICO PARA O ENSAIO DE FLEXÃO (ASTM, 1999). ....	19
FIGURA 7. DIAGRAMA DE FORÇA DE CISALHAMENTO PARA O ESQUEMA ESTÁTICO DA FIGURA 6. ....	20
FIGURA 8. DIAGRAMA DE MOMENTO FLETOR PARA O ESQUEMA ESTÁTICO DA FIGURA 6.....	20
FIGURA 9. GRÁFICO DE TENSÃO-DEFORMAÇÃO PARA MADEIRA (*R = RUPTURA; ** LP= LIMITE PROPORCIONAL). ....	21
FIGURA 10. DIMENSÕES ESTRUTURAIS DAS VIGAS EM “I”, COM A ALMA FORMADA POR PAINÉIS (USDA, 1999).....	24
FIGURA 11. ETAPAS PARA OBTENÇÃO DAS LÂMINAS DE MADEIRA: LAMINAÇÃO, CLASSIFICAÇÃO, RESSECAGEM E GUILHOTINAMENTO. ....	27
FIGURA 12. QUALIDADE DAS LÂMINAS DE <i>PINUS SP.</i> (ABIMCI, 2002). ....	28
FIGURA 13. APLICAÇÃO DO ADESIVO COM O APLICADOR DE ROLO. ....	30
FIGURA 14. ETAPAS PARA A MONTAGEM DO LVL: APLICAÇÃO DO ADESIVO, MONTAGEM DO COLCHÃO, Prensagem a Frio e a Quente.....	30
FIGURA 15. EIXOS ESTRUTURAIS (X, Y), DIMENSÕES DOS COMPONENTES E DA VIGA EM “I” (SETAS INDICAM O SENTIDO PARALELO ÀS FIBRAS NA MADEIRA SÓLIDA E DO OSB).....	31
FIGURA 16. ESQUEMA PROPOSTO PARA O ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA. ....	32
FIGURA 17. TIPOS DE EMENDAS TESTADOS PARA SE FAZER A JUNÇÃO DOS LVL: EMENDA MACHO-FÊMEA (A), BISEL 1:2 (B) E BISEL 1:4 (C).....	33
FIGURA 18. DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA DE LIGAÇÃO INTERNA DE LVL. ....	36
FIGURA 19. DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA DE RESISTÊNCIA NA LINHA DE COLA, ENTRE O LVL E O OSB (A) E ENTRE LVL E COMPENSADO.....	36
FIGURA 20. SEÇÃO TRANSVERSAL DA VIGA EM “I”.....	38
FIGURA 21. ESQUEMA ESTÁTICO PARA O ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA. ....	39
FIGURA 22. ANÁLISE DE VARIÂNCIA E TESTE TUKEY DAS EMENDAS ENSAIADAS (COLUNAS SEGUIDAS PELA MESMA LETRA NÃO HÁ DIFERENÇA SIGNIFICATIVA PELO TESTE TUKEY, AO NÍVEL DE 5% DE PROBABILIDADE). ....	41

FIGURA 23. RUPTURA DAS EMENDAS MACHO-FÊMEA, BISEL 1:2, E BISEL 1:4. ....	42
FIGURA 24. GRÁFICO DE CARGA E DEFORMAÇÃO DAS EMENDAS TESTADAS. ....	43
FIGURA 25. GRÁFICO DE DISPERSÃO DOS DADOS DE $E_M$ ESTÁTICO EM FUNÇÃO DE $E_M$ DINÂMICO UTILIZANDO-SE O MODELO LINEAR DE REGRESSÃO.....	44
FIGURA 26. COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE $E_M$ E $F_M$ PARALELO DOS PAINÉIS DE COMPENSADO E OSB (*SIGNIFICATIVA À 5% DE PROBABILIDADE). ....	46
FIGURA 27. COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE $E_M$ E $F_M$ PERPENDICULAR DOS PAINÉIS DE COMPENSADO E OSB (*SIGNIFICATIVA À 5% DE PROBABILIDADE). ....	46
FIGURA 28. RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA NOS ENSAIOS DE LIGAÇÃO INTERNA E DE RESISTÊNCIA NA LINHA DE COLA (LVL X OSB).....	47
FIGURA 29. COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE RESISTÊNCIA NA LINHA DE COLA E TENSÃO DE CISALHAMENTO ENTRE O COMPENSADO E OSB (*SIGNIFICATIVO A 5% DE PROBABILIDADE). ....	48
FIGURA 30. RELAÇÃO ENTRE O $E_M$ DA VIGA EM “I” COM O $E_M$ DO FLANGE.....	50
FIGURA 31. RELAÇÃO ENTRE O $F_M$ DA VIGA EM “I” COM O $E_M$ DO FLANGE. ....	50
FIGURA 32. ANÁLISE DE REGRESSÃO DO $E_M$ E $F_M$ TEÓRICO E EXPERIMENTAL, UTILIZANDO O MODELO LINEAR DE REGRESSÃO. ....	52
FIGURA 33. VALORES TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS DA FLECHAS DAS VIGAS EM “I”, COM ALMA DE COMPENSADO E O FLANGE DE LVL.....	53
FIGURA 34. EQUAÇÃO DE REGRESSÃO PARA 95% DOS VALORES DE FLECHA ESTIMADOS. ....	54
FIGURA 35. ANÁLISE DE REGRESSÃO DO $E_M$ E $F_M$ TEÓRICO E EXPERIMENTAL, UTILIZANDO O MODELO LINEAR DE REGRESSÃO. ....	56
FIGURA 36. VALORES TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS DA FLECHAS DAS VIGAS EM “I”, COM ALMA DE OSB E O FLANGE DE LVL.....	58
FIGURA 37. EQUAÇÃO DE REGRESSÃO PARA 95% DOS VALORES DE FLECHA ESTIMADOS. ....	59
FIGURA 38. DIFERENÇA ENTRE AS PROPRIEDADES DAS VIGAS EM “I” COM ALMA DE COMPENSADO E ALMA DE OSB (*SIGNIFICATIVO A 5% DE PROBABILIDADE). ....	60
FIGURA 39. DIFERENÇA AS FLECHAS DAS VIGAS EM “I” COM ALMA DE COMPENSADO E ALMA DE OSB (*SIGNIFICATIVO A 5% DE PROBABILIDADE).....	60
FIGURA 40. RUPTURA DEVIDO AO CISALHAMENTO NAS VIGAS EM “I” COM A ALMA DE COMPENSADO 1, 3, 4 E 5. ....	62
FIGURA 41. REGIÃO DA RUPTURA WWJ DESCRITA NA NORMA ASTM D5055(2005). ....	62
FIGURA 42. RUPTURAS DEVIDO AO CISALHAMENTO E A REAÇÃO DE APOIO NAS VIGAS EM “I” COM A ALMA DE COMPENSADO. ....	63

FIGURA 43. REGIÃO DA RUPTURA TÍPICA DE CISALHAMENTO (WHS) E DE REAÇÃO DE APOIO (WB) DESCRITA NA NORMA ASTM D5055(2005).....	63
FIGURA 44. DEFEITOS NAS VIGAS EM “I” COM A ALMA DE OSB DEVIDO AO ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA.....	64
FIGURA 45. REGIÃO DA RUPTURA WRS DESCRITA NA NORMA ASTM D5055(2005).....	65

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

$h$	- altura da viga em “T”
$h_a$	- altura da alma
$h_f$	- altura do flange
$y$	- metade da altura da viga em “T” ( $h/2$ )
$b$	- largura do flange
$c$	- distância entre os flanges
$w$	- espessura da alma
$L$	-distância entre apoios (vão)
$a$	- distância entre o ponto de aplicação das cargas e os apoios
$A$	- área da peça
$EI$	- rigidez a flexão
$E_M$	- módulo de elasticidade da viga em “T”
$E_{Mf}$	- módulo de elasticidade do flange
$E_{Ma}$	- módulo de elasticidade da alma
$E_{MD}$	- módulo de elasticidade dinâmico
$E_{ME}$	- módulo de elasticidade estático
$I$	- momento de inércia da viga em “T”
$I_f$	- momento de inércia do flange
$I_a$	- momento de inércia da alma
$CG$	- centro de gravidade da viga em “T”
$\delta$	- flecha
$f_M$	- módulo de ruptura
$P'$	- carga no limite proporcional
$P_{rup}$	- carga de ruptura
$M$	- momento fletor
$V$	- tensão de cisalhamento
$M_e$	- massa específica
$g$	- aceleração da gravidade
$t$	- tempo de propagação da onda
$d$	- distância entre os sensores
$v$	- velocidade da onda longitudinal

# 1. INTRODUÇÃO

Os produtos engenheirados de madeiras (PEM), também conhecidos na literatura internacional como *engineered wood products* (EWPs), vêm se expandindo globalmente. São produzidos a partir da junção de mais de um produto, utilizando-se de cada um desses, suas melhores propriedades. Os PEM são muitas vezes utilizados como substitutos de produtos maciços de madeira ou mesmo para substituir produtos que são produzidos por processos altamente poluentes, antecedidos por agressões ambientais consideráveis para a obtenção da matéria-prima como o aço e o concreto armado, por exemplo. Além da diminuição dos danos ambientais, os PEM proporcionam uma economia dos materiais utilizados como matéria prima, além de um uso mais eficiente desses produtos.

Dentre os principais PEM encontra-se as vigas em “T”, um produto que vem se destacando no mercado mundial, chegando à produção anual em 2005 na faixa de 393,2 milhões de metros lineares (FAO/UNECE, 2005), ainda se mostrando com uma tendência de aumento na sua produção. No Brasil ainda não é produzido industrialmente e sua utilização em nível mundial ainda se restringe a produção de estrutura de assoalhos e telhados.

As vigas em “T” são compostas de madeira produzidas a partir da união de painéis estruturais na alma (painel de partículas orientadas, *oriented strand lumber* –OSB; ou compensado) e madeira sólida ou mesmo outro painel estrutural nas bordas. As vigas em “T” além de fornecer rigidez, flexibilidade de utilização e de montagem, resistência ao momento fletor e ao cisalhamento, também traz embutida a agregação de valor a uma série de produtos como os painéis estruturais e madeiras sólidas de reflorestamento. A falta de informações técnicas, pesquisas e normalizações brasileiras sobre as vigas em “T” fazem com que esse produto ainda não seja utilizado no mercado brasileiro.

A introdução de novas tecnologias utilizando painéis reconstituídos de madeira mostra novas perspectiva de mercado para esses produtos, fazendo com que ocorra uma agregação de valor a esses. Muitos desses componentes estruturais das vigas em “T”, como as chapas de OSB, atualmente são subutilizadas como tapumes de obras de construção civil, ou



mesmo alguns desses produtos estruturais nem mesmo são produzidos no Brasil, como é o caso do painel de lâminas paralelas (PLP).

O objetivo principal do trabalho é analisar a possibilidade de estimar as propriedades de resistência e rigidez da viga em “I”, a partir da determinação das propriedades de cada um dos elementos que a compõem.

O trabalho traz como objetivos complementares:

- a) Produzir vigas em “I” pré-fabricadas de madeira;
- b) Analisar a influência do tipo de alma na resistência e rigidez das vigas em “I”.

## **2. HIPÓTESES**

A partir da determinação das propriedades dos compostos de madeiras utilizados como matéria-prima na fabricação das vigas em “I” é possível por meio de modelos teóricos determinar as propriedades de resistência e rigidez das vigas em “I” pré-fabricadas de madeira.

Existe efeito do tipo de alma sobre as propriedades de resistência e rigidez das vigas em “I” pré-fabricadas de madeira.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com a possibilidade de escassez dos recursos minerais não renováveis, utilizados na construção civil, pode-se dizer que a madeira será, por excelência, o material de construção do futuro. Suas excelentes propriedades físicas e mecânicas, além do fato de ser um material continuamente renovável, colocam-na numa posição de destaque frente a outros materiais. O profundo conhecimento de suas propriedades torna-se, dessa forma, fundamental para que sejam garantidos, principalmente, os requisitos de segurança e durabilidade (CARRASCO et al., 2003).

No Brasil, a madeira na construção civil é utilizada de diversas formas em usos temporários, como: fôrmas para concreto, andaimes e escoramentos. De forma definitiva, é utilizada nas estruturas de cobertura, nas esquadrias (portas e janelas), nos forros e pisos. Os produtos de madeiras utilizados na construção variam desde peças com pouco ou nenhum processamento (madeira roliça) até peças com vários graus de beneficiamento, como: madeira serrada e beneficiada, lâminas, painéis de madeira e madeira tratada com produtos preservativos (IPT, 2003).

#### 3.1 PEM

Os produtos engenheirados de madeira (PEM) referem-se a uma denominação de produtos fabricados e desenhados para finalidades específicas, cujas propriedades são dependentes das propriedades dos produtos dos quais foram produzidos e permitem o posicionamento dos diversos materiais de modo a usufruir de suas melhores propriedades (LEICHTI et al., 1990). A utilização de madeira reconstituída é uma tendência atual que traz inúmeras vantagens: pré-fabricação, industrialização, homogeneidade, redução da anisotropia e utilização de madeira de rápido crescimento proveniente de florestas plantadas (LIMA et al., 2004).

A Associação de Madeira Engenheirada (APA) - *Engineered Wood Association*, dividiu os PEM em quatro categorias: a de painéis estruturais, que incluem os compensados, as chapas de fibras orientadas - *oriented strandboard* (OSB) e o *Waferboard*; a de madeira laminada colada (*glulam*); madeira composta estrutural, em que

se enquadra o painel de lâminas paralelas (PLP) - *laminated veneer lumber* (LVL); e por fim a das vigas em “I” (PEDROSA, 2003). As duas últimas categorias de produtos ainda não são produzidas no Brasil, mas se mostram com um enorme potencial de produção no país, visto que os compostos de madeira como material de engenharia ainda são pouco utilizados na construção civil e esses possuem um enorme potencial de uso.

As peças compostas de madeira apresentam características, que fazem com que essas possam ser empregadas nos mais variados tipos de construções. Dentre as mais importantes encontra-se a possibilidade de alcançar grandes vãos (até 9 m) com o emprego de peças com dimensões reduzidas; maior aproveitamento da tora; melhor adaptação às condições climáticas, com menos problemas de secagem quando comparadas às peças maciças; redução da possibilidade de presença de defeitos; adequação para utilização em estruturas de cobertura e outros tipos de estruturas onde o menor peso e a mais fácil montagem do sistema sejam aspectos de interesse prioritário (GÓES, 2002).

### **3.1.1 Painéis estruturais de madeira**

Os painéis de madeira são produtos feitos a partir da união de madeira, adesivos e aditivos. São também conhecidos como compostos, porque são formados pela junção de mais de um tipo de matéria-prima, cujo resultado final é algo que pode ser utilizado e que tem mercado (SOUZA et al., 2002). Podem-se distinguir quatro classes de compostos: painéis de madeira (compensados, painéis de fibra, painéis de partículas orientadas); produtos moldados (painéis automobilísticos); produtos inorgânicos (painéis madeiramento); e produtos de madeira sólida (painéis de lâminas paralelas, tábuas de partículas paralelas, vigas laminadas).

No Brasil, são produzidos compostos de madeira de todas as classes, mas prevalecem os painéis. Dentro desta classe são produzidos, compensados, chapas aglomeradas, de fibra de média (MDF) e alta densidade (HDF), chapas isolantes e painéis de partículas orientadas - *oriented strandboard* (OSB). O início da produção de painéis no Brasil ocorreu em 1940, com a instalação da primeira fábrica de compensados, seguindo em 1995, com as chapas de fibra; em 1966, com as chapas aglomeradas; em 1997, com o MDF; e finalmente em 2002, com o OSB. Dados de 2000, compilados a partir de MENDES et al. (2000), indicam que a capacidade de produção brasileira era de 4,7

milhões de m<sup>3</sup> de painéis, sendo 42% relativos ao compensado e 58% às chapas aglomeradas, de fibras e MDF. Com a instalação em 2002 da primeira fábrica de OSB, com capacidade de produção de 350 mil m<sup>3</sup> por ano e os diversos planos de expansão de fábricas já instaladas, estima-se que, na atualidade, a capacidade brasileira seja superior a 5,5 milhões de m<sup>3</sup> de painéis por ano. Por outro lado, as exportações são impulsionadas principalmente pelo compensado, com volume de quase 50% do produzido, enquanto que para os demais tipos de painéis quase toda a produção (92%) é consumida internamente. As exportações de painéis de madeira somaram em 2002, algo em torno de US\$ 535,5 milhões, sendo que 80% desse valor correspondem ao compensado, conforme dados compilados em MENDES et al.(2003).

### **3.1.1.1 Compensado**

O Brasil está entre os principais produtores mundiais de compensado. A produção de compensado no Brasil teve início na década de 1940, atingindo níveis significativos de produção a partir dos anos 70. Estima-se que 60% sejam produzidos a partir de madeira tropical e o restante originado de florestas plantadas da região sul e sudeste. Sua ampla utilização se justifica por suas características mecânicas e adaptabilidade a diversos usos, que inclui a construção civil e a indústria moveleira (NOCE et al., 2007).

O princípio de fabricação do compensado é a colagem de lâminas de madeira, em número ímpar de camadas, sobrepostas com a direção das fibras das camadas sucessivas formando ângulos retos entre si. O direcionamento ortogonal de uma lâmina em relação a outra adjacente restringe a movimentação tangencial das camadas e resulta em valores de retratibilidade similares, nas duas direções do plano da chapa, conferindo ao compensado excelente estabilidade dimensional. Além disso, o direcionamento cruzado das fibras também proporciona a uniformidade das propriedades mecânicas nas duas direções do plano da chapa. A uniformidade é maior quanto maior é o número de camadas do compensado, em razão da melhor distribuição das tensões que se desenvolvem em face de determinado carregamento (TSOUMIS, 1991).

Por possuir diversas características favoráveis, o compensado encontra utilizações das mais variadas formas, como na construção civil para aplicações estruturais ou não (pisos,

forros, paredes, esquadrias, portas, telhados, andaimes, formas de concreto etc.), na construção de barcos e na fabricação de móveis (partes estruturais e decorativas), instrumentos musicais, embalagens industriais, caixas e outros (BORTOLETTO Jr. et al., 2004).

### 3.1.1.2 OSB

Outra classe de compostos de madeira produzida no Brasil são painéis OSB. Esses são compostos produzidos a partir de toras de madeira, reduzidas a pequenos cavacos - *strand*, que em seguida, são aglutinados utilizando-se calor e pressão para a cura do adesivo. A geometria básica do cavaco é 10,00 x 2,50 x 0,08 cm, sendo bastante distinta da utilizada na produção de painéis aglomerados comuns. Sua concepção construtiva com 3 a 5 camadas de cavacos orientadas perpendicularmente entre si, bem como a utilização de adesivos resistentes à umidade, lhe confere resistência mecânica adequada, propiciando sua utilização em aplicações que requerem leveza, resistência e durabilidade. Geralmente, são produzidos na dimensão de 244,00 x 122,00 cm, com espessuras que variam de 0,90 a 3,80 cm e massa específica variando de 580-640 kg/m<sup>3</sup>. Seu uso é muito difundido nos países da Europa, América do Norte e Japão, onde praticamente substituiu o compensado na construção civil. No Brasil, seu uso teve início apenas a partir de 2002 (DEL MENEZZI, 2004).

Os painéis compensados e OSB podem ser considerados similares em concepção enquanto compostos de madeira, visto que o princípio da laminação cruzada está embutido em ambos. Isso melhora a estabilidade dimensional da superfície do painel e reduz, em parte, a anisotropia relativa à umidade e aos esforços mecânicos, que é comum à madeira sólida. Por isso, freqüentemente são empregados para uma mesma finalidade, implicando em uma disputa acirrada no mercado nos países onde são produzidos há mais tempo. No entanto, percebe-se que a utilização dos painéis OSB tem crescido significativamente e ocupado espaços antes exclusivos de compensado. A principal limitação do OSB é a sua baixa estabilidade dimensional frente ao compensado, pois quando entra em contato com a umidade incha em espessura e expande linearmente muito mais que o compensado. Essa limitação foi contornada, em grande parte, pelos estudos sobre tratamento térmico de painéis de OSB realizados por DEL MENEZZI (2004).

O OSB apresenta o eixo de maior resistência no sentido paralelo ao do fluxo de produção e pode ser usado para quase todas as finalidades para as quais são indicados os compensados. Atualmente, seus principais usos são: forro para telhados; base para paredes e pisos em construções residenciais; empacotamento e engradamento, paletes para estocagem a seco; estandes para exibição; armações para mobília; assento e encosto de cadeira; tampos de mesas industriais; miolo para composto destinado a piso de madeira nobre; tapumes e divisórias; e alma para vigas estruturais (DEL MENEZZI, 2004).

### 3.1.1.3 LVL

Na década de 60, já no segmento da construção civil, empresários norte-americanos colocaram no mercado vigas compostas de madeira do tipo viga em “I”. Estas vigas em “I” representavam um produto que podia suportar mais carga em relação ao seu próprio peso do que qualquer outro material existente até então. Em virtude do baixo peso, alta resistência e a possibilidade de vencer grandes vãos que o produto oferecia, representando como um substituto ideal para as vigas de madeira maciça, esse produto foi ganhando mais espaço no mercado da construção civil. (CARVALHO et al., 2003).

Contudo, a produção destas vigas em “I” de alta qualidade dependia de um suprimento de madeira serrada de alta resistência, para confecção das peças superiores e inferiores, e este suprimento de peças uniformes era bastante problemático. Como solução, os pesquisadores desenvolveram peças de madeira produzidas com lâminas de 2,54 mm coladas de Douglas Fir. Estava criado o LVL na construção civil. O material passou então a ser utilizado na composição de vigas e como peças inteiriças como acontece até hoje (CARVALHO et al., 2003).

O LVL juntamente com o *parallel strand lumber* (PSL) e o *laminated strand lumber* (LSL) são compostos estruturais de madeira que não são produzidos a nível comercial no Brasil, mas mundialmente o LVL é mais produzido que os outros dois compostos. Este é um composto estrutural da madeira projetado para competir com a madeira serrada, particularmente madeira serrada de grandes dimensões (MCKEEVER, 1997).

O painel LVL apresenta duas categorias distintas: LVL estrutural para uso em aplicações de larga dimensão e longos períodos, e não estruturais ou instalações móveis LVL. A primeira é usada extensivamente na América do Norte, com mais da metade de toda a sua produção sendo usada como bordas em vigas. Na Europa também está começando a usar mais produto estrutural. O produto de uso não estrutural é popular na Ásia, particularmente no Japão, e devido a sua excelente estabilidade é usada em várias aplicações como esquadrias de janelas e portas e componentes para escada (SINKO, 2003).

Com relação ao compensado, as principais diferenças apresentadas pelo LVL dizem respeito à montagem dos painéis (mesma orientação das lâminas), número de lâminas (até mais de 20), espessura das lâminas (de 2,0 a 12,7 mm), forma e dimensões dos painéis (até 70 mm de espessura e comprimentos até maiores que 20 m) e utilização, prioritariamente estrutural (CARVALHO et al., 2003).

### **3.1.2 Vigas em “I”**

As vigas são peças estruturais submetidas a esforços laterais, ou seja, forças ou momentos que têm seus vetores perpendiculares ao eixo da barra (GERE, 2003). Também podem ser definidas como elementos de barras, submetidas a cargas transversais em relação a seu eixo e destinadas a vencer vãos (GASPAR, 2005).

As grandes peças da madeira serradas utilizadas em estruturas de telhado, assoalho e em sistemas comerciais da construção estão tornando-se cada vez menos disponível e mais caras, entretanto, pesquisadores estimaram que 50% das fibras de madeira possam ser utilizadas em formas estruturais compostas de madeira (LEICHTI et al., 1990).

Recentemente, o desenvolvimento de adesivos melhorados e as técnicas de construção conduziram ao desenvolvimento da indústria de vigas em “I” pré-fabricadas, também conhecidas internacionalmente como “I-beams” ou “I-joists” (Figura 1). A viga em “I” é considerada como a segunda geração dos PEM. Principalmente nos EUA este produto está substituindo grandes volumes de madeira serrada em aplicações em estruturas de assoalho e telhado para os edifícios residenciais e comerciais. As economias significativas nos materiais e boa distribuição das forças são possíveis com vigas em “I” pré-fabricadas, que usam o compensado ou OSB para o material da alma da viga e a madeira serrada de



pequena dimensão ou compostos estruturais de madeira - *structural composite lumber* (SCL) para os flanges.



Figura 1. Vigas em “T” com o flange de LVL e a alma de compensado e OSB

Os SCL são compostos estruturais que são fabricados a partir da adesão de pequenos pedaços de madeira em tamanhos usuais ao da madeira sólida. Nesse conjunto estão além do LVL, produtos que são extensão da tecnologia utilizada no OSB, o *oriented strand lumber* (OSL), o *parallel strand lumber* (PSL) e o *laminated strand lumber* (LSL) (USDA, 1999).

A concepção de se utilizar a viga em “T” de madeira usando a alma de painéis de madeira e os flanges de madeira serrada surgiu em meados de 1940, na segunda guerra mundial, com o objetivo de se construir aviões de guerra. No entanto a concepção atual de se utilizar as vigas em “T” de madeira como PEM, utilizado na construção civil, surgiu a partir de 1968 e em 1969, quando houve a introdução deste entre os produtos da então “Trus Joist Corporation” (hoje “Trus Joist MacMillan”). (GREEN et al., 1998; PEDROSA, 2003).

As vigas em “I” são construídas para fornecer rigidez, flexibilidade de comprimento; resistência ao momento fletor e ao cisalhamento. Os flanges das vigas são responsáveis por resistirem às tensões e ao momento fletor e a alma ao esforço cisalhante. Dentre outras propriedades das vigas em “I” estão a possibilidade de diferentes tamanhos, aparência e desempenhos mais consistentes; estabilidade dimensional; estruturas mais leves; a alma do painel é mais fácil de furar para possibilitar a passagem de encaimento e dutos elétricos; e a diminuição dos desperdícios (FISSETTE, 2000). O desempenho previsto de uma viga em “I” de madeira dependerá diretamente da qualidade do material usado em sua construção (LEICHTI et al., 1990).

Os painéis de madeira usados como alma nas vigas em “I” são caracterizados por possuírem elevada resistência ao cisalhamento e módulos de elasticidades menores que dos materiais utilizados nos flanges, já esses devem resistir mais as tensões de compressão e tração. A alma também possui uma importante contribuição na rigidez e na capacidade de carga na viga. As vigas em “I” produzidas com a alma de OSB possuem uma maior capacidade de carga quando comparadas com outros painéis de madeira (LEICHTI et al., 1990).

O flange, da viga em “I”, é o principal responsável pela capacidade de carga da viga. Os tipos de flanges mais utilizados são o de madeiras serradas e os compostos estruturais de madeira, principalmente o LVL. As junções mais comuns entre os flanges são em forma dentada (*finger joist*) e em forma de bisel (*scarf joist*) (Figura 2) (LEICHTI et al., 1990b). A emenda de topo (*butt joist*) não é aconselhável para ser utilizada na junção entre os flanges, já que o flange é a parte da viga submetida às esforços de compressão e de tração. O tamanho dos dentes da emenda dentada, bem como a relação entre a altura e o comprimento do bisel, varia entre fabricantes e de acordo com o uso dado as vigas.

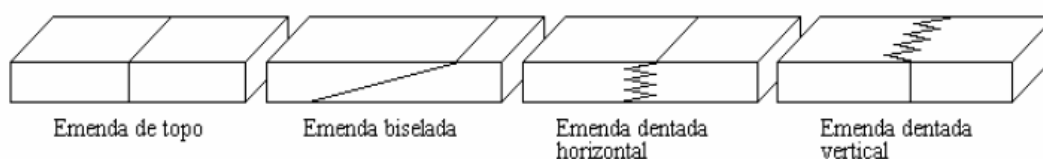


Figura 2. Tipos comuns de junções entre os flanges (MACEDO, et al., 1999).

Os detalhes para fixar os flanges à alma do painel variam entre fabricantes, mas esses devem ser colados utilizando adesivos resistentes à umidade. As formas mais usuais de se unir o flange e a alma são: a alma pregada ou colada a dois flanges (Figura 3 a), alma colada a um flange sulcado (Figura 3 b), a alma com a ponta afilada ligada a um flange sulcado afilada (Figura 3 c), e a alma com a ponta rachada ligada a um flange sulcado (Figura 3 d) (USDA, 1999).

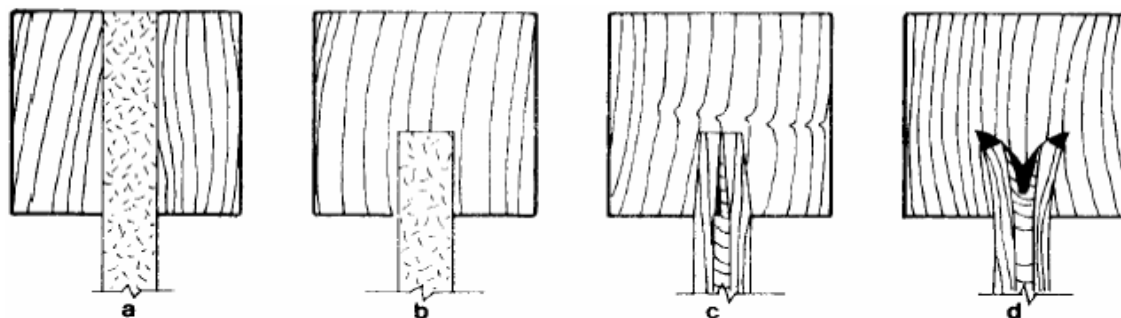


Figura 3. Tipos de junções entre o flange e alma (USDA, 1999).

As vigas em “I” não são produzidas no Brasil por uma série de razões, entre as quais se inclui a falta de normalização específica, a falta de informações tecnológicas e de operacionalização, além da falta de tradição no uso de compostos de madeira para fins estruturais.

### 3.2 ADESIVOS

O adesivo é definido como sendo uma substância capaz de unir através do contato entre duas superfícies aderentes. A capacidade de unir materiais não é uma propriedade intrínseca das substâncias, mas depende da forma em que a substância é utilizada. Os adesivos são classificados em vários tipos. De acordo com a composição química esses podem ser classificados como inorgânicos e orgânicos (FIORELLI, 2002).

Os polímeros orgânicos são os principais componentes químicos utilizados na formulação de adesivos para madeira (USDA, 1999). Estes se dividem em dois grupos, o primeiro de origem natural e o segundo de origem sintética. Dentre os de origem natural pode-se destacar: animal, amido, caseína e albumina de proteína vegetal (FIORELLI, 2002). Os polímeros orgânicos utilizados atualmente são predominantemente sintéticos,

por causa de sua fácil manipulação e excelentes propriedades, praticamente substituíram a utilização dos adesivos naturais (CARNEIRO et al., 2001).

Os polímeros sintéticos são quimicamente formulados para que possam executar uma grande variedade de funções nas ligações. Podem ser classificados em termoplásticos e termofixos, dependendo do tipo de polímero sintético utilizado, influenciando em como irá ocorrer à adesão (USDA, 1999).

Os polímeros termoplásticos possuem como principal característica curas reversíveis, podendo ser fundido ou amolecido quando aumentada a temperatura, tornando a se solidificar ao serem resfriados. Estes geralmente possuem, a longo prazo, uma menor resistência ao calor e à umidade do que os polímeros termofixos (FIORELLI, 2002).

Os polímeros termofixos são adesivos estruturais excelentes, porque se submetem à mudança química irreversível, se endurecem por meio de reações químicas ativadas pela temperatura ou catalisadores. Os polímeros termofixos dão aos adesivos uma elevada resistência à umidade e aos outros produtos químicos, e são rígidos o bastante para suportar cargas estáticas elevadas, a longo prazo, sem se deformar. O fenol-formaldeído, resorcinol-formaldeído, uréia-formaldeído, poliuretanos, isocianato, melanina-formaldeído e epóxi, são exemplos de adesivos de madeira que são baseados em polímeros termofixos (USDA, 1999).

Na construção de edificações, os adesivos contribuem com aderência e rigidez durante a vida da estrutura. Esses adesivos geralmente são mais resistentes e mais rígidos que a madeira. As ligações estruturais são críticas, porque a falha na linha de cola poderia resultar em danos sérios à estrutura, mesmo perda de vida. Um exemplo de aplicação de adesivos estruturais são vigas em “T”. Os exemplos de adesivos estruturais rígidos incluem fenol, resorcinol, melanina, uréia, e caseína (Tabela 1). Adesivos estruturais que mantêm sua resistência e rigidez sobre saturação de água e a secagem cíclica mais severa são considerados adesivos inteiramente exteriores, chamados de estrutural. Adesivos rígidos que perdem sua habilidade de transferir mais rapidamente a carga do que a madeira em condições de serviço, particularmente no que diz respeito à umidade, são considerados adesivos para interior, chamados de não-estruturais. Entre adesivos exteriores e interiores estão os adesivos intermediários, semi-estruturais, que mantêm a resistência e a rigidez na

água em curto prazo, mas se deterioram mais rapidamente do que a madeira durante a exposição em longo prazo à água e ao calor (USDA, 1999).

Tabela 1. Adesivos de madeira categorizados de acordo com seu desempenho estrutural previsto em níveis variando da exposição ambiental.

<b>Tipos de adesivos</b>	<b>Local de uso</b>	<b>Adesivo Utilizados</b>
Estrutural	Uso exterior, sem restrições	Fenol-formaldeído
		Resorcinol-formaldeído
		Fenol - resorcinol-formaldeído
		Polímero de emulsão/isocianato
		Melanina-formaldeído
	Uso exterior, com restrições	Melanina-ureia-formaldeído
		Isocianato
		Epóxi
	Interior	Uréia-formaldeído
Caseína		
Semi-estrutural	Uso exterior, com limitações	Polivinil acetato
Não-estrutural	Interior	Poliuretanos
		Polivinil acetato
		Animal
		Elastômeros de construção
		Elastômeros de contato
		Hot-melt

Fonte: USDA (1999).

O resorcinol-formaldeído é uma resina líquida, sua cura se dá em temperatura ambiente numa faixa de 21 a 66°C, sendo utilizado para madeiras laminadas e junções que devem suportar serviço severo (USDA, 1999). As propriedades físicas da resina resorcinol-formaldeído são superiores à resina fenólica, principalmente quanto a sua resistência a umidade. A resina resorcinol-formaldeído é classificada para usos exteriores e estruturais (PEDROSA, 2003).

### 3.3 NORMALIZAÇÃO

O processo da normalização para as vigas em “I” de madeira foi iniciado em 1981 por um grupo de produtores interessados em estabelecer critérios de desempenho para estes produtos. O produto final permitiu determinar as capacidades de cargas, resultando conseqüentemente em um desempenho mais uniforme desse produto. Em 1985, o processo de normalização foi transferido para a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) Comitê D-7 de madeira. Em 1997 foi elaborada a primeira norma universal para vigas em “I” pré-fabricadas de madeira a ASTM D5055 (*Standard Specification for*

*Establishing and Monitoring Structural Capacities of Prefabricated Wood I-Joist*), que traz a especificação padrão para estabelecer e monitorar capacidades estruturais das vigas em "I" pré-fabricadas de madeira (WILLIAMSON, 2002).

A ASTM D5055 traz os procedimentos para estabelecer, monitorar e reavaliar capacidades estruturais de vigas em "I" pré-fabricadas (USDA, 1999). Descreve também os procedimentos, empíricos e analíticos, para a qualificação inicial das vigas (ASTM, 2005). Traz ainda uma codificação para as principais rupturas que possam vir a ocorrer nas vigas em "I" (Figura 4), mas não descarta a possibilidade de ocorrer outros defeitos ainda não descritos na norma. Essa codificação tem por finalidade fazer o controle de qualidade dessas peças e criar um padrão de qualificação visual das principais rupturas.

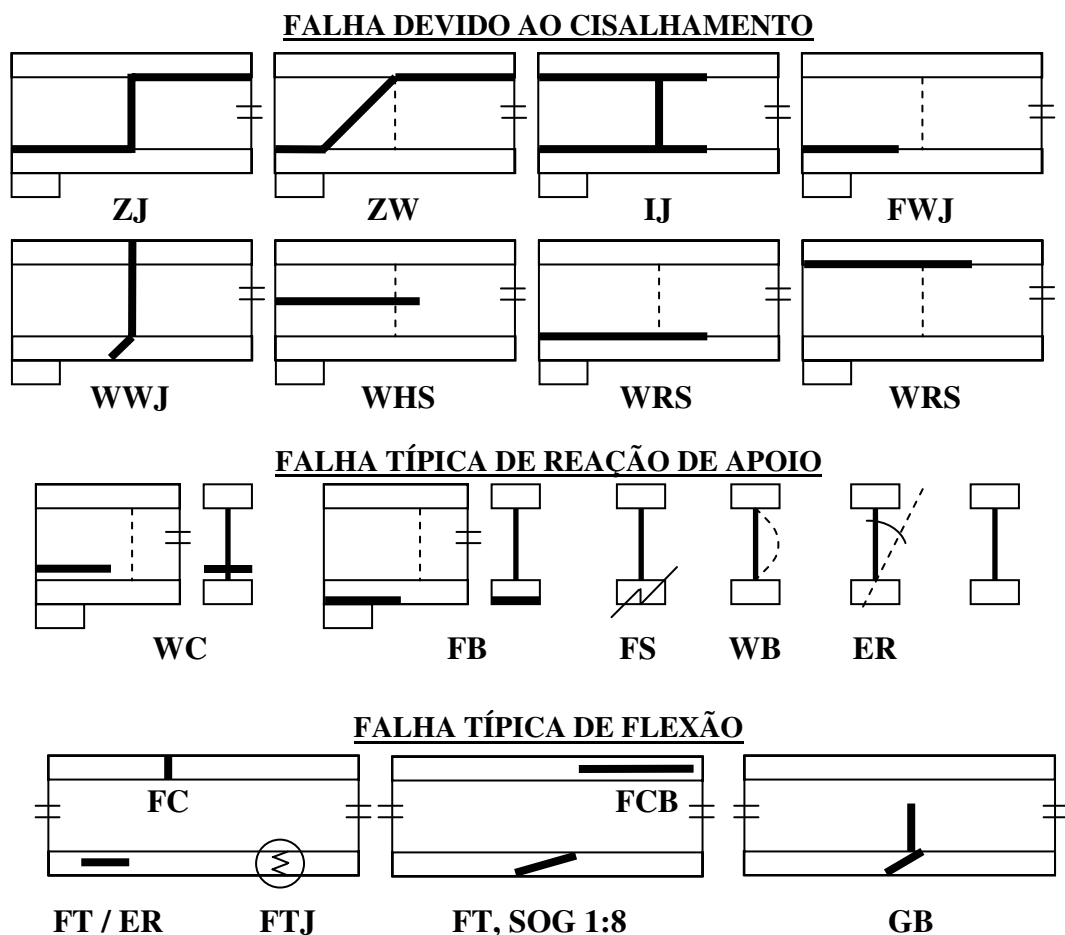


Figura 4. Código das principais falhas em vigas em "I" (ASTM, 2005).

A Associação de Madeira Engenheirada (APA) desenvolveu um programa de padronização denominado *Performance Rated I-joist* (PRI), ou seja, vigas em "I" com

performance controlada. Dentro desta classificação as vigas têm um limite de deflexão para um determinado vão e precisam seguir padrões de produção rigorosos, atendendo às normas contidas na PRI-400 “*Performance Standard for APA EWS I-joist*” (PEDROSA, 2003; APA, 2004).

### 3.4 ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS DE MADEIRA

Segundo a ABENDE, Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivo e Inspeção (2006) os ensaios não-destrutivos de madeira (END), também conhecidos na literatura internacional como *nondestructive evaluation* (NDE), são ensaios realizados em materiais, acabados ou semi-acabados, para verificar a existência ou não de descontinuidades ou defeitos, através de princípios físicos definidos, sem alterar suas características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais.

As primeiras pesquisas relativas à aplicação de ensaios não-destrutivos na determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira foram realizadas na década de 1950, nos Estados Unidos. Ainda que detenham a primazia de conhecimentos nessa área específica, alguns países como Suíça, Romênia, Alemanha, Japão e Reino Unido, entre outros, também já se destacam nesse cenário (TARGA et al., 2005).

Na indústria de produtos florestais, a tecnologia de ensaios não-destrutivos foi desenvolvida e é usada nos programas de classificação dos produtos estruturais, que resultam em materiais projetados com características e desempenho bem definidos. As técnicas não destrutivas aplicadas à madeira contribuem consideravelmente para eliminar a variação no desempenho encontrado em produtos produzidos que utilizam a madeira como matéria-prima (WANG et al., 2001).

Embora seja grande a variedade de técnicas não-destrutivas para avaliação da madeira, algumas delas, têm sido objeto de maior investigação e uso por parte dos institutos de pesquisa. Como exemplo, pode-se citar (TARGA et al., 2005):

- Técnica da flexão estática - consiste na medição estática do módulo de elasticidade ( $E_M$ ) na flexão de um exemplar de madeira, sendo o princípio básico de

funcionamento da máquina de classificação da madeira serrada, *machine stress rating (MSR)*;

- Técnica da vibração transversal (*transverse vibration technique or resonance technique*) - consiste na análise da vibração de um exemplar de madeira, com obtenção do módulo de elasticidade do material a partir da análise das frequências principais de vibração;
- Técnica das ondas de tensão (*stress wave method*) - consiste na aplicação de uma onda de tensão (impacto) no material e análise do fenômeno de propagação desse estímulo. A velocidade de propagação de uma onda de tensão induzida e sua atenuação no material são os principais parâmetros analisados nesses casos; e
- Técnica da propagação de ondas de ultra-som - diversos institutos de pesquisa têm voltado suas atenções para as técnicas de ondas acústicas (*acoustic emission - AE*) e ultra-sônicas (*acoustoultrasonic emission - AU*), que se têm mostrado eficientes para determinados propósitos, como, por exemplo, a avaliação da orientação da grã da madeira.

A técnica de ondas de tensão tem recebido uma atenção e investigação considerável nas últimas décadas, mostrando uma importante ferramenta para se prever as propriedades mecânicas da madeira. As técnicas de ondas de tensão são frequentemente utilizadas para se determinar as propriedades mecânicas de madeira maciça e de compostos de madeira, incluindo pequenos objetos de madeira, madeira serrada, folheado e compostos de madeira (WANG et al., 2001).

A tensão de propagação da onda na madeira é dinâmica e está relacionada diretamente com as propriedades físicas e mecânicas da madeira. Diversos tipos de ondas podem propagar nas estruturas de madeira, tais como ondas longitudinais, transversais e as superficiais. Destas ondas, a longitudinal é a mais rápida e é geralmente o usado para se avaliar as propriedades de madeira (WANG et al., 2001).

### **3.5 RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS APLICADA ÀS VIGAS EM “T”**



O dimensionamento e a verificação da capacidade resistente de vigas, como de qualquer elemento estrutural dependem de grandezas chamadas tensões, as quais se distribuem ao longo das seções transversais de um corpo. Daí vem à necessidade de se conhecer claramente as características ou propriedades das figuras geométricas que formam essas seções transversais (Figura 5). Dentre as principais propriedades geométricas de figuras planas está o momento de inércia (I). O momento de inércia é uma característica geométrica importante no dimensionamento dos elementos estruturais, pois fornece, em valores numéricos, a resistência da peça. Quanto maior for o momento de inércia da seção transversal de uma peça, maior a sua resistência (GASPAR, 2005).

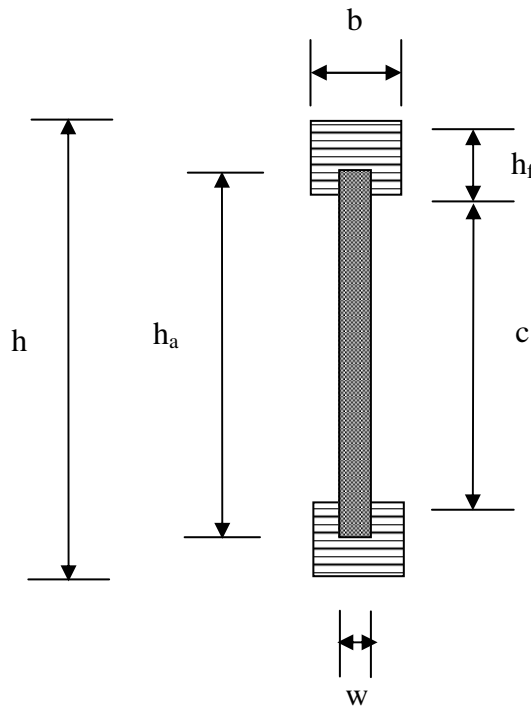


Figura 5. Seção transversal da viga em “I”.

O momento de inércia para uma seção transversal qualquer pode ser definido pela equação 1 (GERE, 2003).

$$I_{xx} = \sum_{i=1}^3 I_{ix} + \sum_{l=1}^3 A_l (CG_{iy} + CG)^2 \quad (\text{eq. 1})$$

$$I_{ix} = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (\text{eq. 2})$$

Onde:

$I_{xx}$  = momento de inércia em torno do eixo  $x$ ,  $mm^4$ ;

$CG$ =centro de gravidade,  $mm$ ;

$b, h$ = largura e altura da peça,  $mm$ ;

$A$  = área,  $mm^2$ .

Quando uma viga sofre a ação de forças ou momentos, são criadas tensões e deformações em seu interior. Na estática a resultante das tensões agindo na seção transversal de uma peça pode ser reduzida a uma força de cisalhamento ( $v$ ) e um momento fletor ( $M$ ). Tanto a força de cisalhamento quanto o momento fletor atuam no plano da viga, ou seja, o vetor da força de cisalhamento está no plano da figura e o vetor do momento fletor é perpendicular ao plano da figura. Tanto as forças de cisalhamento, quanto os momentos fletores são resultantes de tensões distribuídas sobre a seção transversal. Portanto esses valores são conhecidos genericamente como resultantes de tensão (GERE, 2003).

No dimensionamento de uma viga, normalmente é necessário saber de que forma as forças de cisalhamento e os momentos fletores variam ao longo do seu comprimento. Têm também uma importância especial seus valores máximos e mínimos. Informações desse tipo são normalmente obtidas por meio de gráficos em que as forças de cisalhamento e o momento fletor são traçados no eixo das ordenadas e a distância  $x$  ao longo do eixo da viga é traçado como abscissas. Esses gráficos são conhecidos como diagrama de força de cisalhamento e momento fletor (Figura 7 e 8).

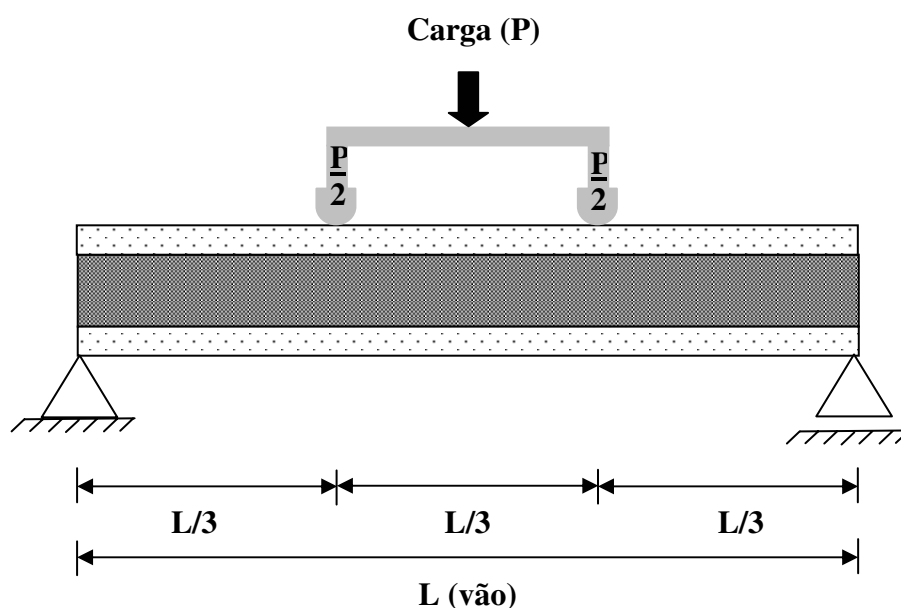


Figura 6. Esquema estático para o ensaio de flexão (ASTM, 1999).

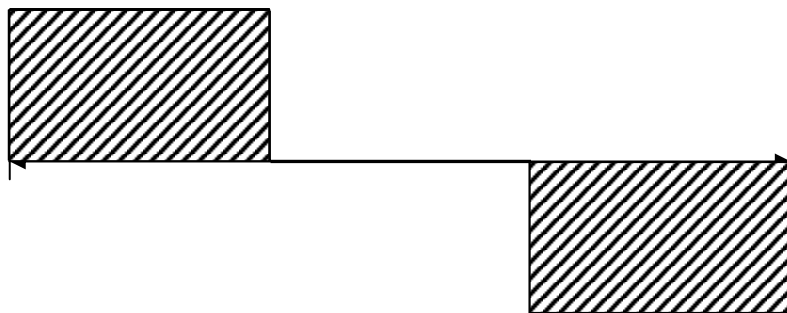


Figura 7. Diagrama de força de cisalhamento para o esquema estático da Figura 6.

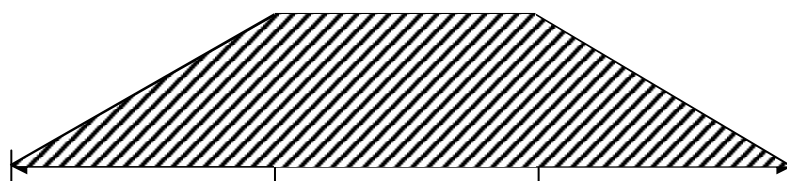


Figura 8. Diagrama de momento fletor para o esquema estático da Figura 6.

Quando uma viga simplesmente apoiada, submetida a duas forças concentradas no mesmo plano  $xy$  que contém o eixo da barra (Figura 6), essas forças produzem deslocamentos nos diversos pontos do eixo da viga dando origem a tensões internas. A parte central da viga está sujeita somente ao momento fletor, sem esforço cortante. Neste trecho diz-se que a sollicitação é de flexão pura. Nas seções da viga onde atuam simultaneamente momento fletor e força cortante diz-se que há flexão simples (GASPAR, 2005).

O momento fletor máximo ( $M$ ) e a força de cisalhamento máximo ( $V$ ) de uma viga simplesmente apoiada (Figura 6), submetidas a duas forças concentradas também podem ser determinadas pelas equações 3 e 4.

$$M = \frac{P_{rup} \cdot L}{6} \quad (\text{eq. 3})$$

$$V = \frac{P_{rup}}{2} \quad (\text{eq. 4})$$

Onde:

$P_{rup}$  = carga de ruptura, N;

$L$  = distância entre os apoios (vão), mm;

As cargas transversais que atuam nas vigas causam deformações, curvando seu eixo longitudinal. Quando se projeta uma viga é freqüentemente necessário calcular as deformações que ocorrerão em vários pontos ao longo do eixo. Denomina-se flecha, ou deslocamento vertical da viga ( $\delta$ ), o deslocamento perpendicular a seu eixo, provocado pela aplicação de uma carga. A curva na qual se transforma o eixo da viga, inicialmente reto, recebe o nome de linha elástica. As especificações para o cálculo ou dimensionamento das vigas, impõem, freqüentemente, limites para as flechas, tal como ocorre com as tensões. Para as vigas em “I” em estudo o limite de deformação é de  $L/350$ , onde  $L$  é o comprimento da viga (GASPAR, 2005).

Quando um material é submetido a ensaios de tração ou compressão são determinadas as tensões e as deformações em várias magnitudes da carga. A relação entre as tensões e deformações pode ser graficamente demonstrada, gerando assim um diagrama de tensões-deformações (Figura 9). Esse diagrama é uma característica do material em particular sendo testado e contém informações importantes sobre as propriedades mecânicas e o tipo de comportamento do material.

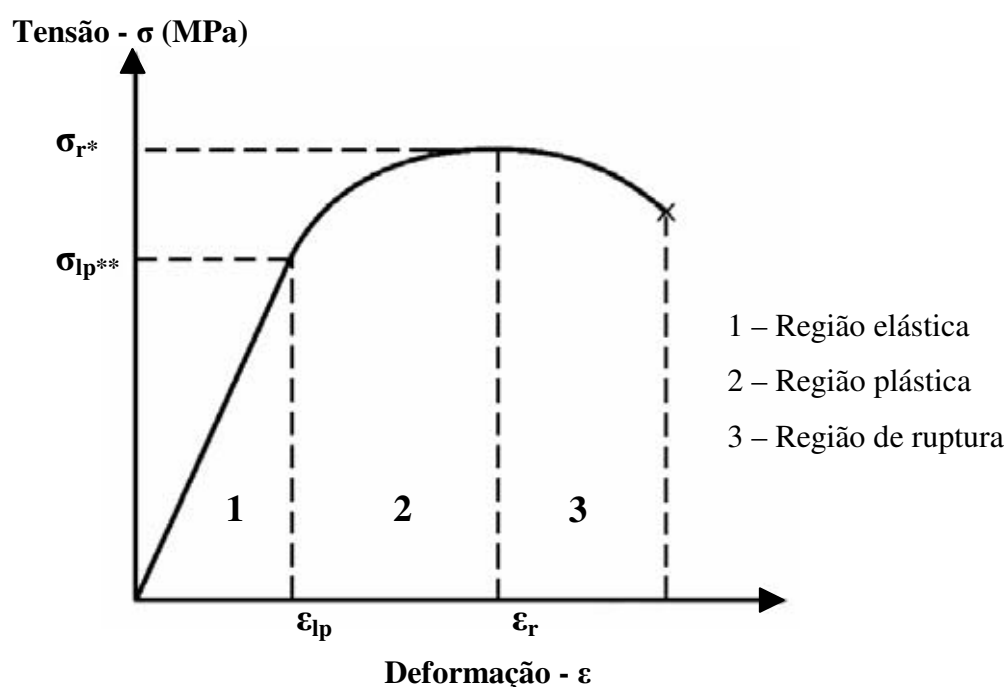


Figura 9. Gráfico de tensão-deformação para madeira (\*r = ruptura; \*\* Ip= limite proporcional).

Os diagramas tensão-deformação ilustram o comportamento de vários materiais, quando submetidos a tração ou compressão. Quando um corpo-de-prova do material é

descarregado, isto é, quando a carga é gradualmente diminuída até zero, a partir do limite proporcional, a deformação sofrida durante o carregamento desaparecerá parcial ou completamente. Esta propriedade do material, pela qual ele tende a retornar à forma original é denominada elasticidade. Quando a barra volta completamente à forma original, diz-se que o material é perfeitamente elástico; mas se o retorno não for total, o material é parcialmente elástico. Neste último caso, a deformação que permanece depois da retirada da carga é denominada deformação permanente.

A relação linear da função tensão-deformação foi apresentada por Robert Hooke em 1678 e é conhecida por *LEI DE HOOKE*, definida pela equação 5.

$$\sigma = E_M \cdot \varepsilon \quad (\text{eq. 5})$$

Onde:

$\sigma$  = tensão normal, N/mm<sup>2</sup>;

$E_M$  = módulo de elasticidade do material, N/mm<sup>2</sup>;

$\varepsilon$  = deformação específica, mm/mm.

O Módulo de Elasticidade representa o coeficiente angular da parte linear do diagrama tensão-deformação e é diferente para cada material. A lei de HOOKE é válida para a fase elástica dos materiais. Por este motivo, quaisquer que sejam os carregamentos ou solicitações sobre o material, vale a superposição de efeitos, ou seja, pode-se avaliar o efeito de cada solicitação sobre o material e depois somá-los.

### **3.6 MODELO TEÓRICO E EXPERIMENTAL**

As tentativas de se estimar as propriedades das vigas em “T” ou em caixa surgiram em meados do ano de 1924, segundo NEWLIN et al. (1956). Estes autores estimaram através de modelos teóricos a flecha de vigas em “T” causadas pelo cisalhamento (equação 6).

$$\delta = \frac{P_{rup} \cdot L^3}{48 \cdot E_M \cdot I} + \frac{K \cdot P_{rup} \cdot L}{G}$$

•  
•

$$\delta = \delta_f + \delta_c \quad (\text{eq. 6})$$

Onde:

$\delta$ =flecha, mm;

$P_{rup}$  = carga de ruptura, N;

$L$ =distância entre os apoios (vão), mm;

$E$ = módulo de elasticidade da viga, N/mm<sup>2</sup>;

$I$ = momento de inércia da viga, mm<sup>4</sup>;

$K$ = variável dependente das propriedades geométricas da viga;

$G$ = módulo de elasticidade no cisalhamento, N/mm<sup>2</sup>;

$\delta_f$ =flecha relativa à flexão, mm;

$\delta_c$ =flecha relativa ao cisalhamento, mm.

As vigas produzidas com a alma de compensado e os flanges de madeira maciça eram testadas para serem usadas na construção de aviões. A partir da década de 60 surgiram outros modelos para se estimar as propriedades das vigas em “I”, mas não mais com objetivo de se utilizar essas vigas na construção de aviões, mas sim na construção civil. Logo em 1979, iniciaram-se os primeiros esforços para se desenvolver modelos de simulação de vigas em “I” de madeira, baseado em métodos de elementos finitos (GRANDMONT et al., 2006).

Ao longo do tempo surgiram vários modelos teóricos e computacionais para se estimar de forma precisa as propriedades das vigas. A dificuldade de desenvolver modelos teóricos e computacionais para determinação das propriedades das vigas em “I” estava na caracterização dos materiais que a compõe (GRANDMONT et al., 2006).

Na literatura são encontrados diversos modelos teóricos para de se estimar as propriedades de resistência e rigidez das vigas em “I” de madeira. Em 1979 Fergus desenvolveu o primeiro modelo computacional para simulação de vigas em “I”, cujo objetivo era poupar tempo e dinheiro nos trabalhos experimentais, além de estimar de maneira precisa as propriedades das vigas. A partir daí surgiram diversos outros modelos computacionais para se estudar não somente as propriedades de resistência e rigidez das

vigas em “I”, mas também a influência dos compostos (alma, flange e adesivo) nas suas propriedades (GRANDMONT et al., 2006; GUAN, 2004).

Dentre os modelos teóricos para se estimar as propriedades mecânicas das vigas em caixa ou em “I” pré-fabricadas de madeira (Figura 10) encontra-se o modelo teórico proposto pela USDA (1999). O modelo proposto traz algumas equações (equações 7, 8 e 9) para se determinar a rigidez a flexão ( $EI$ ) e o módulo de ruptura ( $f_M$ ) das vigas a partir da propriedades do flange e alma, que a compõe.

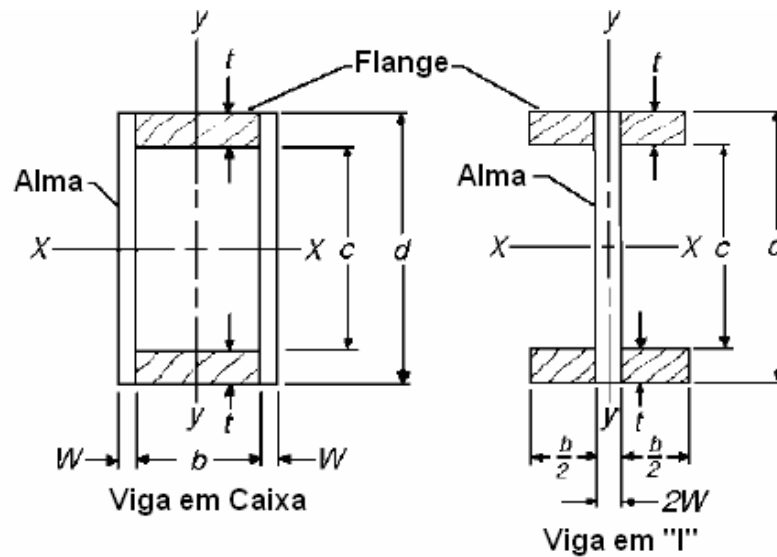


Figura 10. Dimensões estruturais das vigas em “I”, com a alma formada por painéis (USDA, 1999).

$$(EI)_x = E_{Mf} \cdot I_M + E_{Ma} \cdot I_a \quad (\text{eq. 7})$$

$$(EI)_x = \frac{1}{12} [E_{Mf} \cdot (d^3 - c^3)b + 2 \cdot E_{Ma} \cdot w \cdot d^3] \quad (\text{eq. 8})$$

$$f_M = \frac{6 \cdot M}{(d^3 - c^3) \cdot \frac{b}{c} + \frac{2 \cdot E_{Ma} \cdot w \cdot d^2}{E_{Mf}}} \quad (\text{eq. 9})$$

Onde:

$EI$ = rigidez a flexão,  $N \cdot mm^2$ ;

$E_{Mf}$ ,  $E_{Ma}$ = módulo de elasticidade dinâmico do flange e da alma,  $N/mm^2$ ;

$I_f$ ,  $I_a$ = Momento de Inércia do flange e da alma,  $mm^4$ ;

$b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $w$ = dimensões das peças conforme Figura 10;

$M$ = momento fletor da viga,  $N \cdot mm$ .

DANSO et al. (2004) determinaram a partir de modelos teóricos já existentes as propriedades de rigidez à flexão de madeira laminada colada (equação 10).

$$(EI)_x = \sum_{i=1}^3 [(E_{Mi} \cdot I_i) + (E_{Mi} \cdot A_i \cdot a^2)]$$

⋮

$$EI = [(E_{Mfs} \cdot I_{fs}) + (E_{Mfs} \cdot A_{fs} \cdot a_{fs}^2)] + [(E_{Mfi} \cdot I_{fi}) + (E_{Mfi} \cdot A_{fi} \cdot a_{fi}^2)] + [(E_{Ma} \cdot I_a) + (E_{Ma} \cdot A_a \cdot a_a^2)] \quad (\text{eq. 10})$$

Onde:

$EI$  = rigidez a flexão,  $N \cdot mm^2$ ;

$E_{Mfs}$ ,  $E_{Mfi}$ ,  $E_{Ma}$  = módulo de elasticidade do flange superior, do flange inferior e da alma,  $N/mm^2$ ;

$I_{fs}$ ,  $I_{fi}$ ,  $I_a$  = momento de inércia do flange superior, flange inferior e da alma,  $mm^4$ ;

$a_{fs}$ ,  $a_{fi}$ ,  $a_a$  = distância do centro de gravidade da peça simples ao centro de gravidade da peça composta,  $mm$ ;

Outro procedimento alternativo para se analisar as tensões em vigas compostas de madeira é o método das seções transformadas. O método consiste em transformar a seção transversal de uma viga composta em uma seção transversal equivalente de uma viga imaginária que é constituída de apenas um material, sendo essa nova seção chamada de seção transformada. A viga de seção transformada então é analisada de maneira convencional de uma viga de um único material (GERE, 2005).



## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1 AMOSTRAGEM**

No trabalho foram produzidas 10 vigas em “I” utilizando-se OSB e compensado na alma, LVL nos flanges e o adesivo estrutural resorcinol-formaldeído Cascophen RS 215. Dessas 10 vigas em “I”, cinco foram produzidas com o flange de LVL e alma de compensado e cinco com o flange de LVL e a alma de OSB.

### **4.2 MATÉRIA-PRIMA E MONTAGEM DA VIGA EM “I”**

Para a montagem das vigas em “I” foram adquiridos dois painéis comerciais, sendo um de OSB multiuso tipo exportação de *Pinus sp.* (244,00 x 122,00 x 0,95 cm<sup>3</sup>) e o outro de compensado naval de três lâminas de *Pinus sp.* (250,00 x 160,00 x 1,00 cm<sup>3</sup>). Os painéis foram desdobrados paralelamente ao seu eixo resistente nas dimensão de 15,00 cm de altura e 176,00 cm de comprimento. Os flanges foram produzidos a partir de painéis de LVL, nas dimensões de 176,00 x 4,00 x 4,00 cm<sup>3</sup>, sendo necessário a produção de 11 painéis (100,00 x 23,00 x 4,00 cm<sup>3</sup>), já que esse painel não está disponível no mercado brasileiro.

#### **4.2.1 Produção dos LVL**

Os LVL utilizados na fabricação da vigas em “I” foram produzidos no Laboratório de Laminação do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP. A produção dos LVL é composta de três etapas: a produção e preparação das lâminas, preparação e aplicação do adesivo e a produção e desdobro dos painéis.

##### **4.2.1.1 Produção e preparação das lâminas**

As lâminas de madeira foram obtidas a partir da laminação de toras de madeira da espécie *Pinus kesiya*, plantada no Horto Florestal da ESALQ/USP. O processo de obtenção das lâminas seguiu a mesma metodologia utilizada por ALMEIDA et al (2004). As toras de madeira após descascadas passaram por um processo de cozimento a uma temperatura de

70° C por 11 horas. Depois de cozidas as toras foram laminadas em um torno laminador (Figura 11) , resultando em lâminas com espessura nominal de 0,20 cm e guilhotinadas nas dimensões de 100,00 x 100,00 cm<sup>2</sup>.



Figura 11. Etapas para obtenção das lâminas de madeira: laminação, classificação, ressecagem e guilhotinamento.

As lâminas em suas dimensões finais (100,00 x 100,00 x 0,20 cm<sup>3</sup>) passaram por um processo de secagem natural, para isso foram dispostas em suportes de madeira, providos de separadores, em um local fechado. As lâminas alcançaram um teor de umidade médio de 11%. As lâminas produzidas passaram por um processo de classificação segundo a Norma Brasileira NBR-9531- Chapas de Madeira Compensada: Classificação, da Associação Brasileira de Normas Técnicas-ABNT (1986), ilustrados pela ABIMCI (2002). Os critérios de classificação das lâminas levam em consideração o tipo, a quantidade e dimensões dos defeitos apresentados, atribuídos através de inspeção visual (Figura 12). As lâminas foram divididas em classes “A” a “D”, sendo “A” a de melhor qualidade e “D” a de qualidade inferior. Essas lâminas secas e classificadas foram estocadas em um local fechado e arejado.

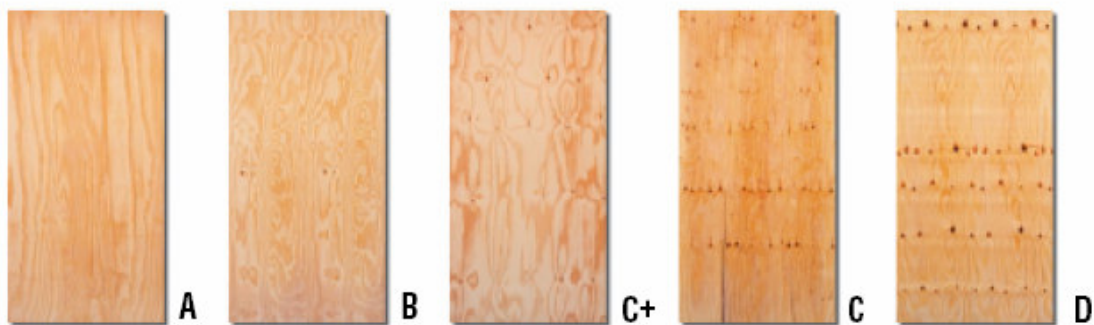


Figura 12. Qualidade das lâminas de *Pinus sp.* (ABIMCI, 2002).

Do total de lâminas classificadas foram utilizadas 66 lâminas para a produção dos LVL, distribuídas de acordo com a sua classificação (Tabela 2).

Tabela 2. Distribuição das 66 lâminas em categorias.

Classe	Distribuição das lâminas	
	Quantidade de lâminas (100 x 100 x 0,2 cm <sup>3</sup> )	Quantidade de lâminas (100 x 23 x 0,2 cm <sup>3</sup> )
A	10	40
B	18	72
C+	19	76
C	19	76
Total	66	264

As lâminas utilizadas na produção dos LVL passaram por um processo de ressecagem (Figura 11), com o objetivo de alcançarem teores de umidades entre 7 e 8%, para evitar a formação de bolhas vapor durante a prensagem. A aferição do teor de umidade das lâminas se deu pelo método gravimétrico utilizado-se uma balança com precisão de 0,10 g e uma estufa a temperatura de  $103 \pm 2^\circ \text{C}$ . O processo de secagem iniciou com a formação de um colchão com cinco lâminas, sendo a primeira e a última lâmina somente para cobrir as lâminas que seriam utilizadas. O colchão foi colocada em uma prensa da Marca Martil a temperatura de  $110^\circ \text{C}$ , a uma pressão de 0,69 MPa, por 15 minutos, tempo esse necessário para as lâminas alcançarem o teor de umidade desejado.

Após a secagem as lâminas nas dimensões de 100,00 x 100,00 x 0,20 cm<sup>3</sup> foram guilhotinadas nas dimensões de 100,00 x 23,00 x 0,20 cm<sup>3</sup>, tamanho esse utilizado para produzir os painéis.

#### 4.2.1.2 Preparação e aplicação do adesivo

A resina utilizada na preparação do adesivo foi a resina CR-7010 (Tabela 3), fenol-formol, produzida pela empresa Schenectedy Crios. Na formulação do adesivo foram utilizados além da Resina CR-7010, farinha de trigo comum, farinha de côco Albex n.º 9 e água (Tabela 4). A farinha de trigo utilizada na formulação do adesivo teve por objetivo aumentar o rendimento do adesivo, enquanto a farinha de côco e a água teve como objetivo alterar as propriedades do adesivo, principalmente a viscosidade. Os componentes do adesivo foram misturados em uma bateadeira industrial por 10 minutos até torna-se um líquido homogêneo. A viscosidade do adesivo foi estimada através do tempo de escoamento em Copo Ford nº 8, aonde se observou que essa estava dentro dos limites aceitáveis pelo fabricante (Tabela 3).

Tabela 3. Propriedades da Resina CR-7010

<b>Propriedades</b>	
Aparência	Líquido Viscoso Avermelhado
Viscosidade a 25°	550 - 850 cp
Sólidos a 105°	48 - 50%
pH	12 - 13%
Densidade a 25°	1,200 a 1,250 g/cm <sup>3</sup>

Fonte: Schenectedy Crios.

Tabela 4. Formulação do adesivo utilizado na produção dos LVL.

<b>Formulação do adesivo</b>	
Componentes do adesivo	Partes
Resina CR-7010	100
Farinha de trigo	5
Farinha de côco	8
Água	5
Total	118

Fonte: Formulação sugerida pela Schenectady Crios.

A montagem do LVL começou com a aplicação do adesivo por meio de um aplicador de rolo (Figura 13), a uma gramatura de 190 g/m<sup>2</sup> em linha simples de colagem.



Figura 13. Aplicação do adesivo com o aplicador de rolo.

#### 4.2.1.3 Produção e desdobro dos painéis

Para cada painel foram utilizadas 22 lâminas ( $100,00 \times 23,00 \times 0,20 \text{ cm}^3$ ), sendo de três a quatro lâminas da classe “A”, seis da classe “B”, de seis a sete das classes “C+” e “C”. A distribuição das lâminas dentro e entre os painéis se deu de forma aleatória. Foram sorteadas para cada painel três lâminas da classe “A” e seis das classes “B”, “C+” e “C”, as lâminas que sobraram foram sorteadas aleatoriamente e distribuídas entre os painéis. As 22 lâminas dentro de cada painel foram sorteadas aleatoriamente.

As lâminas foram coladas facialmente produzindo assim 21 linhas de cola. Após a montagem do colchão com as 22 lâminas esses foram pré-prensados a frio por 15 minutos e em seguida prensados a quente a uma temperatura de  $150^\circ \text{C}$ , durante 45 minutos, a 2,75 MPa (Figura 14).



Figura 14. Etapas para a montagem do LVL: aplicação do adesivo, montagem do colchão, prensagem a frio e a quente.

Após 24 horas da prensagem os painéis foram esquadrejados, depois cortados na dimensão desejada do flange (96,00 x 4,00 x 4,00 cm<sup>3</sup>). Por último os 60 flanges produzidos foram colocados câmara climática (20° C, 65%) até atingirem massa constante.

#### 4.2.2 Montagem das vigas em “I”

A resina Cascophen RS 215, resorcinol-formaldeído, foi utilizada para fazer a junção entre a alma e o flange. Utilizou-se para tanto três grampos, dois nos extremos da vigas e um na parte central. A alma se ligou a um flanges em cada uma de suas extremidades (Figura 15).

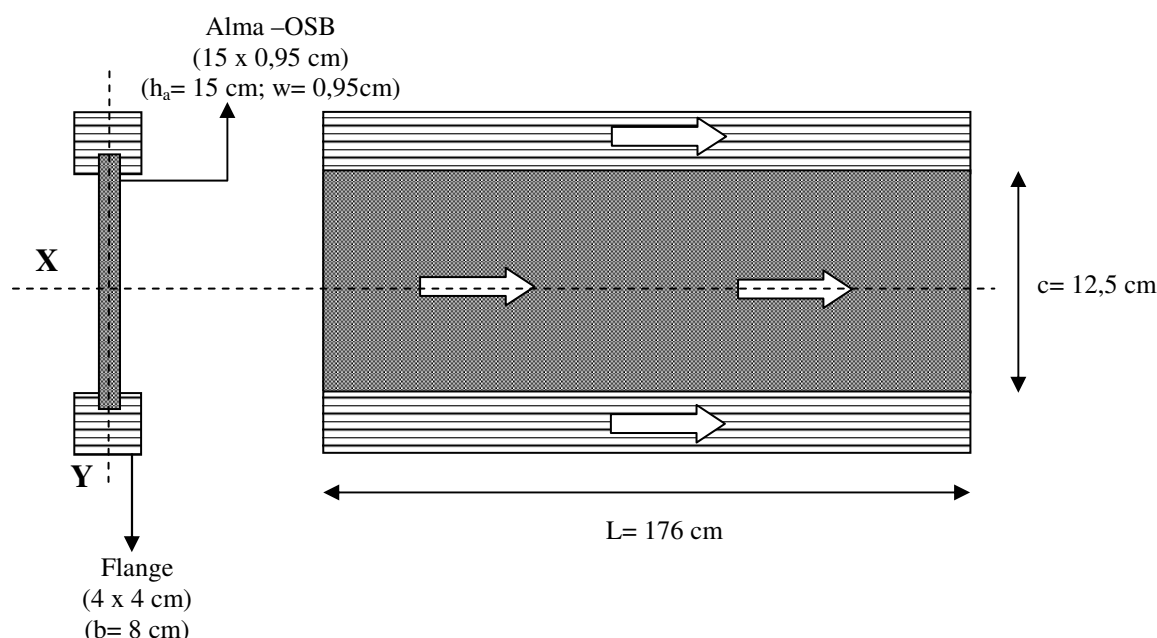


Figura 15. Eixos estruturais (X, Y), dimensões dos componentes e da viga em “I” (setas indicam o sentido paralelo às fibras na madeira sólida e do OSB).

A resina Cascophen foi aplicada a uma gramatura de 350 g/m<sup>2</sup> em linha dupla, com a formulação indicada pelo fabricante de cinco partes da resina resorcinol formaldeído com uma parte de endurecedor. A aplicação da cola foi feita feita por espátulas.

As vigas em “I” foram confeccionadas considerando o  $E_M$  dos flanges, determinado conforme item 4.3.1.2 (Pág. 48) . Para as vigas em “I” com a alma de compensado a viga em “I” número 1 foi produzida com flanges com menores  $E_M$ , enquanto a viga em “I” número 5 foi produzida com os flanges com maiores  $E_M$ . Para as vigas em “I” com a alma

de OSB a viga em “I” número 6 foi produzida com flanges com menores  $E_M$ , enquanto a viga em “I” número 10 foi produzida com os flanges com maiores  $E_M$ .

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS COMPOSTOS DE MADEIRA

#### 4.3.1 Propriedades dos flanges

##### 4.3.1.1 Ensaio das emendas

Para se determinar o tipo de emenda para se fazer a junção dos LVL foi realizado o ensaio de flexão estática segundo a norma ASTM D198 (1999) (Figura 16), a velocidade de ensaio foi de 9,6 mm/min determinada pela equação 11.

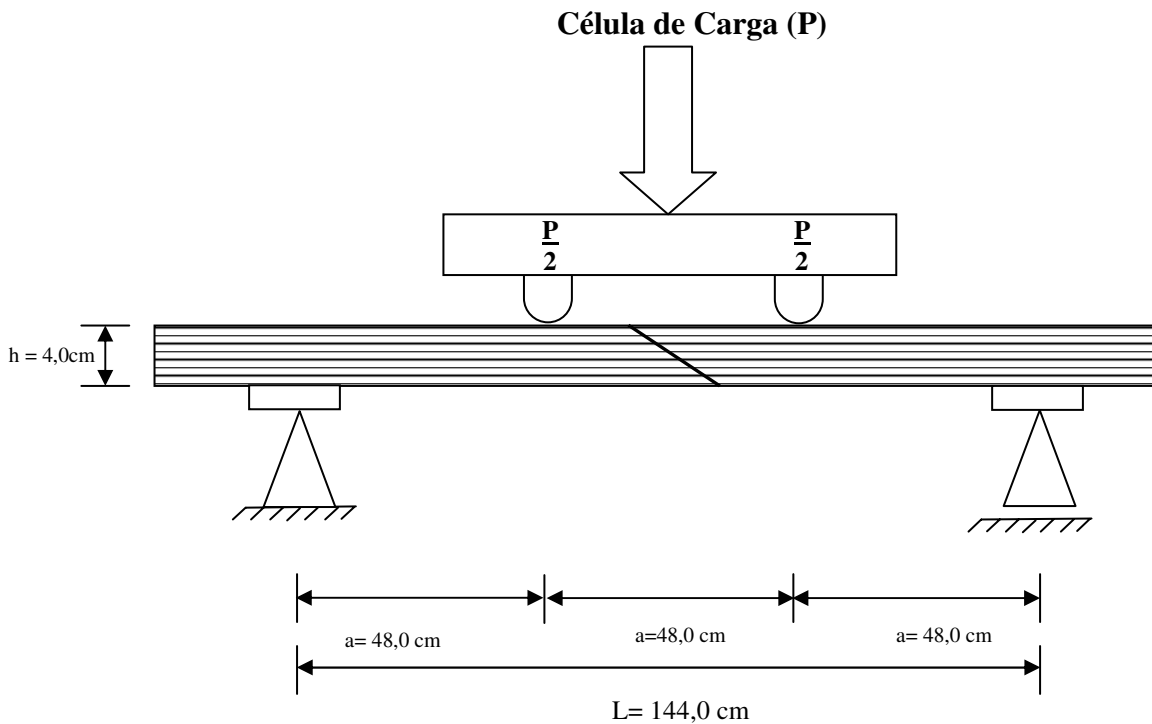


Figura 16. Esquema proposto para o ensaio de flexão estática.

$$N = \frac{Z \cdot a \cdot (3 \cdot L - 4 \cdot a)}{3 \cdot h} \quad (\text{eq. 11})$$

Onde:

$N$  = velocidade de ensaio, mm/min;

$Z$  = constante no valor e 0,001mm/mm.min;

$a$  = distância da aplicação da carga até o ponto de apoio, mm;

$L$  = distância entre os apoios da viga (vão), mm;

$h$  = altura da viga, mm.

Foram propostos três tipos de emendas: macho-fêmea; emenda em bisel, com relação altura e comprimento do bisel 1:2; e emenda em bisel, com relação altura e tamanho do bisel 1:4 (Figura 17). A emenda macho-fêmea foi feita com uma tupia com discos de 6 mm e as emendas em bisel foram feitas em uma esquadrejadeira DEWALTE. Foram feitas duas repetições por emendas.

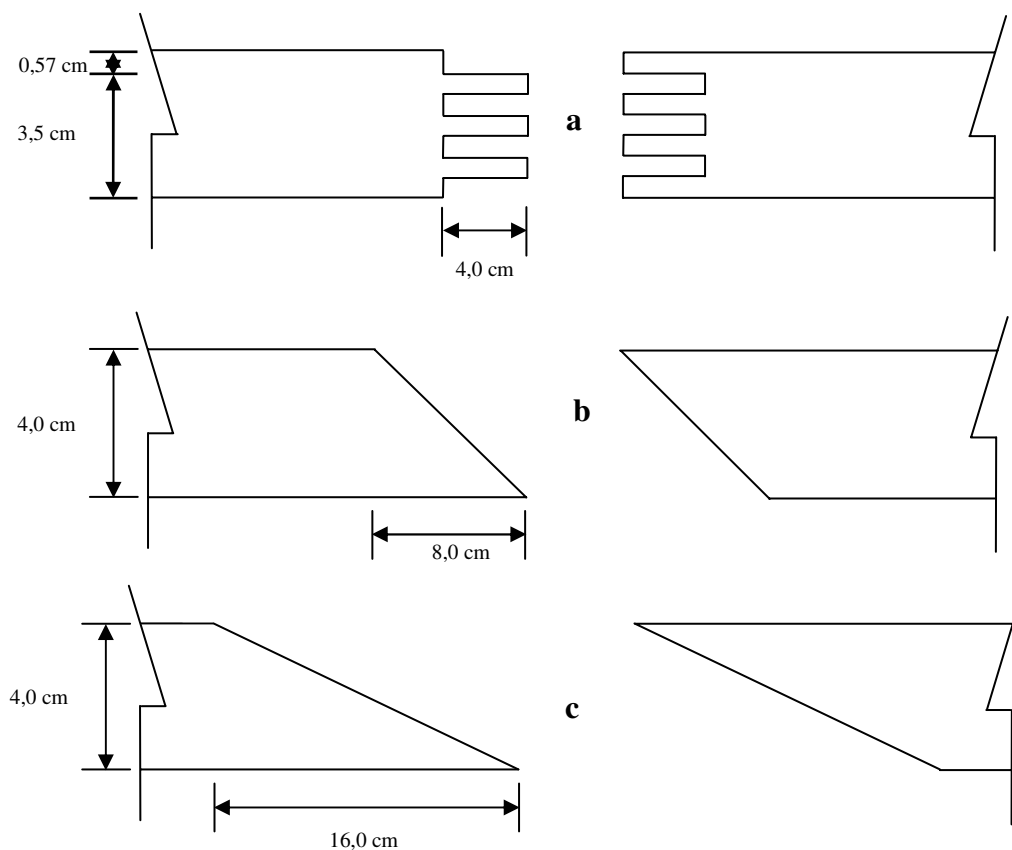


Figura 17. Tipos de emendas testados para se fazer a junção dos LVL: emenda macho-fêmea (a), bisel 1:2 (b) e bisel 1:4 (c).

A junção entre dois LVL ( $96,00 \times 4,00 \times 4,00 \text{ cm}^3$ ) para a produção dos flanges foi feita através da junção em bisel (*scarf-joist*) utilizando-se o adesivo resorcinol formaldeído e prensagem a frio. A relação entre a altura do flange e a largura do bisel foi de 1:4 (Figura 17 c). Para a união entre os LVL foi utilizado a resina Cascophen RS 215, resorcinol-formaldeído.

#### 4.3.1.2 Ensaio dos flanges

Após a junção dos LVL e a produção dos flanges foi determinado o Módulo de Elasticidade ( $E_M$ ) pelos métodos não-destrutivos de flexão estática segundo a norma



ASTM D 198 (1999) e de técnica de ondas de tensão. O ensaio para determinação do  $E_M$  dos flanges pelo método de flexão estática foi realizado na máquina de ensaios Universal INSTRON e os valores do  $E_M$  foram obtidos pela equação 12.

$$E_M = \frac{P' \cdot a}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \delta} (3 \cdot L^2 - 4 \cdot a^2) \quad (\text{eq.12})$$

Onde:

$E_M$  = módulo de elasticidade, N/mm<sup>2</sup>;  
 $P'$  = carga no limite proporcional, N;  
 $a$  = distância da aplicação da carga até o ponto de apoio, mm;  
 $L$  = distância entre os apoios da viga (vão), mm;  
 $b$  = largura do LVL, mm;  
 $h$  = altura do LVL, mm;  
 $\delta$  = flecha atuante, mm.

O valor do módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{MD}$ ) dos flanges foi determinado pelo método não-destrutivo de ondas de tensão, utilizando as equações 13 e 14 (METRIGUARD, 1997). Para a determinação do  $E_{MD}$  foi utilizado o equipamento Stress Wave Timer Metriguard 239A, aparelho que mede o tempo de passagem de uma onda entre a fonte geradora e a receptora da onda, com o tempo e a distância percorrido pela onda foi determinada a velocidade de propagação. De posse da velocidade da propagação da onda, da massa específica e da aceleração da gravidade 9,804 m/s<sup>2</sup> foi determinado o  $E_{MD}$  pela equação 14.

$$v = \frac{L}{t \cdot 10^{-6}} \quad (\text{eq. 13})$$

$$E_{MD} = \frac{v^2 \cdot d}{g} \cdot 10^{-5} \quad (\text{eq. 14})$$

Onde:

$E_{MD}$  = módulo de elasticidade dinâmico, N/mm<sup>2</sup>;  
 $v$  = velocidade da onda longitudinal, m/s;  
 $d$  = densidade, kg/m<sup>3</sup>;  
 $g$  = aceleração da gravidade, 9,804 m/s<sup>2</sup>;  
 $L$  = distância entre os sensores, m;  
 $t$  = tempo de propagação da onda,  $\mu$ s.

### 4.3.2 Propriedades da alma

Os  $E_M$  da alma de OSB e de compensado foram obtidos por meio de ensaios de flexão estática realizados na máquina de ensaios universal INSTRON, segundo a norma ASTM D1037 (1999). A velocidade de ensaio foi de 4,56 mm/min para o OSB e 4,80 mm/min para o compensado, determinados segundo a equação 15.

$$N = \frac{Z \cdot L^2}{6 \cdot w} \quad (\text{eq. 15})$$

Onde:

$N$ = velocidade de ensaio, mm/min;

$Z$ = constante no valor e 0,0015 mm/mm.min;

$L$ = distância entre os apoios da viga (vão), mm;

$w$ = espessura do painel, mm.

O número de repetições por tratamentos foi determinado pela norma ASTM D1037 (1999). Foram ensaiados um total de trinta e dois corpos de provas, sendo dezesseis corpos de prova por cada painel (compensado e OSB). Dos dezesseis, oito foram ensaiados para cada eixo (paralelo e perpendicular).

### 4.3.3 Ensaio de ligação interna (LVL) e resistência na linha de cola (LVL/Compensado e LVL/OSB)

Nos painéis de LVL foram realizados os ensaios de ligação interna (Figura 18) e de resistência na linha de cola entre o LVL e OSB (Figura 19); e LVL e compensado (Figura 19), segundo a norma ASTM D1037 (1999). Os ensaios foram realizados em uma máquina de ensaio Universal INSTRON, sendo vinte dois corpos de prova por ensaio, com cabeça de carga para ensaio de cisalhamento. A velocidade de ensaio foi de 0,6 mm/min.

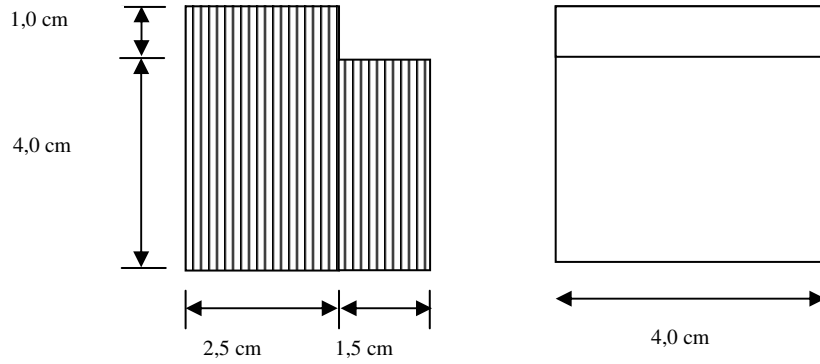


Figura 18. Dimensões dos corpos de prova de ligação interna de LVL.

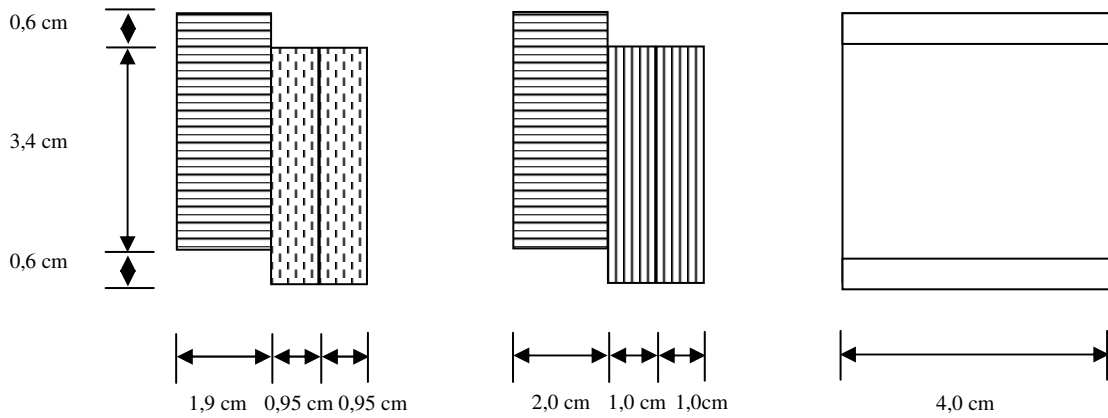


Figura 19. Dimensões dos corpos de prova de resistência na linha de cola, entre o LVL e o OSB (a) e entre LVL e compensado.

#### 4.4 AVALIAÇÃO TEÓRICA DAS VIGAS EM “T”

O modelo teórico para se avaliar a rigidez à flexão ( $EI$ ) e o módulo de ruptura ( $f_M$ ) das vigas em “T” foi baseado no modelo geral proposto por DANSOH et al (2004), segundo as equações 16 e 18. Para se estimar a flecha ( $\delta_{est}$ ) das vigas em “T” foi utilizada a equação 20, propostas pela norma ASTM D198 (1999).

$$(EI)_x = \sum_{i=1}^3 \left[ (E_{Mi} \cdot I_i) + (E_{Mi} \cdot A_i \cdot a^2) \right] \quad (\text{eq. 16})$$

∴

$$EI = \left[ (E_{Mfs} \cdot I_{fs}) + (E_{Mfs} \cdot A_{fs} \cdot a_{fs}^2) \right] + \left[ (E_{Mfi} \cdot I_{fi}) + (E_{Mfi} \cdot A_{fi} \cdot a_{fi}^2) \right] + \left[ (E_{Ma} \cdot I_a) + (E_{Ma} \cdot A_a \cdot a_a^2) \right]$$

$$E_M = \frac{EI}{I_{XX}} \quad (\text{eq. 17})$$

$$f_M = \frac{M \cdot E_{Mfi}}{E \cdot I} \cdot y \quad (\text{eq. 18})$$

$$M = \frac{P_{rup} \cdot L}{6} \quad (\text{eq. 19})$$

$$\delta_{est} = \frac{P \cdot L \cdot a^2}{48 \cdot E \cdot I} \quad (\text{eq. 20})$$

Onde:

$EI$ = rigidez a flexão,  $N \cdot mm^2$ ;

$E_M, E_{Mfs}, E_{Mfi}, E_{Ma}$ = módulo de elasticidade da viga em "I", do flange superior, do flange inferior e da alma,  $N/mm^2$ ;

$I_{fs}, I_{fi}, I_a$ = momento de inércia do flange superior, flange inferior e da alma,  $mm^4$ ;

$a_{fs}, a_{fi}, a_a$ = distância do centro de gravidade da peça simples ao centro de gravidade da peça composta,  $mm$ ;

$A_{fs}, A_{fi}, A_a$  = área da peça simples,  $mm^2$ ;

$I_{XX}$ = momento de inércia no eixo x,  $mm^4$ ;

$f_M$ = módulo de ruptura,  $N/mm^2$ ;

$M$ = momento fletor,  $N \cdot mm$ ;

$P_{rup}$ = carga de ruptura,  $N$ ;

$L$ = distância entre os apoios da viga (vão),  $mm$ ;

$y$ = metade da altura da viga,  $mm$ ;

$\delta_{est}$ = flecha estimada,  $mm$ ;

$P$ = carga aplicada,  $N$ ;

$a$ = distância entre a aplicação das cargas,  $mm$ .

Por meio da equação 21 foram determinadas as tensões de cisalhamento entre a alma e o flange ( $\tau_{fw}$ ) (USDA, 1987).

$$\tau_{fw} = \left( 3 \cdot \frac{V}{2} \right) \cdot \left( \frac{E_{MF} \cdot b \cdot (h + c)}{E_{Mf} \cdot b \cdot (h^3 - c^3) + 2 \cdot E_{Ma} \cdot w \cdot h^3} \right) \quad (\text{eq. 21})$$

Onde:

$V$ = força cortante máxima,  $N$ ;

$E_{Mf}, E_{Ma}$ = módulo de elasticidade do flange e da alma,  $N/mm^2$ ;

$b, h, c, w$ = dimensões das peças conforme Figura 5,  $mm$ .

#### 4.5 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DAS VIGAS EM “I”

As dimensões das vigas em “I” (Figura 20) foram obtidas pela medição direta das vigas com dois paquímetros: um digital e um analógico; e por uma trena métrica.

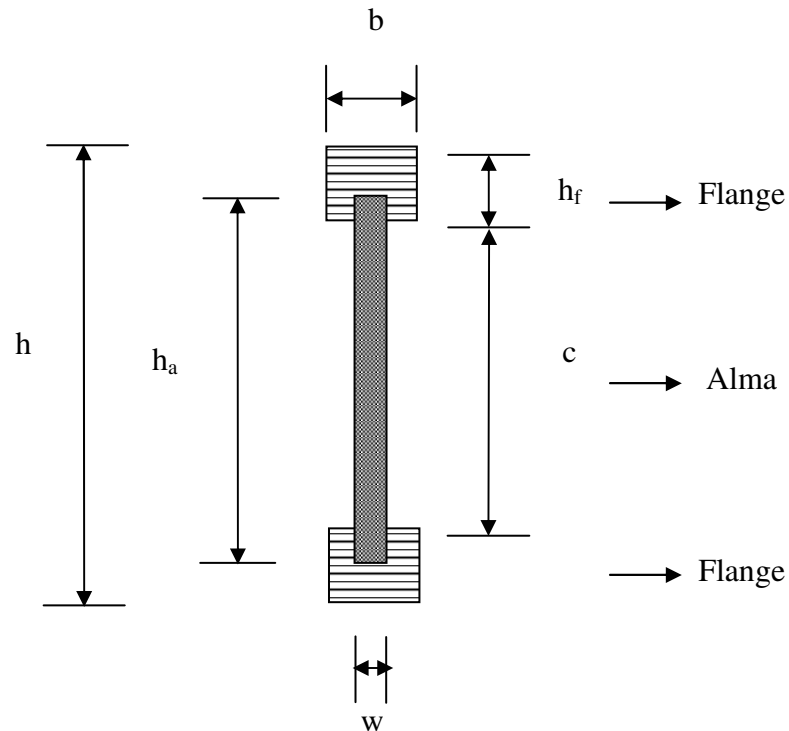


Figura 20. Seção transversal da viga em “I”.

O momento de inércia no eixo x ( $I_{xx}$ ) foi obtido pelas equações 22 e 23. No cálculo do  $I_{xx}$  foram utilizados valores médios obtidos nas medições do flange e da alma (Figura 20).

$$I_{xx} = \sum_{i=1}^3 I_{ix} + \sum_{i=1}^3 A_i (CG_{iy} + CG)^2 \quad (\text{eq. 22})$$

$$I_{ix} = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (\text{eq. 23})$$

Onde:

$I_{xx}$  = momento de inércia em torno do eixo x,  $\text{mm}^4$ ;

CG = centro de gravidade, mm;

b, h, h<sub>a</sub> = dimensões das peças conforme Figura 20, mm;

A = área,  $\text{mm}^2$ .

Na avaliação experimental das vigas em “I” foi realizado o método de flexão estática segundo a norma ASTM D198 (1999) até a ruptura da viga, no qual se obteve o  $E_M$  e  $f_M$  e a  $\delta$  (Figura 21). A velocidade de ensaio foi de 0,6 a 1,4 mm/min, até ajustar o tempo médio de ensaio em 10 minutos. A relação entre a altura ( $h$ ) e a distância de aplicação da carga ( $a$ ) foi de 1:2,7.

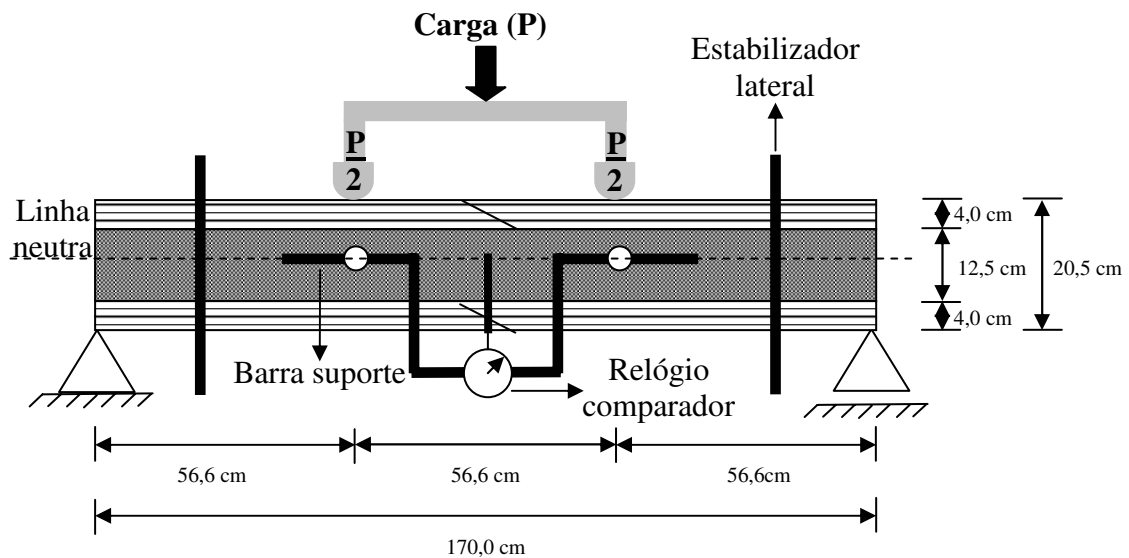


Figura 21. Esquema estático para o ensaio de flexão estática.

O ensaio de flexão estática para obtenção dos valores experimentais das propriedades mecânicas das vigas em “I” foi realizado na máquina de ensaios Universal INSTRON. As equações 24 e 25 foram utilizadas para se determinar o  $E_M$  e  $f_M$  das vigas em “I” (ASTM, 1999-b). A flecha experimental ( $\delta$ ) foi medida na flexão pura, sem o efeito do cisalhamento. A  $\delta$  foi obtida diretamente pela leitura relógio comparador da marca MAHR modelo MILLILAST 1082 com precisão de 0,01 mm (Figura 21), cujos resultados foram obtidos na máquina de ensaio universal INSTRON.

$$E_M = \frac{4000 \cdot L \cdot a^2}{48 \cdot I \cdot \delta_{4000}} \quad (\text{eq. 24})$$

$$f_M = \frac{M}{S} \quad (\text{eq. 25})$$

$$S = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (\text{eq. 26})$$

Onde:

$E_M$  = módulo de elasticidade da viga em "I", N/mm<sup>2</sup>;

$I$  = momento de inércia da viga em "I", mm<sup>4</sup>;

$a$  = distância entre a aplicação da carga e os apoios da viga, mm;

$\delta_{4000}$  = deformação em 4000N, mm;

$L$  = distância entre os apoios da viga (vão), mm;

$f_M$  = módulo de ruptura, N/mm<sup>2</sup>;

$M$  = momento fletor, N.mm;

$S$  = módulo de seção, mm<sup>3</sup>;

$b, h$  = dimensões das peças conforme Figura 20, mm;

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 PROPRIEDADES DOS FLANGES

#### 5.1.1 Ensaio das emendas

Com o objetivo de se utilizar a melhor emenda para as vigas em “I” foram ensaiadas três: macho-fêmea, bisel 1:2 e bisel 1:4. No ensaio de flexão estática para a escolha da emenda a ser utilizada na produção dos flanges de LVL foram obtidos os seguintes valores médios de  $E_M$  e  $f_M$ : 15.644 e 19,6 MPa, 16.373 e 18,6 MPa; e 18.222 e 40,1 MPa, sendo respectivamente para emenda macho-fêmea, bisel 1:2 e bisel 1:4.

Pela análise de variância não se observou uma diferença significativa entre o  $E_M$  das três emendas estudadas (Tabela 9, apêndice). Já o  $f_M$  apresentou uma diferença significativa entre os valores testados (Tabela 10, apêndice). Posteriormente pelo teste de Tukey (Figura 22) observou-se que somente o  $f_M$  da emenda 1:4 diferenciou das demais, mostrando-se superior.

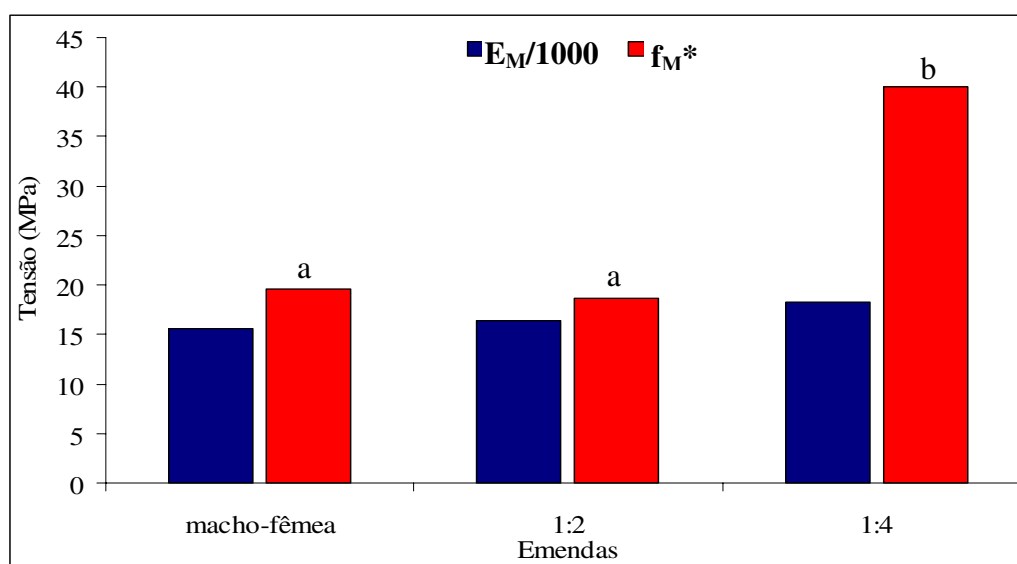


Figura 22. Análise de variância e teste Tukey das emendas ensaiadas (colunas seguidas pela mesma letra não há diferença significativa pelo teste Tukey, ao nível de 5% de probabilidade).



A ruptura das emendas ocorreu na linha de cola, o que pode ser explicado pelos elevados  $E_M$  encontrados nos LVL. As rupturas das três emendas estudadas ocorreram na parte inferior das emendas, causada por esforços de tração. No flange com a emenda macho-fêmea a ruptura por tração foi mais nítida e ocorreu na emendas de topo na parte inferior da emenda (Figura 23).



Figura 23. Ruptura das emendas macho-fêmea, bisel 1:2, e bisel 1:4.

Diferentemente do comportamento da madeira e de outros materiais, os flanges com emendas se mostraram semelhante a materiais frágeis, ou quebradiços, como concreto, ferro fundido, vidros, cerâmicas e uma variedade de ligas metálicas. Segundo GERE (2005) materiais frágeis, ou quebradiços, como os flanges com emendas, falham com pequeno alongamento após o limite de proporcionalidade, a fratura ocorre em um pequeno percentual de deformação (Figura 24). Os flanges com as emendas não apresentaram um regime plástico e a carga no limite de proporcionalidade se igualou à carga de ruptura.

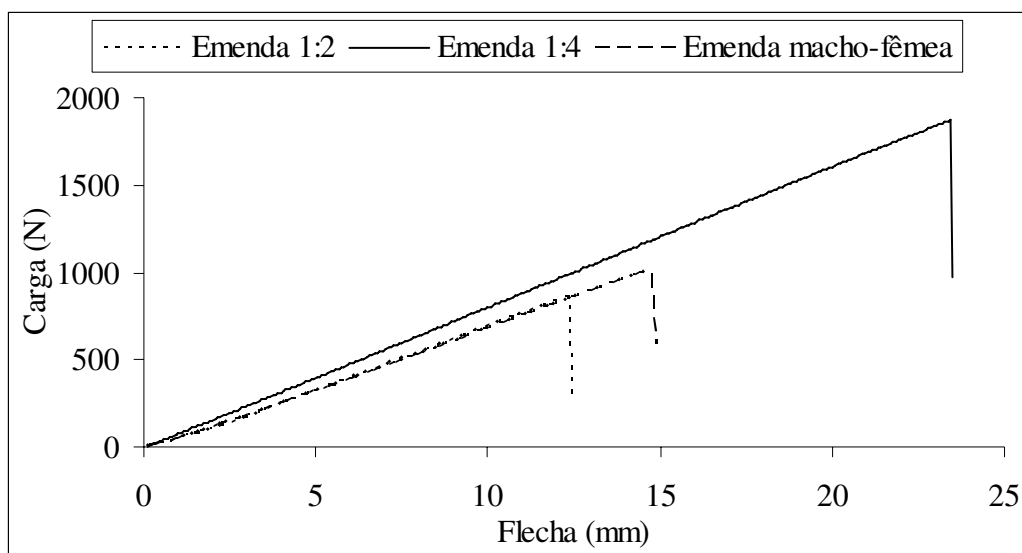


Figura 24. Gráfico de carga e deformação das emendas testadas.

De posse dos valores obtidos decidiu-se utilizar a emenda em bisel com a relação altura/largura de 1:4. Além de maiores valores de  $f_M$ , a emenda em bisel 1:4 é mais fácil de ser produzida, já foi utilizada em outros trabalhos e possui um corte mais preciso. A emenda 1:4 confere uma maior confiabilidade na produção das vigas em “T”.

### 5.1.2 Avaliação não-destrutiva dos flanges

Para se avaliar as propriedades mecânicas dos flanges, esses foram submetidos a dois ensaios não-destrutivos: o primeiro obteve-se o  $E_M$  dinâmico ( $E_{MD}$ ), no aparelho Stress Wave Timer Metriguard 239A e no segundo se obteve o  $E_M$  estático ( $E_{ME}$ ), na máquina de ensaio Universal INSTRON.

Com os ensaios realizados se observou uma relação linear entre o  $E_{ME}$  e o  $E_{MD}$  (Figura 25), obteve-se um coeficiente de determinação de 0,51. Na análise de regressão da equação se observou que ela foi estatisticamente significativa ao nível de 5% de probabilidade (Tabela 11, apêndice). Com base na equação gerada foi possível através do  $E_{MD}$  se estimar o  $E_{ME}$ .

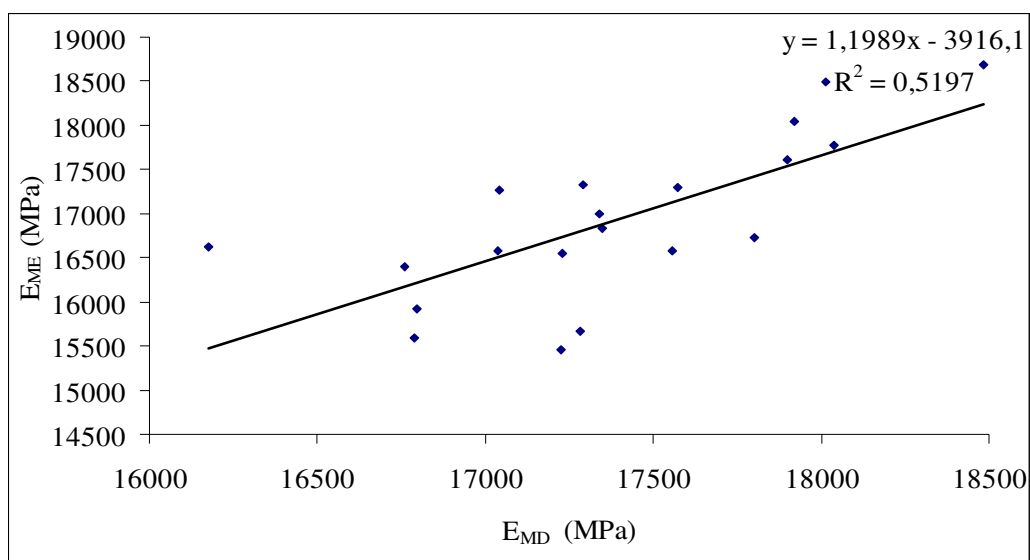


Figura 25. Gráfico de dispersão dos dados de  $E_M$  estático em função de  $E_M$  dinâmico utilizando-se o modelo linear de regressão.

## 5.2 PROPRIEDADES DA ALMA

Para se estimar as propriedades das vigas em “T”, é importante a caracterização mecânica da alma que a compõe. Os resultados dos  $E_M$  e do  $f_M$  das almas foram obtidos nos ensaios de flexão estática e seus resultados foram utilizados nos modelos teóricos para se estimar o  $E_M$ ,  $f_M$  e  $\delta$  das vigas em “T”.

Nos ensaios realizados observou-se que somente para o  $E_M$  do compensado não se observou diferença significativa entre os eixos paralelo e perpendicular (Tabela 12, apêndice). Para as demais propriedades,  $f_M$  do painel de compensado e  $E_M$  e  $f_M$  do painel de OSB, foram observadas diferenças significativas (Tabelas 13, 14 e 15, apêndice). Os valores das propriedades mecânicas, tanto para alma de compensado como de OSB, no eixo paralelo foram superiores ao eixo perpendicular (Tabela 5).

Tabela 5.  $E_M$  e  $f_M$  paralelo e perpendicular dos painéis de compensado e OSB.

Painel	$E_M$ (MPa)		$f_M$ (MPa)	
	Paralelo	Perpendicular	Paralelo	Perpendicular
<b>Compensado</b>	3.471 (349,31)	3.385 (220,5)	24,2 (1,6)	34,1 (3,2)
<b>OSB</b>	5.466 (665,4)	1.643 (249,9)	35,8 (5,5)	14,1 (3,0)

Os valores de  $E_M$  e  $f_M$  paralelo do painel de compensado naval obtidos neste trabalho (Tabela 5) foram menores aos valores médios de 8.382 MPa para o  $E_M$  paralelo e 49,0 MPa para o  $f_M$  paralelo, referenciados no catálogo da ABIMCI (2002), para painéis de compensado estrutural de *Pinus taeda* de padrão internacional, com espessura nominal de 9 mm. Já os valores de  $E_M$  e  $f_M$  perpendicular do painel de compensado naval (Tabela 5) foram superiores aos valores médios de 2.229 MPa para o  $E_M$  perpendicular e 22,0 MPa para o  $f_M$  perpendicular, também referenciados do catálogo da ABIMCI (2002). A partir dos valores obtidos nos ensaios e comparando com os valores encontrados na literatura observou que o painel compensado adquirido no mercado não condizia com um painel naval e sim um compensado comum com propriedades mecânicas inferiores aos de compensado naval.

Apesar de terem aumentado as exigências impostas pelos mercados internos e principalmente pelo externo para os produtos de origem madeireira, para alguns produtos, como o compensado naval utilizado no trabalho, ainda faltam parâmetros que atestam condições mínimas e confiáveis das características físicas e mecânicas desses produtos.

Os valores médios de  $E_M$  e  $f_M$  dos painéis de OSB estão de acordo com os valores encontrados na literatura. Os valores encontrados nos ensaios segundo a norma ASTM D198 (1998) são superiores aos informado pelo fabricante do painel que são de 3.500 e 1.400 MPa para o  $E_M$  sentido paralelo e perpendicular e de 22,0 e 11,0 MPa para o  $f_M$  sentido paralelo e perpendicular (MASISA, 2006). Também os valores de  $E_M$  e  $f_M$  paralelo e perpendicular do painel de OSB (Tabela 5) foram superiores aos valores médios de 5.289 e 1.442 MPa para o  $E_M$  paralelo e perpendicular e 27,8 e 11,9 MPa para o  $f_M$  paralelo e perpendicular, valores mínimos esses estabelecidos pelo código canadense O437.1-93 (*Canadian Standards Association – Test Methods for OSB and Waferboard*) referenciados por MENDES, et al (2000).

Na análise de variância realizada (Tabelas 19 a 20, apêndice), observou-se uma diferença significativa (Figura 26) para os valores de  $E_M$  e o  $f_M$  paralelo entre o compensado e o OSB. Segundo resultados encontrados BORTOLETTO Jr. et al., (2004), para compensados e OSB de 15, 18 e 30 mm, os valores de  $E_M$  e  $f_M$  paralelo do compensado foram superiores aos do OSB, o que diferencia com os resultados encontrados no trabalho, no qual os valores do OSB foram superiores aos do compensado.

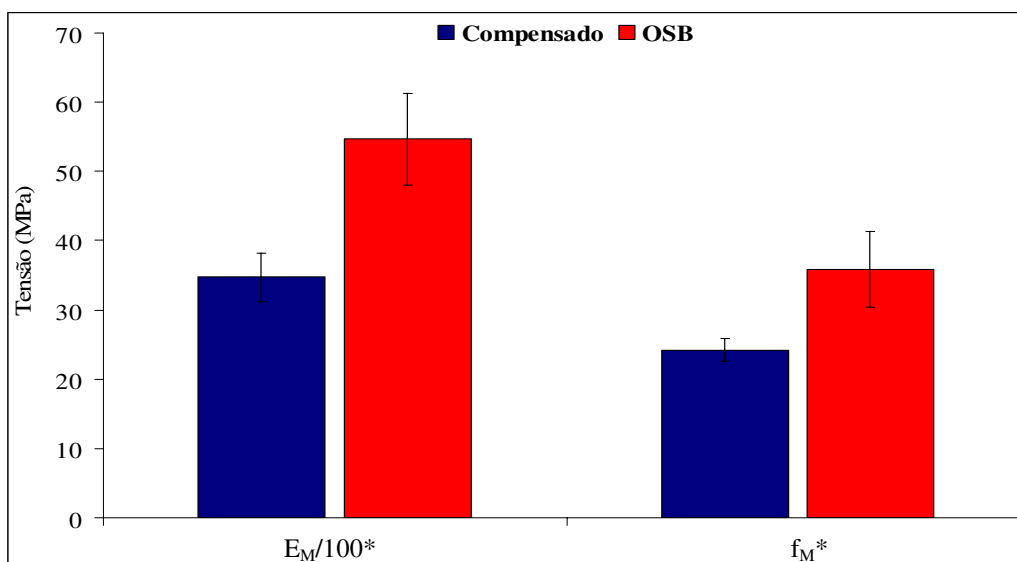


Figura 26. Comparação entre os valores de  $E_M$  e  $f_M$  paralelo dos painéis de compensado e OSB (\*Significativa à 5% de probabilidade).

No eixo perpendicular também foi realizada uma análise de variância (Tabelas 21 a 22, apêndice) e observou-se uma diferença significativa entre os valores de  $E_M$  e o  $f_M$  perpendicular entre o painel de compensado e de OSB, sendo que o OSB apresentou valores inferiores ao compensado (Figura 27). Esses resultados corroboraram com os resultados encontrados por BORTOLETTO Jr. et al., (2004), no qual se encontrou valores de  $E_M$  e  $f_M$  do compensado superior aos do OSB, no eixo perpendicular.

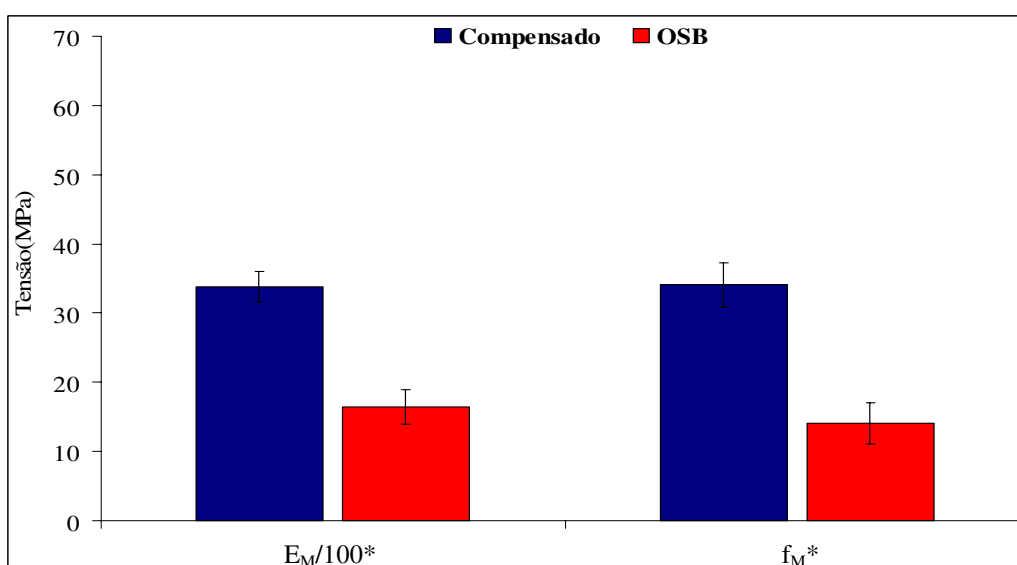


Figura 27. Comparação entre os valores de  $E_M$  e  $f_M$  perpendicular dos painéis de compensado e OSB (\*Significativa à 5% de probabilidade).

### 5.3 ENSAIO DE LIGAÇÃO INTERNA (LVL) E RESISTÊNCIA NA LINHA DE COLA (LVL/COMPENSADO E LVL/OSB)

Nos ensaios de ligação interna do LVL e resistência na linha de cola entre LVL e OSB e entre LVL e compensado foram obtidos os valores médios (desvio-padrão) de 10,3 (1,3), 3,0 (0,5) e 2,7 (0,6) MPa, respectivamente. Os valores de resistência da ligação interna do LVL foram cerca de três vezes maior que o de resistência na linha de cola (LVL/ OSB e LVL/compensado). Tanto nos ensaios de ligação interna, quanto nos ensaios de resistência na linha de cola a ruptura ocorreu nas lâminas ou nas partículas de madeira (Figura 28), mostrando que o adesivo estrutural é mais resistente que a madeira utilizada na fabricação das lâminas do LVL (*P. kesiya*) e do compensado, e das partículas do OSB.

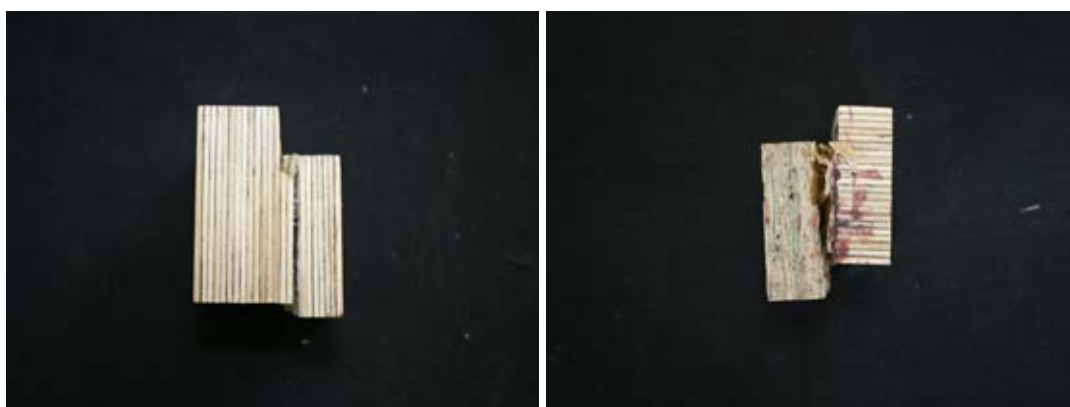


Figura 28. Ruptura dos corpos de prova nos ensaios de ligação interna e de resistência na linha de cola (LVL x OSB).

Nos ensaios de resistência na linha de cola entre o LVL e o OSB a ruptura ocorreu no painel de OSB e nos ensaios de resistência na linha de cola entre o LVL e compensado a ruptura ocorreu nas lâminas do compensado. Levando em consideração as rupturas nos ensaios de resistência na linha de cola, o painel de LVL se mostrou mais resistente que os outros dois painéis utilizados (OSB e compensado).

O valor da resistência na linha de cola entre o LVL e o OSB, foi em média 3,0 MPa, e está de acordo com aos valores encontrados por RACHER et al. (2007) que foi de 3,1 MPa, para resistência na linha de cola entre o LVL e OSB.

Nos cálculos de tensão de cisalhamento entre o flange e a alma ( $\tau_{fw}$ ) das vigas em “I” se obteve valores médios de 0,4 e 0,6 MPa para alma de compensado e alma de OSB.

Como os valores de tensão de cisalhamento estão abaixo dos valores médios de 3,0 e 2,6 MPa na resistência na linha de cola entre o LVL e compensado e entre o LVL e OSB, a ligação entre o flange e a alma não deve ser considerada uma área crítica de cisalhamento.

Pela análise de variância (Tabela 20, apêndice), não se observou diferença significativa, ao nível de 5% de significância, entre os valores de resistência na linha de cola entre LVL e o OSB e entre o LVL e o compensado (Figura 29). Apesar de não possuírem diferenças significativas, os valores de resistência na linha de cola entre o LVL e o OSB foram superiores aos do LVL e o compensado.

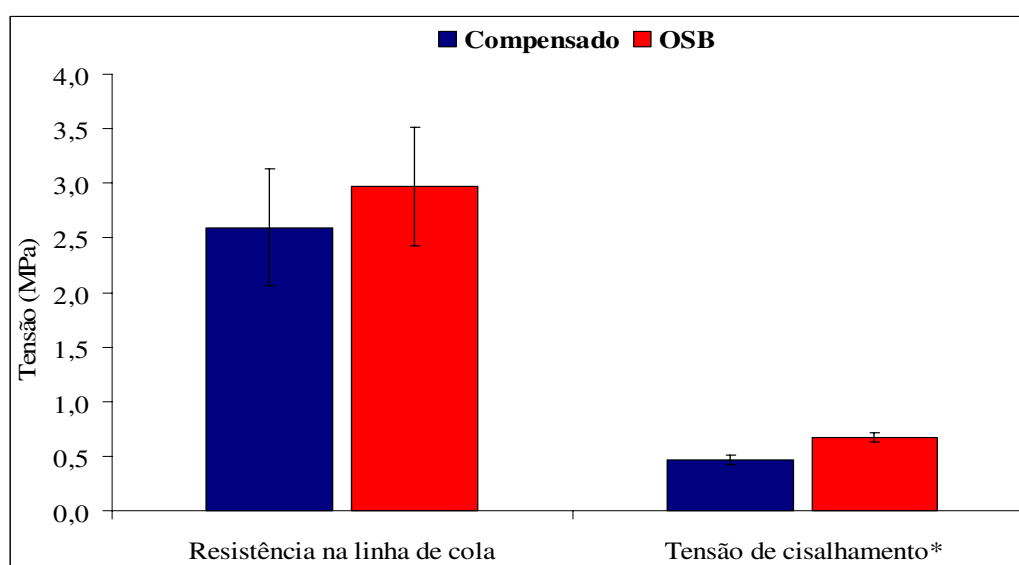


Figura 29. Comparação entre os valores de resistência na linha de cola e tensão de cisalhamento entre o compensado e OSB (\*Significativo a 5% de probabilidade).

Para as  $\tau_{fw}$  observou-se diferença significativa entre as vigas com alma de compensado e com alma de OSB (Tabela 25, apêndice), as vigas em “I” com alma de OSB apresentando valores de  $\tau_{fw}$  superiores as vigas com alma de compensado.

## 5.4 ENSAIO DAS VIGAS EM “I”

### 5.4.1 Propriedade geométrica da Viga em “I”

Os valores das dimensões das vigas em “I” e a determinação do momento de inércia (Tabela 6) foram utilizados na determinação das propriedades mecânicas das vigas em “I” com flange de LVL e almas de compensado e OSB

Tabela 6. Dimensões e propriedade geométrica das vigas em “I”.

Vigas em “I”	Dimensões das vigas em “I” (mm) (Figura 20)						$X_{CG}$ (mm)	$Y_{CG}$ (mm)	Momento de inércia (mm <sup>4</sup> )	
	Compensado	w	b	$h_f$	c	h				L
<b>1</b>		10,6	40,1	39,4	122,9	202,6	1700	20,0	99,3	2,21E+07
<b>2</b>		10,4	40,2	36,6	122,0	196,1	1700	20,1	96,1	1,98E+07
<b>3</b>		10,5	40,2	38,6	123,9	201,4	1700	20,1	98,6	2,17E+07
<b>4</b>		10,4	40,5	38,7	123,4	200,7	1700	20,2	98,3	2,16E+07
<b>5</b>		10,4	40,2	39,2	123,4	201,6	1700	20,1	98,8	2,19E+07
<b>OSB</b>										
<b>6</b>		9,6	40,2	37,3	124,4	199,2	1700	20,1	97,8	2,07E+07
<b>7</b>		9,7	40,6	38,0	125,0	201,0	1700	20,3	98,6	2,16E+07
<b>8</b>		9,6	40,5	38,1	124,3	201,4	1700	20,3	98,0	2,09E+07
<b>9</b>		9,5	40,3	39,0	124,7	203,7	1700	20,1	99,9	2,23E+07
<b>10</b>		9,5	40,5	37,2	125,7	199,7	1700	20,2	98,0	2,09E+07

#### 5.4.2 Avaliação mecânica das Vigas em “I”

##### 5.4.2.1. Relação entre as propriedades das vigas em “I” com a propriedade dos flanges utilizados.

Para as vigas em “I” com almas de compensado e OSB é de se esperar que o  $E_M$  dos flanges fosse interferir de maneira significativa sobre as propriedades das vigas em “I” ( $E_M$  e  $f_M$ ), podendo assim ser utilizado de forma direta na determinação das propriedades vigas. Em vigas em “I” com flanges de maior resistência, conseqüentemente essas também teriam maiores resistências.

Com base nos resultados obtidos e posterior análise de regressão (Tabela 22, apêndice) verificou-se que somente para a viga em “I” com alma de compensado se obteve uma relação linear significativa, com um coeficiente de determinação elevado de 0,77, entre os valores do  $E_M$  da viga e o  $E_M$  do flange (Figura 30). Para as vigas em “I” com alma de OSB não se observou uma relação linear significativa entre o  $E_M$  da viga e o  $E_M$  do flange.



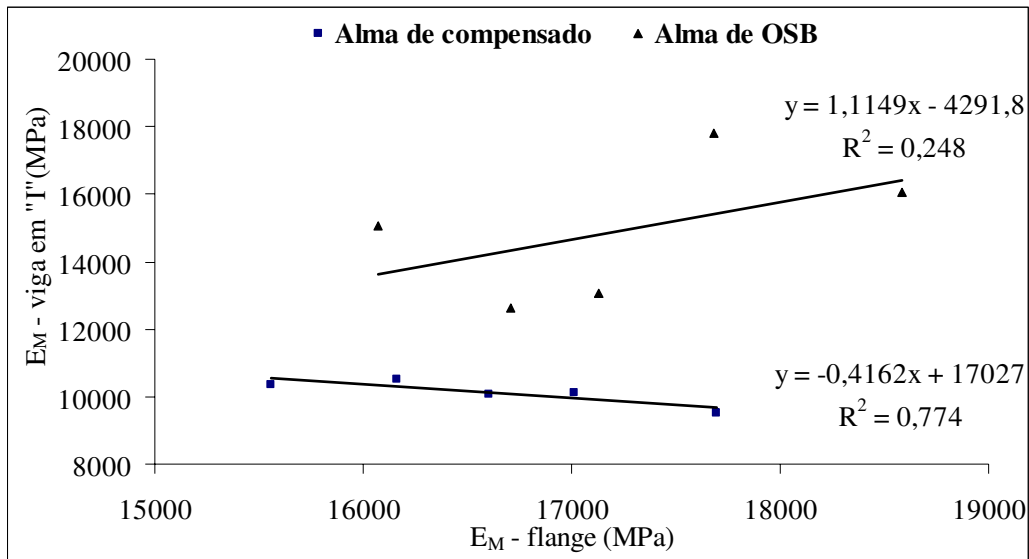


Figura 30. Relação entre o  $E_M$  da viga em "I" com o  $E_M$  do flange.

Para as vigas em "I" com almas de compensado e OSB, pela observação dos gráficos (Figura 31) e análise de regressão não foi observada uma relação linear significativa entre os valores de  $f_M$  das vigas com os valores de  $E_M$  dos flanges (Tabela 23, apêndice). Não foi possível através do  $E_M$  dos flanges se estimar o  $f_M$  das vigas em "I".

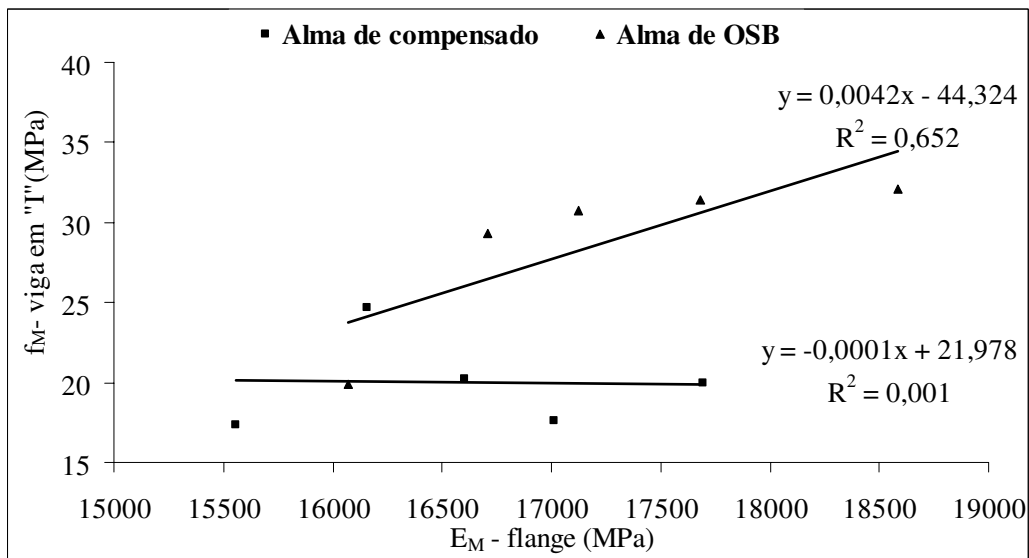


Figura 31. Relação entre o  $f_M$  da viga em "I" com o  $E_M$  do flange.

#### 5.4.2.2. Comportamento teórico e experimental das vigas em "I" com alma de compensado

Com a caracterização mecânica dos flanges e da alma e através de modelos teóricos pré-determinados é de se esperar que se consiga estimar as propriedades mecânicas das vigas em “I”.

A EI das vigas em “I” (Tabela 7) foi calculada segundo o modelo teórico, equação 16, proposto por DANSOH et al. (2004).

Tabela 7. Valores teóricos e experimentais dos  $E_M$  e  $f_M$  das vigas em “I”, com a alma de compensado e flange de LVL.

Vigas em “I”	EI (N.mm <sup>2</sup> )	$E_M^*$ (MPa)			$f_M$ (MPa)		
		Teórico	Experimental	Relação Teor./Exp	Teórico	Experimental	Relação Teor./Exp
1	3,06E+11	13.820	10.366	1,33	17,4	15,3	1,13
2	2,81E+11	14.223	10.516	1,35	24,7	21,4	1,15
3	3,18E+11	14.684	10.070	1,46	20,2	17,9	1,13
4	3,26E+11	15.097	10.112	1,49	17,6	15,4	1,15
5	3,42E+11	15.657	9.511	1,65	20,0	17,6	1,14
<b>Média</b>	3,15E+11	14.696	10.115	1,46	20,0	17,5	1,14
<b>DP**</b>	2,28E+10	720,2	384,4	0,13	2,9	2,5	0,01

\* Significativo a 5% de probabilidade; \*\*Desvio-padrão.

Pela análise de variância (Tabelas 24 e 25, apêndice) observou que para as vigas em “I” com os flanges de LVL e a alma de compensado uma diferença significativa, ao nível de probabilidade de 5%, entre os valores de  $E_M$  teóricos e experimentais. Para o  $f_M$  não foi observada diferença significativas entre os valores teóricos e experimentais (Tabela 7).

Para as vigas em “I” com alma de compensado não foi possível a partir da caracterização dos compostos que compõe a viga (alma e flange) e dos modelos teóricos utilizados se estimar as propriedades mecânicas das vigas.

Os valores de  $E_M$  e  $f_M$  encontrados por PEDROSA (2003) de 274.586 e 758,5 MPa, para vigas em “I” com flanges de LVL e alma de compensado, estão muito acima dos valores médios experimentais de 10.115 e 17,4 MPa encontrados nesse trabalho. Em comparação com valores de  $E_M$  e  $f_M$  encontrados por ABDALLA et al. (2006) de 13.798 e 46 MPa, para vigas em “I” de pequenas dimensões com flanges de madeira maciça (*Cryotomeria japonica* D. Don) e alma de MDF, apesar de utilizar compostos distintos ao utilizados nesse trabalho estão mais coerentes com os valores encontrados dos que

encontrados por PEDROSA (2003). Os valores teóricos do  $E_M$  e do  $f_M$  das vigas em "I" com alma de compensado foram em média 46 e 14% maior que os valores experimentais.

Pela análise de regressão, entre os valores do  $E_M$  e  $f_M$  teóricos e experimentais (Tabelas 27 e 28, apêndice), as equações lineares foram significativas ao nível de probabilidade de 5%. Tanto para o  $E_M$ , que possuiu diferença significativa entre os valores teóricos e experimentais, quanto o  $f_M$ , observou-se uma relação linear entre os valores teóricos e experimentais altamente significativa com valores de coeficientes de determinação de 0,799 e 0,998 (Figura 32).

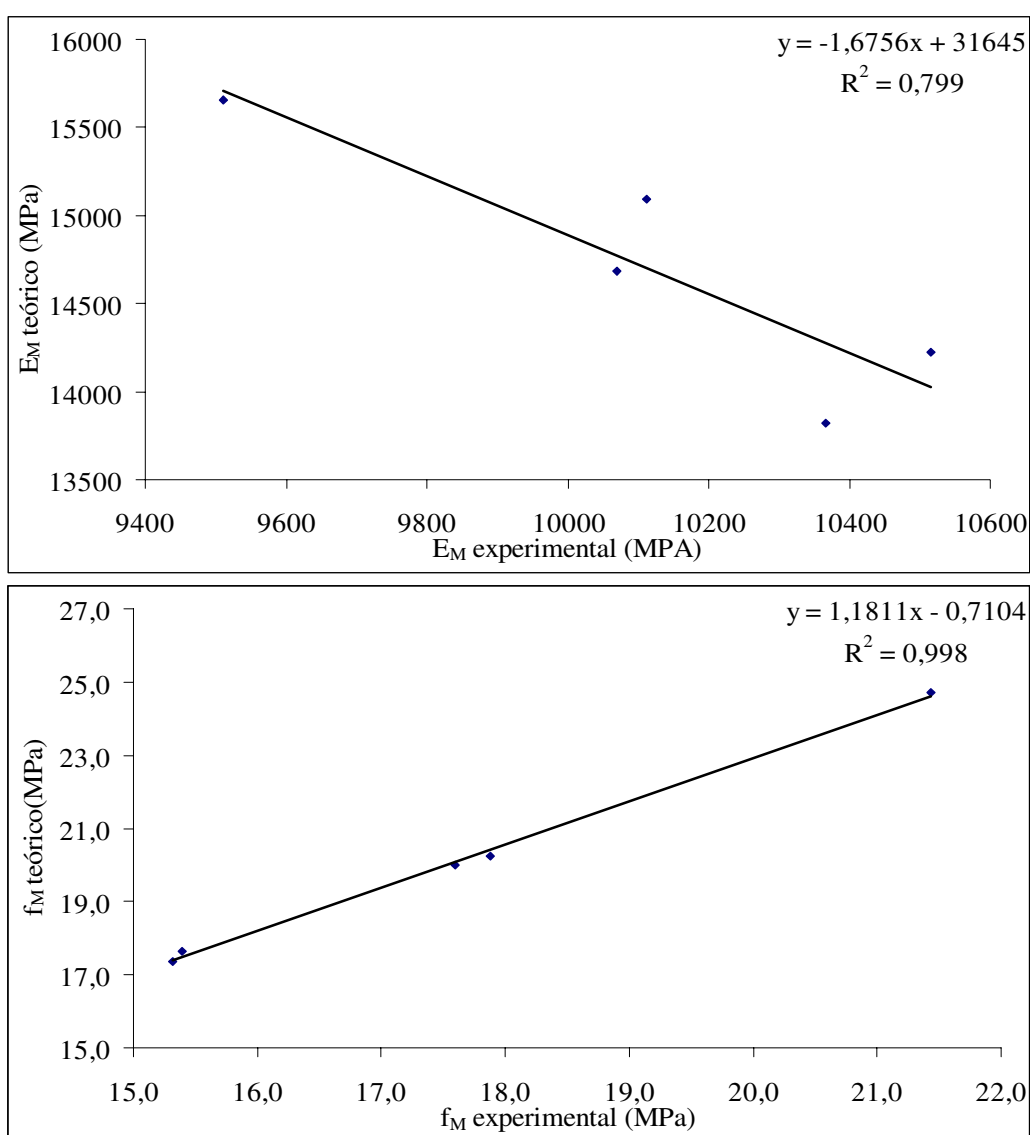


Figura 32. Análise de regressão do  $E_M$  e  $f_M$  teórico e experimental, utilizando o modelo linear de regressão.

Em relação à flecha teórica e experimental observou uma diferença significativa entre os valores teóricos e experimentais (Figura 33). Os valores de flecha teóricos foram inferiores aos experimentais.

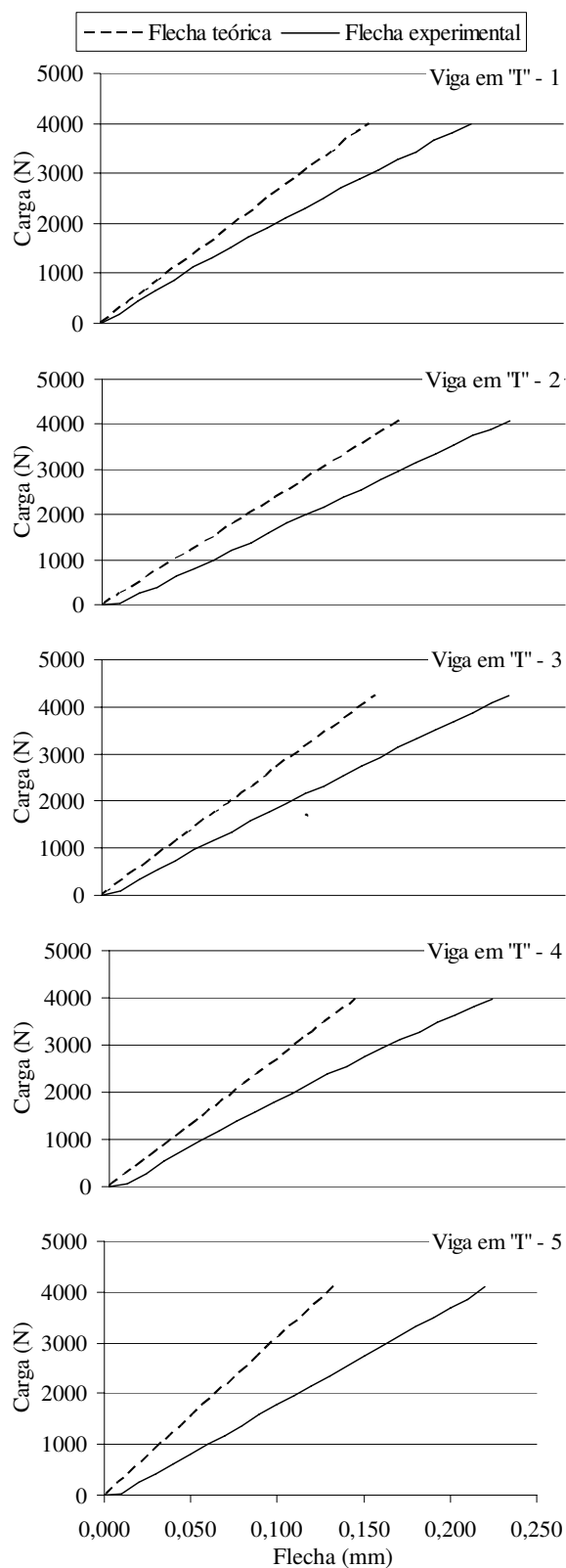


Figura 33. Valores teóricos e experimentais da flechas das vigas em “T”, com alma de compensado e o flange de LVL.

NEWLIN et al. (1956) utilizando o mesmo modelo teórico para se estimar a flecha também encontrou valores teóricos inferiores aos valores experimentais. No mesmo trabalho NEWLIN, et al.(1956) utiliza um modelo teórico, equação 6, que considera rigidez da alma (G), também encontrou na maioria dos seus resultados valores teóricos inferiores aos experimentais.

Foi gerada uma equação linear significativa a 5% de probabilidade,  $\delta_{exp}=1,9393\delta_{teo}$ , onde se tem a probabilidade de 95% dos valores de flecha, teóricos e experimentais, estar abaixo dessa reta, dando maior confiabilidade na estimativa dos valores de flecha (Figura 34).

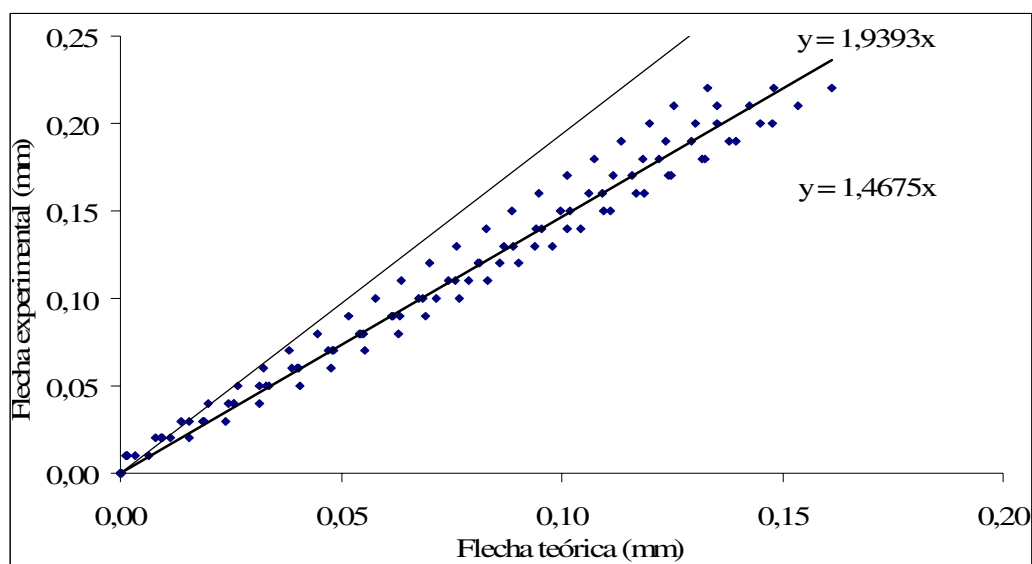


Figura 34. Equação de regressão para 95% dos valores de flecha estimados.

#### 5.4.2.3. Comportamento teórico e experimental das vigas em “I” com alma de OSB

É de esperar que para as vigas em “I” com alma de OSB, depois da caracterização mecânica dos flanges e da alma, e de modelos teóricos pré-determinados se consiga estimar suas propriedades mecânicas e flecha de maneira significativa.

Como nas vigas com alma de compensado, a EI das vigas em “I” com alma de OSB (Tabela 8) foram calculadas de forma teórica levando em consideração as propriedades

mecânicas dos flanges e da alma, propriedades geométricas das vigas e o modelo teórico, equação 16, proposto por DANSOH et al. (2004).

Tabela 8. Valores teóricos e experimentais dos  $E_M$  e  $f_M$  das vigas em “T”, com a alma de OSB e flange de LVL.

Vigas em “T”	EI (N.mm <sup>2</sup> )	$E_M$ (MPa)			$f_M$ (MPa)		
		Teórico	Experimental	Relação Teor./Exp	Teórico	Experimental	Relação Teor./Exp
6	3,02E+11	14.578	15.050	0,97	19,9	17,5	1,14
7	3,27E+11	15.162	12.640	1,20	29,3	26,4	1,11
8	3,33E+11	15.898	13.052	1,22	30,7	28,3	1,09
9	3,59E+11	16.087	17.804	0,90	31,4	28,0	1,12
10	3,51E+11	16.757	16.070	1,04	32,1	28,8	1,12
<b>Média</b>	3,34E+11	15.696	14.923	1,07	28,7	25,8	1,11
<b>DP*</b>	2,23E+10	844,7	2.141	0,14	5,0	4,7	0,02

\*Desvio-padrão.

Pela análise de variância (Tabelas 30 a 32, apêndice) observou que para as vigas em “T” produzidas com os flanges de LVL e a alma de OSB não foi observada diferença significativa, ao nível de probabilidade de 5%, entre os valores teóricos e experimentais do  $E_M$ ,  $f_M$  e flecha (Tabela 8)

Por não apresentar diferenças significativas entre os valores teóricos e experimentais, para todas as propriedades estudadas, os modelos teóricos podem ser validados para as vigas em “T” com alma de OSB. Podendo ser confiável estimar as propriedades das vigas em “T” com alma de OSB, a partir da determinação das propriedades da alma e dos flanges;

Os valores médios do  $E_M$  14.923 MPa, estão acima dos limites estabelecidos pela APA EWS STANDARD (2004), onde se determina valores mínimos de  $E_M$  de 9.458 MPa, para vigas em “T” com flanges de LVL (5,1 x 3,8 cm) e alma de OSB (espessura 0,95) com altura de 24,1 cm. Valores encontrados por PEDROSA (2003) de 243.205 e 797 MPa, para o  $E_M$  e  $f_M$  de vigas em “T” com flanges de LVL e alma de OSB, estão muito acima dos valores encontrados no trabalho e também muito acima dos valores mínimos determinados pela APA EWS STANDARD (2004).

Como nas vigas em “I” com alma de compensado, as vigas com alma de OSB apresentaram em média valores teóricos de  $E_M$  e de  $f_M$ , 7 e 11% superiores aos valores experimentais.

Para os valores de  $E_M$  teórico e experimental não se obteve uma relação linear significativa entre essas duas variáveis, a análise de regressão não foi significativa (Tabela 33, apêndice). Já para o  $f_M$  teórico e experimental existiu uma relação linear altamente significativa, com altos valores de coeficiente de determinação de 0,994(Figura 35), a análise de regressão foi significativa para a equação (Tabela 34, apêndice).

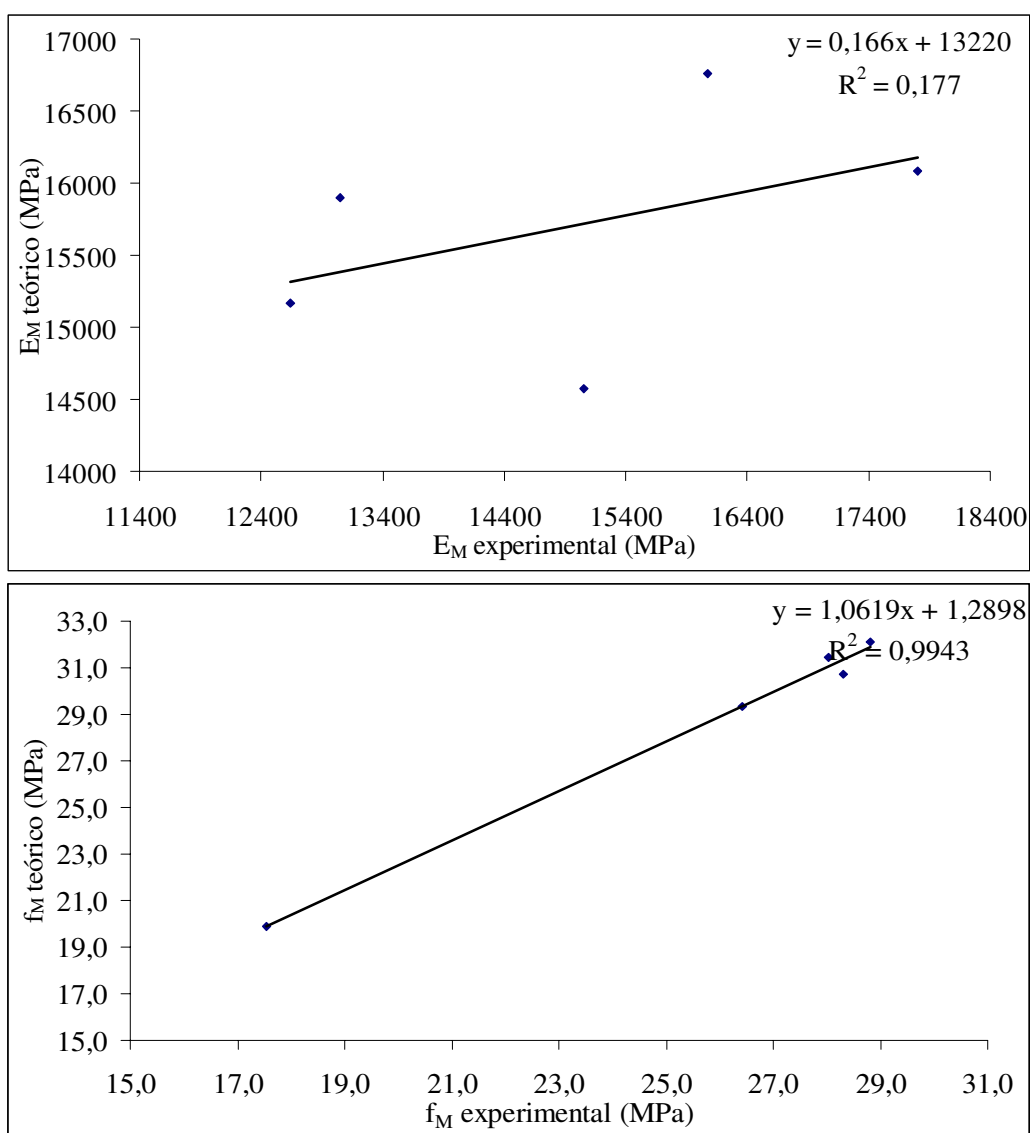
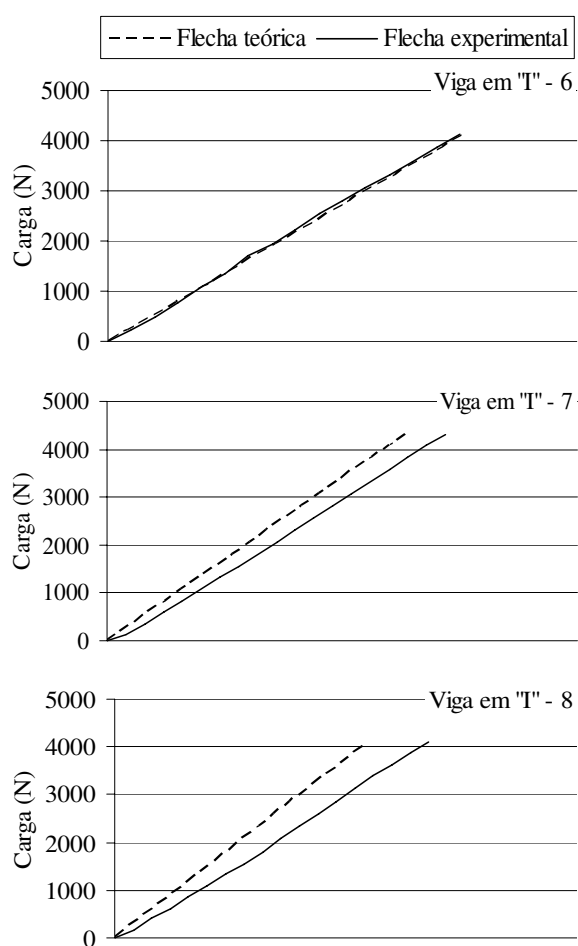


Figura 35. Análise de regressão do  $E_M$  e  $f_M$  teórico e experimental, utilizando o modelo linear de regressão.

Em relação à flecha teórica e experimental pela análise de variância não foi observada uma diferença significativa entre os valores teóricos e experimentais.

Assim como as propriedades mecânicas das vigas em "T" com alma de compensado e OSB e as flecha das vigas em "T" 7, 8 e 10 com alma de OSB, apresentaram flechas teóricas inferiores às experimentais. Como também encontradas por NEWLIN et al. (1956).

As vigas em "T" 6, 9 e 10 foram as que apresentaram de maneira mais nítida a ausência de diferença entre os valores teóricos e os experimentais (Figura 36).





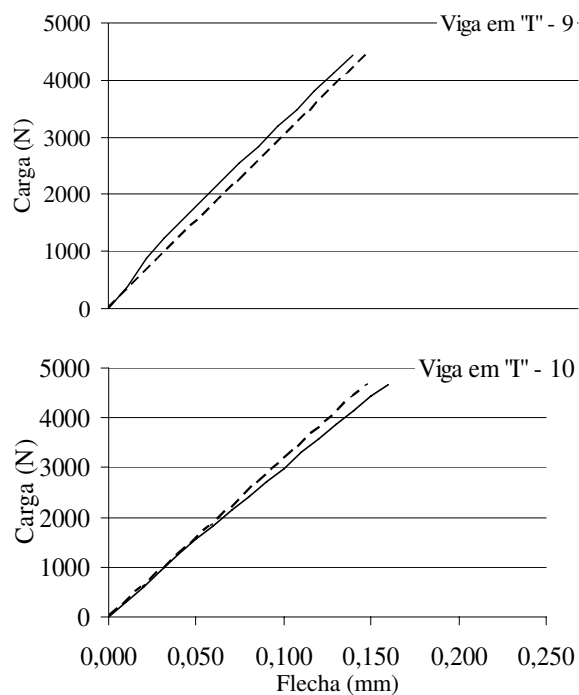


Figura 36. Valores teóricos e experimentais da flechas das vigas em “I”, com alma de OSB e o flange de LVL.

Como nas vigas em “I” com alma de compensado, com o objetivo de se evitar ter valores flecha, teóricos e experimentais, superiores aos valores encontrados, foi gerada uma equação linear significativa a 5% de probabilidade,  $\delta_{\text{exp}}=1,4678\delta_{\text{teo}}$ , onde 95% dos valores, tanto teóricos como experimentais, encontram-se abaixo dessa reta (Figura 37). A utilização dessa equação evitaria em 95% a chance de se ter valores de flecha experimentais subestimados, obtendo-se assim uma maior margem de segurança na estimativa de valores de flecha.

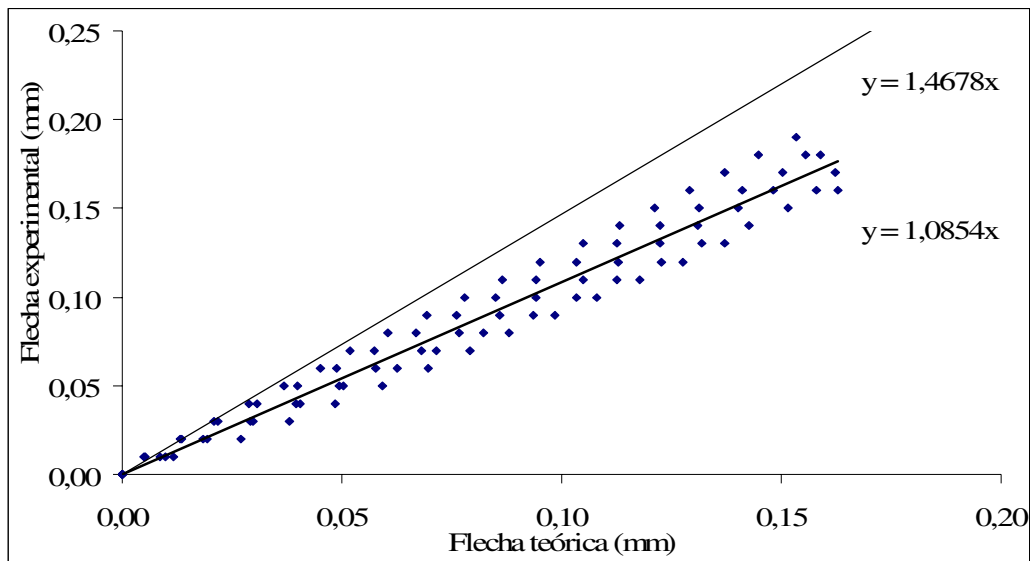


Figura 37. Equação de regressão para 95% dos valores de flecha estimados.

#### 5.4.2.4. Efeito do tipo de alma nas propriedades das vigas em “I”

A diferença entre os materiais utilizados como almas (compensado e OSB) nas vigas em “I”, devido suas propriedades mecânicas, deve interferir diretamente nas propriedades das vigas em “I”.

Com base na análise de variância (Tabela 36, apêndice) se observou que há diferença significativa entre os valores de  $E_M$  experimental para as vigas em “I” com a alma de compensado e de OSB (Figura 38). Como para o  $E_M$ , com base na análise de variância (Tabelas 37, apêndice) também se observou uma diferença significativa entre o  $f_M$  experimental entre as vigas em “I” com a alma de compensado e as vigas em “I” com a alma de OSB (Figura 38).

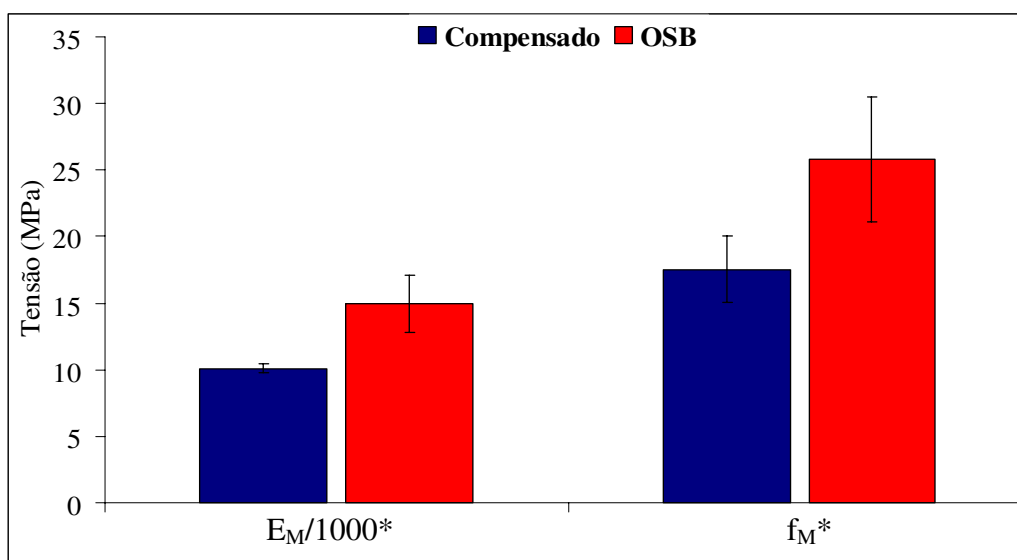


Figura 38. Diferença entre as propriedades das vigas em “I” com alma de compensado e alma de OSB (\*Significativo a 5% de probabilidade).

As vigas em “I” com alma de OSB apresentaram um valor médio de deformação de 0,15 mm (carga de 4000N), inferiores aos observados nas vigas em “I” com alma de compensado, que apresentaram valores médios de deformação de 0,21 mm (carga de 4000N) (Figura 39). O que demonstra que as vigas em “I” com alma de OSB apresentaram uma maior rigidez que as vigas com alma de compensado.

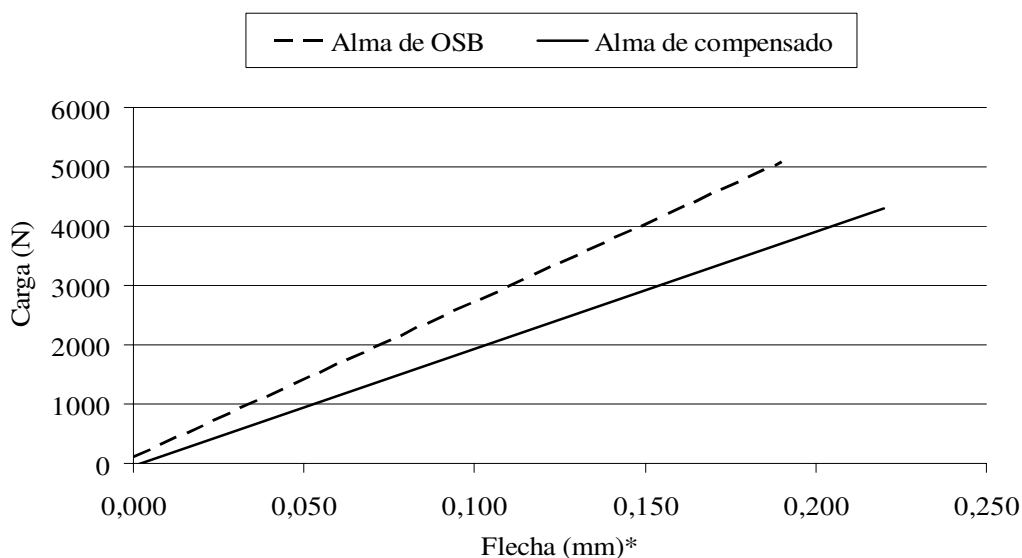


Figura 39. Diferença as flechas das vigas em “I” com alma de compensado e alma de OSB (\*Significativo a 5% de probabilidade).

As vigas em “I” com a alma de OSB para todas as propriedades mecânicas analisadas,  $E_M$  e  $f_M$  e para as flechas estudadas, apresentaram melhores desempenho que as apresentadas pelas vigas em “I” com a alma de compensado.

## **5.5 AVALIAÇÃO VISUAL DAS RUPTURAS DAS VIGAS EM “I”**

### **5.5.1 Vigas em “I” com alma de compensado**

Nas vigas em “I” com a alma de compensado a ruptura ocorreu em sua maioria nas emendas dos LVL, o que pode ser visto como o ponto crítico de ruptura da viga. Em vigas com flanges inteiriços a resistência seria superior e a ruptura ocorreria em outras regiões da peça. Devido à baixa qualidade do compensado utilizado no trabalho, a contribuição da alma foi baixa, com isso após a ruptura da emenda houve uma ruptura imediata da viga.

Apesar da norma ASTM D5055 (2005) apresentar a classificação dos principais rupturas que ocorrem nas vigas em “I”, as que ocorreram nas vigas com a alma de compensado foram diferenciados por serem causadas na maioria das vezes pela ruptura do flange na emenda. Em nível comercial os flanges geralmente são produzidos de forma inteiriça, mas devido às condições laboratoriais para a produção dos painéis de LVL foram necessárias as emendas. Uma vantagem das vigas em “I” produzidas neste trabalho quando comparadas às vigas comerciais é que não foi necessária a colagem de topo entre os painéis que compõe a alma, sendo utilizada a alma inteiriça.

Segundo a classificação da norma ASTM D5055 (2005) as vigas em “I” com o flange de LVL e a alma de compensado apresentaram duas causas principais de rupturas: rupturas típicas de cisalhamento e típicas de reação de apoio (ASTM, 2005).

Pode-se observar na Figura 40 que as vigas em “I” 1, 3, 4 e 5 apresentaram um tipo de ruptura denominada pela ASTM D5055 (2005) como WWJ (Figura 41), esse tipo de ruptura é característico de falhas relativas ao cisalhamento, caracterizado por um cisalhamento vertical na alma, até a junção entre a alma e o flange. A diferença entre a ruptura descrita na norma e as que ocorreram nas vigas em “I” produzidas para o experimento é que aquela ocorre na ligação de topo entre os painéis que compõe a alma, e

nas vigas em “I” 1, 3 e 4 estudadas a ruptura ocorreu na emenda do flange por tração e devido a baixa qualidade do painel de compensado utilizado no trabalho.

A viga em “I” 5 apesar de também apresentar o defeito WWJ (ASTM, 2005), se diferencia das causas das rupturas descritos na norma ASTM D5055 (2005) e daquelas ocorridas nas demais vigas com a alma de compensado. A viga em “I” 5 não apresentou uma ruptura abrupta da emenda, nem mesmo no compensado, e o cisalhamento que ocorreu na viga em “I” 5 não se deu na parte central da viga e sim um pouco deslocado para a extremidade.

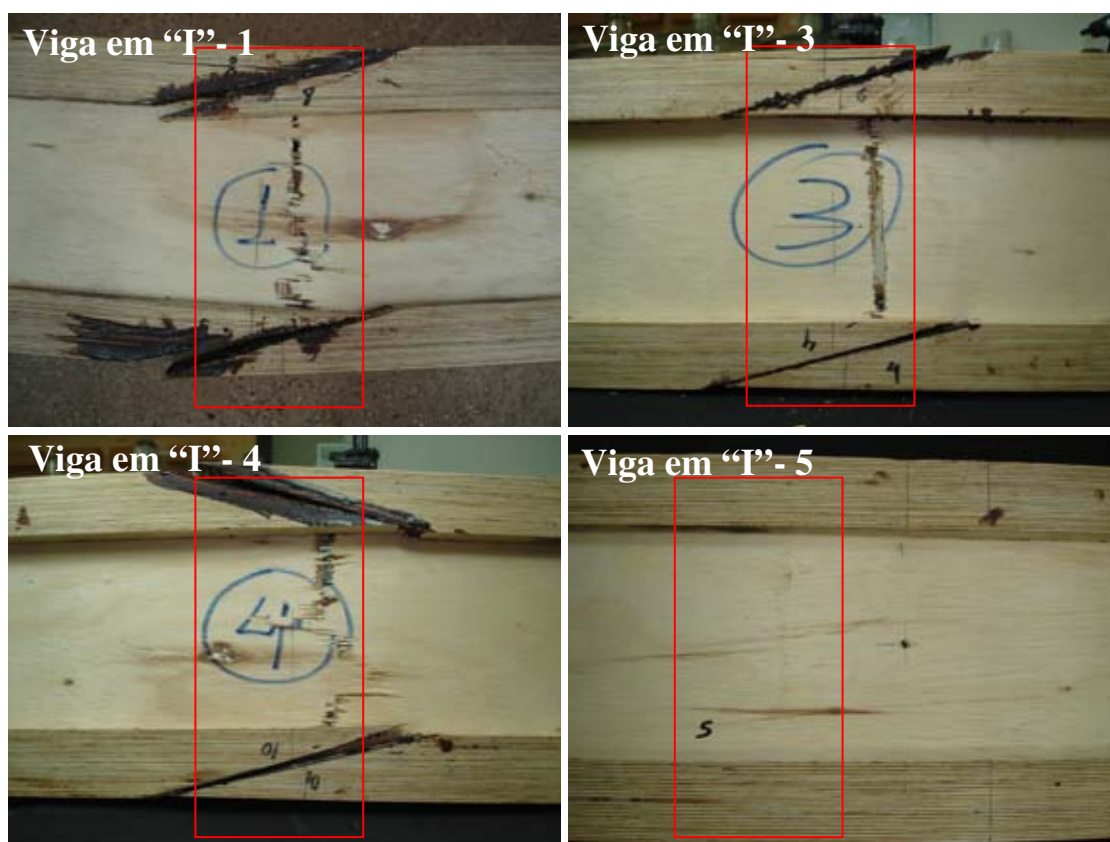


Figura 40. Ruptura devido ao cisalhamento nas vigas em “I” com a alma de compensado 1, 3, 4 e 5.

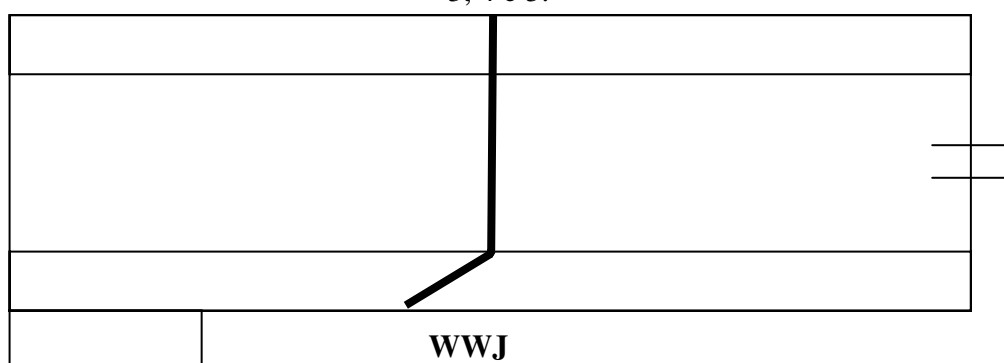


Figura 41. Região da ruptura WWJ descrita na norma ASTM D5055(2005).

A viga em “I” 2 apresentou dois tipos de rupturas diferente das demais vigas com a alma de compensado, codificados segundo a norma ASTM D5055 (2005) como WHS e WB (Figura 42 e 43). A ruptura WHS caracteriza por uma ruptura relativa ao cisalhamento, caracteriza por um cisalhamento horizontal na alma. A ruptura WB é característica de rupturas relativas às reações de apoio, causada pela flambagem (buckling) na alma, sem a ruptura abrupta da viga.

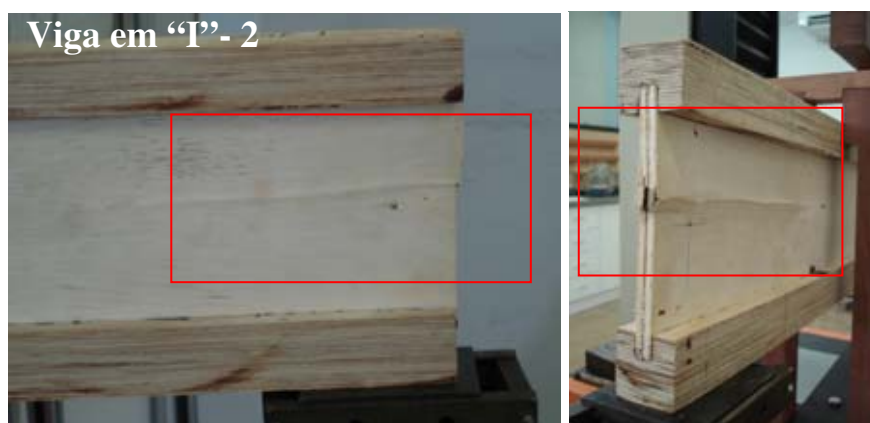


Figura 42. Rupturas devido ao cisalhamento e a reação de apoio nas vigas em “I” com a alma de compensado.

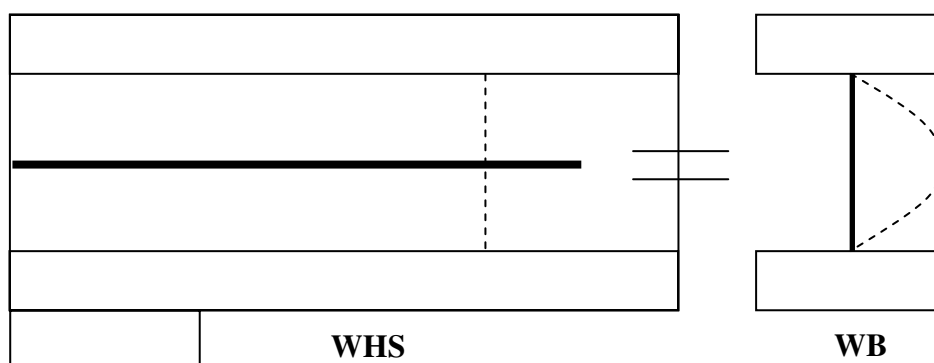


Figura 43. Região da ruptura típica de cisalhamento (WHS) e de reação de apoio (WB) descrita na norma ASTM D5055(2005).

A ruptura caracterizada como flambagem da alma é uma ruptura que pode ocorrer em peças esbeltas capazes de transpor grandes vãos. As vigas em “I” por se tratarem de peças esbeltas, essas podem vim a sofrer flambagens. Devido ao aumento dos vãos nas vigas em “I” e crescente possibilidade de flambagem, HINDMAN et al. (2005) levantou questionamentos sobre a estabilidade lateral das vigas em “I” e a necessidade de se prever tais defeitos.

### 5.5.2 Vigas em “I” com alma de OSB

Diferentemente das vigas em “I” com alma de compensado, a alma da viga em “I” de OSB contribuiu na resistência mecânica da viga, fazendo com que essas não rompessem na emenda do LVL.

As rupturas típicas que ocorreram nas vigas em “I” com a alma de OSB, como nas com alma de compensado, também foram devido ao cisalhamento (Figura 44). Todas as vigas apresentaram uma ruptura codificada pela ASTM D5055 (2005) como WRS (Figura 45), ruptura característica na alma até a ligação entre a alma e o flange.

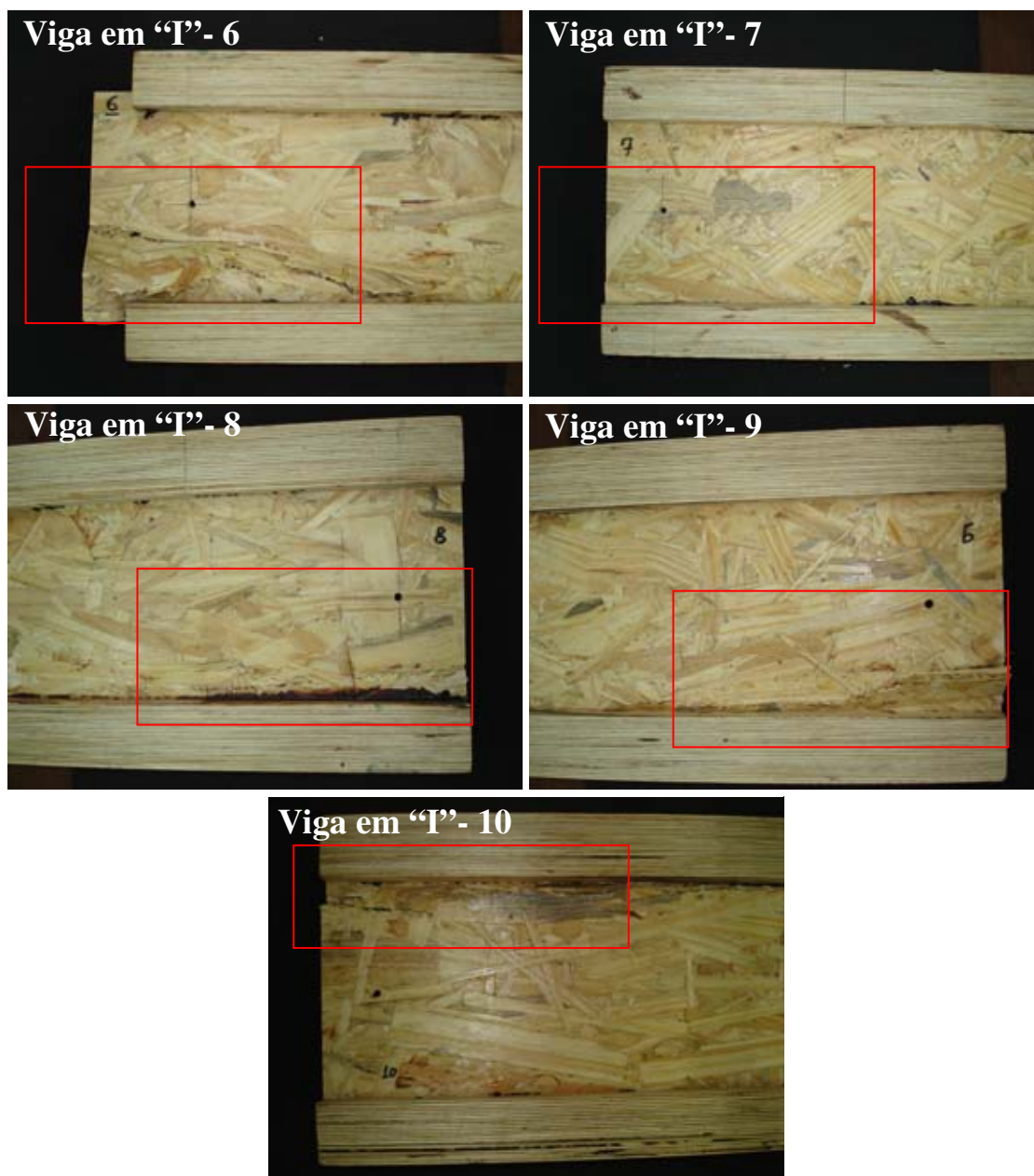


Figura 44. Defeitos nas vigas em “I” com a alma de OSB devido ao ensaio de flexão estática.

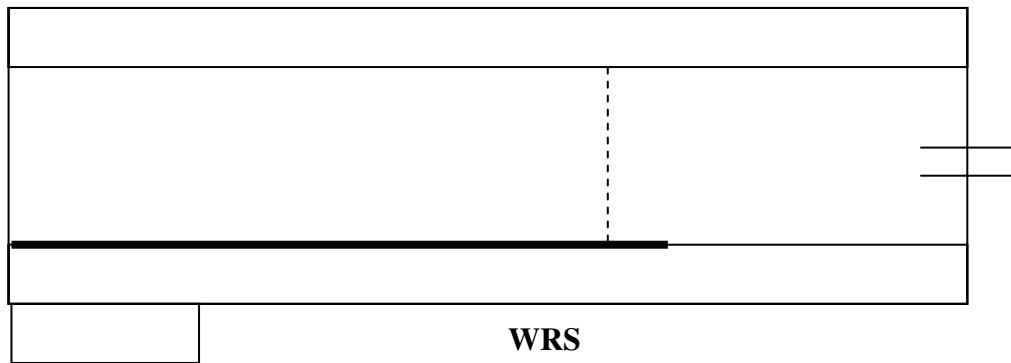


Figura 45. Região da ruptura WRS descrita na norma ASTM D5055(2005).

Diferentemente das vigas em “I” com a alma de compensado, não foram observadas nas vigas com alma de OSB rupturas causadas por flambagens (buckling). Apesar de que segundo HINDMAN et al. (2005) os defeitos de flambagens são comuns em de vigas em “I” com a alma de OSB, responsáveis por transpor grandes vãos.



## 6. CONCLUSÃO

Para as vigas em “T” com a alma de OSB é possível por meio dos modelos teóricos utilizados e das propriedades dos compostos que compõem a viga (alma e flange) estimar as propriedades de resistência e rigidez da viga “T”. A viga em “T” com o flange de LVL e a alma de OSB se mostrou como um material engenheirado, ou seja, a partir das propriedades dos compostos que compõem a viga, de modelos teóricos previamente determinados, ou modelos computacionais é possível estimar as propriedades do produto final.

Apesar de observadas diferenças significativas entre os valores teóricos e experimentais para o  $E_M$  e flechas das vigas em “T” com flange de LVL alma de compensado, não se pode descartar a possibilidade de estimar suas propriedades. Podem ser utilizados outros modelos teóricos que não foram utilizados neste trabalho, modelos esses descritos ou não na literatura, e também de modelos computacionais.

As vigas em “T” com a alma de OSB apresentaram melhores propriedades mecânicas 14.923 e 28,7 MPa para o  $E_M$  e  $f_M$ , que as vigas em “T” com a alma de compensado que apresentaram 10.115 e 20,0 MPa para o  $E_M$  e  $f_M$ . Além de melhores propriedades mecânicas as vigas em “T” com alma de OSB apresentaram menores deformações que as vigas em “T” com a alma de compensado, quando submetidas a mesmos esforços.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABDALLA, A. M. A., SEKINO. N. Veneer strand flanged I-beam with MDF or particleboard as web material IV: effect of web material types and flange density on the basic properties. **J Wood Sci**, v.52, p.167-172, 2006.

ABEND - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS. **Ensaio não-destrutivos**. Disponível em: <[http://www.abende.org.br/ensaios\\_ao\\_destrutivos.html](http://www.abende.org.br/ensaios_ao_destrutivos.html)> Acesso em: 16 set. 2006.

ABIMCI - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA. **Compensado de Pinus**. Catálogo técnico, nº1, 2002.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Chapas de madeira compensada**: classificação. Rio de Janeiro, 1986.(Norma Brasileira NBR 9531)

APA EWS STANDARD. **PRI-400**: performance standard for APA WEST I-joists. Engineered Wood Systems, 2004. 12p.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Specification for Establishing and Monitoring Structural Capacities of Prefabricated Wood I-Joists**. ASTM D5055-05. 2005.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials**. ASTM D1037-99. 1999a.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes**. ASTM D198-99. 1999b.

ALMEIDA, R. R., BORTOLETTO JÚNIOR, G, JANKOWSKY, I. P. Produção de lâminas a partir da madeira e clones do híbrido *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, n.65, p.49-58, 2004.

BORTOLETTO Jr., G. GARCIA, J. N. Propriedades de resistência e rigidez à flexão estática de Painéis OSB e compensados. **Revista Árvore**, v.28, n.4, p.563-570, 2004.

CARRASCO, E. V. M., AZEVEDO JUNIOR, A. P. Avaliação não destrutiva de propriedades mecânicas de madeiras através de ultra-som – fundamentos físicos e resultados experimentais. **Cerne**, Lavras, v.9, n.2, p. 178-191, 2003.

CARNEIRO, A.C.O., VITAL, B.R., PIMENTA, A.S., MORI, F.A. Reatividade dos taninos da casca de *Eucalyptus grandis* para produção de adesivos. **Cerne**, v.7, n.1, p.1-9. 2001.

CARVALHO, A. M., LAHR, F. A. R. **Painéis laminados estruturais, LVL's**. 2003. Disponível em: <<http://www.remade.com.br/artigos>> Acesso em 19 de maio 2007.

DANSOH, A. B., KOIZUMI, A., HIRAI, T. Bending strength and stiffness of glued butt-joint glulam. **Forest products journal**, v.54, n.8, p.40-44, 2004.

DEL MENEZZI, C.H.S. **Estabilização dimensional por meio do tratamento térmico e seus efeitos sobre as propriedades de painéis de partículas orientadas (OSB)**. Curitiba, 2004. 226 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

FAO - UNITED NATIONS FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION AND UNECE - ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE OF THE UNITED NATIONS . **Forest products annual market review 2004-2005**. Timber Bulletin Volume LVIII, 2005, 126p.

FIORELLI, J. **Utilização de fibras de carbono e de fibras de vidro para reforço de vigas de madeira.** Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2002, 168p.

FISSETTE, P. **The evolution of engineered wood I-joists.** 2000. Disponível em: <[http://www.umass.edu/bmatwt/publications/articles/i\\_joyist.html](http://www.umass.edu/bmatwt/publications/articles/i_joyist.html)> Acesso em 17 de junho 2006.

GASPAR, R. **Mecânica dos materiais:** Notas de aula da disciplina Resistência dos Materiais ministrada pelo Prof. Leandro Mouta Trautwein ao curso de Engenharia Civil do Centro Universitário Nove de Julho. São Paulo, 2005, 103p.

GERE, J. M. **Mecânica dos materiais.** Tradução por Luiz Fernando de Castro Paiva. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003. 698p.

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

GRANDMONT, J. F, THIVIERGE, C., CLOUTIER, A., GENDRON, G. Determination of Engineering Properties and Modeling of Wood I-Joists. In. PROCEEDINGS OF 9TH WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING. **Anais.** VTT, Lahti, p.1767 – 1774, 2006.

GREEN, D. W. e HERNANDEZ, R. Standards for Structural Wood Products and Their Use in the United States. **Wood design focus**, v.9 , n.3, p.03-11, 1998.

GUAN, Z. W., ZHU, E. C. AND RODD, P. D. Parametric studies of OSB webbed timber I-beams with changing web depth and opening location. In: A. Ranta-Maunus and T. Toratti ed(s) PROCEEDINGS OF 8TH WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING. **Anais.** VTT, Lahti, p.285-290, 2004.

HINDMAN, D. P., MANBECK, H. B., JANOWIAK, J. J. Measurement and prediction of lateral torsional buckling loads of composite wood materials: I-joist section. **Forest products journal**, v. 55, n.10, p.43-48, 2005.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICA DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Madeira: uso sustentável na construção civil**. IPT/SVMS/Sinduscom: São Paulo: IPT, 2003. 59p.

LEICHTI, R. J., FALK, R. H., LAUFENBEG, T. L. Prefabricated wood composite I-beams: a literature review. **Wood And Fiber Science**, v. 2, n.1, p.62-79. 1990.

LIMA, A. L., SZUCS, C. A., ROVERE, H. L. Análise de vigas I em madeira com mesa em *Pinus* e alma em OSB. In: IX ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. **Anais**. Cuiabá, Universidade Federal de Mato Grosso, 2004.

MACEDO, A. N., CALIL Jr., C. Estudo de emendas dentadas em madeira laminada colada (MLC): avaliação de método de ensaio – NBR 7190/1997. **Cadernos de engenharia de estruturas**. Universidade de São Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos, n.7, 1999.

MASISA DO BRASIL LTDA. **Recomendações práticas**: painel estrutural OSB. Paraná: Curitiba, 2006.15p.

MCKEEVER, D. B. Engineered wood products: a response to the changing timber resource. **Pacific Rim Wood Market Report**, n.123, p.5-15. 1997.

MENDES, L. M., IWAKIRI, S. I., MATOS, J. L. M., KEINERT Jr., SALDANHA, L. K. Avaliação do sistema de orientação de partículas na produção de painéis OSB (oriented strand board). **Cerne**, v.6, n.1, p.1-8. 2000.

MENDES, L. M.; ALBUQUERQUE, C.E.C.; IWAKIRI, S. A indústria brasileira de painéis de madeira **Revista da Madeira**, Curitiba, edição especial, p.12-20, 2003.

METRIGUARD INC. Metriguard Model 239A Stress Wave Timer. **Manual care and instructions, theory and data reduction.** Pullman, 1997.

NEWLIN, F. A., TRAYER, G. W. **Deflection of beams with special references to shear deformations.** In: The influence of the form of wooden beam on its stiffness and strength-I. Madison: Forest Products Laboratory, p.1–19, 1956.

NOCE, R., CARVALHO, R. M. M. A., CANTO, J. L. SILVA, M. L., MENDES, L. M. Medidas de desigualdade do mercado internacional de compensado. **Cerne**, v.13, n.1, p.107-110. 2007.

PEDROSA, A. L. **Performance de vigas “I” constituídas por flanges de PLP e almas de compensado de *Pinus taeda* L. e *Eucalyptus dunnii* Maiden, e alma de OSB de *Pinus spp.*** Curitiba, 2003. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

TARGA, L. A, BALLARIN, A. W., BIAGGIONI, M. A. M. **Avaliação do módulo de elasticidade da madeira com uso de método não-destrutivo de vibração transversal.** *Eng. Agrí.*, Jaboticabal, v.9, n.2, p.291-299. 2005.

TSOUMIS, G. **Science and technology of wood - structure, properties, utilization.** New York. Chapman & Hall, 1991. 494p.

ROSS, R. J., PELLERIN, R.F., VOLNY, N., SALSIG, W., FALK, R. H. **Inspection of timber bridges using stress wave timing nondestructive evaluation tools: A Guide for Use and Interpretation.** USDA: Washington, 1999. 473p.

SINKO, H. **Aumenta presença de painéis LVL no mercado.** 2003. Disponível em: <<http://www.remade.com.br/artigos>> Acesso em 19 de maio 2007.

SOUZA, M. R., TEIXEIRA, D.E. **Compostos à base de madeira.** IBAMA: Brasília, 2002. 22p.

USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Wood Handbook: wood as engineering material.** USDA: Washington, 1999. 473p.

USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Wood Handbook: wood as engineering material.** USDA: Washington, 1987. 473p.

WANG, X., ROSS, R. J., MCCLELLAN, M., BARBOUR, R. J., ERICKSON, J. R., FORSMAN, J. W., MCGINNIS, G. D. Nondestructive evaluation of standing trees with a stress wave method. **Wood And Fiber Science**, v. 33, n.4, p.522-533. 2001.

WILLIAMSON, P.E. **APA Engineered Wood Handbook.** McGraw-Hill: New York, 2002. 946p.

## APÊNDICES

### A. ANÁLISE ESTATÍSTICA.

#### 1. PROPRIEDADES DO S FLANGES

##### 1.1 Ensaio das emendas

Tabela 9. Análise de variância para o  $E_M$  das três emendas.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	7062450	2	3531225	6,919455	0,075199	9,552094
Dentro dos grupos	1530999	3	510332,8			
Total	8593449	5				

Tabela 10. Análise de variância para o  $f_M$  das três emendas.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	587,822	2	293,911	143,2736	0,001055	9,552094
Dentro dos grupos	6,154191	3	2,051397			
Total	593,9762	5				

##### 1.2 Análise do $E_{md}$ e $E_{me}$ dos flanges.

Tabela 11. Análise de regressão entre os  $E_{ME}$  e  $E_{MD}$ .

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	1	8168631,5	8168631	19,47564681	0,000336
Resíduo	18	7549703,91	419428		
Total	19	15718335,4			

#### 2. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS PAINÉIS DE COMPENSADO E DO OSB

##### 2.1. Painel de Compensado



Tabela 12. Análise de variância entre o  $E_M$  paralelo e perpendicular do compensado, com significância de 5%.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	3126204	1	3126204	0,352544	0,562148	4,600111
Dentro dos grupos	1,24E+08	14	8867560			
<b>Total</b>	<b>1,27E+08</b>	<b>15</b>				

Tabela 13. Análise de variância entre o  $f_M$  paralelo e perpendicular do compensado, com significância de 5%.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	197141,9	1	197141,9	97,5778	1,09E-07	4,600111
Dentro dos grupos	28284,99	14	2020,357			
<b>Total</b>	<b>225426,9</b>	<b>15</b>				

## 2.2.Painel de OSB

Tabela 14. Análise de variância entre o  $E_M$  paralelo e perpendicular do OSB, com significância de 5%.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	6,08E+09	1	6,08E+09	231,3924	4,23E-10	4,600111
Dentro dos grupos	3,68E+08	14	26266085			
<b>Total</b>	<b>6,45E+09</b>	<b>15</b>				

Tabela 15. Análise de variância entre o  $f_M$  paralelo e perpendicular do compensado, com significância de 5%.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	40572,78	1	40572,78	60,25327	1,94E-06	4,600111
Dentro dos grupos	9427,187	14	673,3705			
<b>Total</b>	<b>49999,96</b>	<b>15</b>				

## 2.3.Relação entre as propriedades do painel de compensado e OSB

Tabela 16. Análise de variância entre o  $E_M$  paralelo do compensado e OSB, com significância de 5%.

<b>ANOVA</b>						
<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
<b>Entre grupos</b>	1654636622	1	1654636622	56,357793	2,84766E-06	4,60010990
<b>Dentro dos grupos</b>	411032997,8	4	29359499,8	3		8
<b>Total</b>	2065669620	5				

Tabela 17. Análise de variância entre o  $f_M$  paralelo do compensado e OSB, com significância de 5%.

<b>ANOVA</b>						
<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
<b>Entre grupos</b>	56096,16887	1	56096,16887	32,96503512	5,09961E-05	4,600109908
<b>Dentro dos grupos</b>	23823,61679	14	1701,686914			
<b>Total</b>	79919,78566	15				

Tabela 18. Análise de variância entre o  $E_M$  perpendicular do compensado e OSB, com significância de 5%.

<b>ANOVA</b>						
<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
<b>Entre grupos</b>	1261296355	1	1261296355	218,4386125	6,18914E-10	4,600109908
<b>Dentro dos grupos</b>	80838038,54	14	5774145,61			
<b>Total</b>	1342134394	15				

Tabela 19. Análise de variância entre o  $f_M$  perpendicular do compensado e OSB, com significância de 5%.

<b>ANOVA</b>						
<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
<b>Entre grupos</b>	166943,5386	1	166943,5386	168,2830525	3,41916E-09	4,600109908
<b>Dentro dos grupos</b>	13888,5616	14	992,0401141			
<b>Total</b>	180832,1002	15				

### 3. ENSAIO DE LIGAÇÃO INTERNA (LVL) E RESISTÊNCIA NA LINHA DE COLA (LVL/OSB E LVL/COMPENSADO)

Tabela 20. Análise de variância da resistência na linha de cola entre LVL/OSB e LVL/compensado, com significância de 5%.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,537213	1	1,537213	5,547904	0,023249	7,279561
Dentro dos grupos	11,63736	42	0,27708			
Total	13,17457	43				

Tabela 21. Análise de variância da tensão de cisalhamento entre o LVL/OSB e LVL/compensado, com significância de 5%.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,107846	1	0,107846	28,67994	0,000681	5,317655
Dentro dos grupos	0,030083	8	0,00376			
Total	0,137929	9				

#### 4. AVALIAÇÃO MECÂNICA DAS VIGAS EM “T”

##### 4.1. Relação entre as propriedades das vigas em “T” com o $E_{ME}$ dos flanges

Tabela 22. Análise de regressão entre o  $E_M$  da viga em “T” com alma de compensado e o  $E_{ME}$  do flange, com significância de 5%.

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	1	457710,7	457710,7	10,30215	0,048968
Resíduo	3	133286	44428,67		
Total	4	590996,7			

Tabela 23. Análise de regressão entre o  $f_M$  da viga em “T” com alma de compensado e o  $E_{ME}$  do flange, com significância de 5%.

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	1	0,038101	0,038101	0,003299	0,957810016
Resíduo	3	34,65014	11,55005		
Total	4	34,68824			

#### 5. RELAÇÃO ENTRE $E_M$ , $f_M$ E FLECHA TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS DAS VIGAS EM “T”.

##### 5.1. Alma de compensado

Tabela 24. Análise de variância entre o  $E_M$  teórico e experimental, com 5% de significância.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	52463579	1	52463579	157,4594	1,52E-06	5,317655
Dentro dos grupos	2665505	8	333188,1			
<b>Total</b>	<b>55129084</b>	<b>9</b>				

Tabela 25. Análise de variância entre o  $f_M$  teórico e experimental, com 5% de significância.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	15,15558	1	15,15558	2,037525	0,191305	5,317655
Dentro dos grupos	59,50584	8	7,43823			
<b>Total</b>	<b>74,66142</b>	<b>9</b>				

Tabela 26. Análise de variância entre a flecha teórica e experimental, com 5% de significância.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,0685392	1	0,0685392	21,807088	5,22E-06	3,8836874
Dentro dos grupos	0,6977411	222	0,003143			
<b>Total</b>	<b>0,7662803</b>	<b>223</b>				

Tabela 27. Análise de regressão entre o  $E_M$  teórico e experimental.

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
<b>Regressão</b>	1	1659286	1659286	11,98843	0,040568
<b>Resíduo</b>	3	415221,9	138407,3		
<b>Total</b>	<b>4</b>	<b>2074508</b>			

Tabela 28. Análise de regressão entre o  $f_M$  teórico e experimental.

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
<b>Regressão</b>	1	34,61857727	34,61858	1490,893448	3,82167E-05
<b>Resíduo</b>	3	0,069660063	0,02322		
<b>Total</b>	<b>4</b>	<b>34,68823734</b>			

Tabela 29. Análise de regressão para a equação proposta no modelo teórico das flechas

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
<b>Regressão</b>	1	0,214379	0,214379	7,99E+32	1,2E-270
<b>Resíduo</b>	17	4,56E-33	2,68E-34		
<b>Total</b>	18	0,214379			

### 1.1 Alma de OSB

Tabela 30. Análise de variância entre o  $E_M$  teórico e experimental, com 5% de significância.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
<b>Entre grupos</b>	1494685,2	1	1494685,2	0,5641218	0,474116	5,3176551
<b>Dentro dos grupos</b>	21196633	8	2649579,1			
<b>Total</b>	22691318	9				

Tabela 31. Análise de variância entre o  $f_M$  teórico e experimental, com 5% de significância.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
<b>Entre grupos</b>	1494685,2	1	1494685,2	0,5641218	0,474116	11,258624
<b>Dentro dos grupos</b>	21196633	8	2649579,1			
<b>Total</b>	22691318	9				

Tabela 32. Análise de variância entre a flecha teórica e experimental, com 5% de significância.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
<b>Entre grupos</b>	0,0022438	1	0,0022438	0,8441615	0,3594526	3,894232
<b>Dentro dos grupos</b>	0,4731316	178	0,002658			
<b>Total</b>	0,4753754	179				

Tabela 33. Análise de regressão entre o  $E_M$  teórico e experimental.

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
<b>Regressão</b>	1	505290,1	505290,1	0,645368	0,48053
<b>Resíduo</b>	3	2348846	782948,6		
<b>Total</b>	4	2854136			

Tabela 34. Análise de regressão entre o  $f_M$  teórico e experimental.

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
<b>Regressão</b>	1	100,2955137	100,2955	518,9249938	0,000185272
<b>Resíduo</b>	3	0,579826651	0,193276		
<b>Total</b>	4	100,8753404			

Tabela 35. Análise de regressão para a equação proposta no modelo teórico das flechas

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
<b>Regressão</b>	1	0,122811	0,122811	2,02E+32	1,4E-265
<b>Resíduo</b>	17	1,03E-32	6,08E-34		
<b>Total</b>	18	0,122811			

## 6. RELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS VIGAS EM “I” COM A ALMA DE COMPENSADO E COM ALMA OSB

### 6.1 $E_M$

Tabela 36. Análise de variância entre o  $E_M$  experimental da viga em “I” com a alma de compensado e a alma de OSB, com 5% de significância.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
<b>Entre grupos</b>	46833515,46	1	46833515,46	14,91905553	0,008338	5,987374
<b>Dentro dos grupos</b>	18835045,7	6	3139174,284			
<b>Total</b>	65668561,16	7				

### 6.2 $f_M$

Tabela 37. Análise de variância entre o  $E_M$  experimental da viga em “I” com a alma de compensado e a alma de OSB, com 5% de significância.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
<b>Entre grupos</b>	190,0733333	1	190,0733333	11,21677881	0,010093	5,317645
<b>Dentro dos grupos</b>	135,5635777	8	16,94544722			
<b>Total</b>	325,6369111	9				