

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

DIOGO GARBIN

**ANÁLISE DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DE VIGAS I COM  
MESAS CONSTITUÍDAS DE MADEIRAS REAPROVEITADAS DE  
BATENTES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO

2013

DIOGO GARBIN

**ANÁLISE DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DE VIGAS I COM  
MESAS CONSTITUÍDAS DE MADEIRAS REAPROVEITADAS DE  
BATENTES**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil, do Curso Engenharia Civil, da Coordenação de Engenharia Civil – COECI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes

CAMPO MOURÃO

2013



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Câmpus Campo Mourão  
Diretoria de Graduação e Educação Profissional  
Coordenação de Engenharia Civil



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso Nº 11

**ANÁLISE DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DE VIGAS I COM MESAS CONSTITUÍDAS  
DE MADEIRAS REAPROVEITADAS DE BATENTES**

por

**Diogo Garbin**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 16h00 do dia 08 de abril de 2013 como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO.

**Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes**  
(UTFPR)  
**Orientador**

**Prof. Dr. Ronaldo Rigobelo**  
( UTFPR )

**Prof. Msc. Douglas Fukunaga Surco**  
(UTFPR)

Responsável pelo TCC: **Prof. Msc. Valdomiro Lubachevski Kurta**

Coordenador do Curso de Engenharia Civil:

**Profª Dr. Marcelo Guelbert**

*A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.*

***Dedicatória:***

*Aos meus pais Telmo e Viviane,*

*A minha irmã Fernanda,*

*Aos meus familiares e amigos presentes em minha formação.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por me guiar durante o curso, permitindo me fazer às escolhas certas e também por conceder saúde, disposição e sabedoria.

Aos meus pais Telmo e Viviane por estar sempre me apoiando o tempo todo, mostrando sabedoria para passar pelos momentos difíceis ao longo dessa trajetória. Obrigado por tudo.

Ao Professor Dr. Jorge Luis Nunes de Góes, por todos os conhecimentos repassados ao longo do curso, e em especial durante o período de orientação do trabalho de conclusão de curso. Obrigado pela dedicação e paciência.

A minha irmã Fernanda pela amizade, conselhos e por todos os momentos pelos quais passamos juntos.

A toda a minha família que sempre me ajudou nos momentos que precisei, e saibam que sem vocês isso não seria possível.

Aos amigos, pelos grandes momentos durante essa jornada, principalmente as amizades que criei ao ingressar na UTFPR de Campo Mourão, imprescindível para chegar até aqui.

A todos os professores da COECI – Coordenação de Engenharia Civil, em especial o professor Douglas Fukunaga Surco pelo conhecimento e pela amizade.

Ao técnico do laboratório de Estruturas da UTFPR, Maiko Cristian Sedoski pela amizade e disposição para que esse trabalho fosse concluído.

## RESUMO

GARBIN, Diogo. **ANÁLISE DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DE VIGAS I COM MESAS CONSTITUÍDAS DE MADEIRAS REAPROVEITADAS DE BATENTES.** 2013. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2013.

Os produtos derivados de madeira vêm ganhando participação no mercado da construção civil principalmente devido à possibilidade de emprego de madeira proveniente de florestas plantadas, assim como a redução dos defeitos e as virtudes de um produto industrializado. As vigas de madeira em perfil I, coladas, são um exemplo de produto industrializado e derivado de madeira e apresentam características como elevada rigidez, capacidade de vencer grandes vãos, leveza, custo acessível e facilidade de produção além de oferecer economia de material se comparado com vigas de seção retangular. A ideia central do trabalho é utilizar um material rejeitado por uma distribuidora de batentes de madeira para produzir um elemento estrutural moderno e com confiabilidade comparável ao tradicional. A viga de seção I é um elemento que nesse estudo teve duas mesas feitas a partir de peças de batente descartado e alma feita de OSB (Painel de tiras de madeira orientadas). Para a ligação entre os elementos foi utilizada a resina fenol-resorcinol-formaldeído. Neste trabalho foi feita a caracterização das propriedades físico-mecânicas do material de reaproveitamento, e também a análise estrutural teórica e experimental através dos critérios de rigidez efetiva e de ruptura das vigas de seção I. Os resultados teóricos foram comparados com os experimentais, de modo a aprovar a viabilidade da utilização da madeira reaproveitada como mesa de vigas com perfil I. Os resultados dos ensaios experimentais indicaram a eficiência estrutural das vigas I, não havendo descolamento da ligação mesa-alma. Os modos de ruptura apresentaram correlação com os apresentados na literatura, entretanto, a capacidade de carga e principalmente a rigidez experimental tiveram baixa correlação com o estimado, assim sendo necessário o estudo de modelos teóricos mais precisos.

**Palavras-chave:** Vigas de seção I. Madeira. Reaproveitamento.

## ABSTRACT

GARBIN, Diogo. **STRUCTURAL PERFORMANCE ANALYSIS OF I-JOISTS WITH FLANGES MADE OF RECYCLED WOOD JAMBS**. 2013. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2013.

The wood products are gaining market share in the construction industry mainly due to the possibility of use wood from planted forests, even as reduction of defects and virtues of an industrial product. I-Joists is an example of manufactured product and wood-based which has high stiffness, capacity to win large spans, lightness, affordability, easy manufacturing and offers economy of materials if compared to rectangular beams. The central idea of the work is to use a material rejected by a wood jamb distributor to produce a structural element with modernity and reliability if compared with the traditional. I-Joist is an element which in this study had the flanges made from discarded wood and web made of OSB (Oriented Strange Board). Phenol-resorcinol-formaldehyde was the resin used for the joint between the elements. This study characterizes the physical and mechanical properties of reuse material, and also structural analyses using theoretical and experimental criteria off effective stiffness and rupture of I-Joists. The theoretical results were compared with experimental to approve the viability of using recycled wood as flange on I-Joist. The laboratory tests results indicated the structural efficiency of I-Joists, there was no detachment of flange to web joint. The failure modes correlated with those presented in the literature, however, the load capacity and stiffness mostly had low correlation between experimental and estimated, therefore requiring the study of more accurate theoretical models.

**Keywords:** I-Joist. Wood. Recycling.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - DETALHES DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS DOS MARCOS .....	15
FIGURA 2 - PRODUTOS ENGENHEIRADOS DE MADEIRA .....	18
FIGURA 3 - VIGA DE MADEIRA I-JOIST X VIGA DE MADEIRA SERRADA SÓLIDA DE SEÇÃO RETANGULAR .....	19
FIGURA 4 - TIPOS DE EMENDAS ENTRE ELEMENTOS .....	21
FIGURA 5 - TIPOS DE EMENDAS USADAS EM VIGAS "I" .....	23
FIGURA 6 - PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE VIGAS "I" .....	24
FIGURA 7 - DIMENSÕES DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS .....	24
FIGURA 8 - SEÇÕES TRANSVERSAIS DAS VIGAS COMPOSTAS .....	25
FIGURA 9 - PRINCIPAIS MODOS DE FALHAS DAS VIGAS "I" EM TESTES FEITOS EM ESCALA REAL .....	27
FIGURA 10 - DISTRIBUIÇÃO DA DEFORMAÇÃO, TENSÃO E FORÇA DE VIGAS "I" SUBMETIDAS A MOMENTO. ....	29
FIGURA 11 - DISTRIBUIÇÃO DA DEFORMAÇÃO, TENSÃO E FORÇA DE VIGAS "I" SUBMETIDAS AO CISALHAMENTO. ....	30
FIGURA 12 - DIMENSÕES DAS VIGAS FEITAS COM PAINÉIS ESTRUTURAIS .....	31
FIGURA 13 - SEÇÕES TRANSVERSAIS E DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES DO EUROCODE 5 .....	32
FIGURA 14 - SEÇÃO TRANSVERSAL DO MARCO .....	35
FIGURA 15 - CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS.....	37
FIGURA 16 - ARRANJO PARA O ENSAIO DE COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS .....	38
FIGURA 17 - DIAGRAMA DE CARREGAMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA RIGIDEZ DA MADEIRA À COMPRESSÃO .....	38
FIGURA 18 - PROCESSO DE CONFECÇÃO DAS MESAS .....	40
FIGURA 19 - ARRANJO PARA O ENSAIO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS MESAS .....	40
FIGURA 20 - PROCESSO DE CONFECÇÃO DAS ALMAS .....	41
FIGURA 21 - COLAGEM DAS VIGAS .....	42
FIGURA 22 - DIMENSÕES DA VIGA DE MADEIRA "I" .....	43
FIGURA 23 - ARRANJO PARA ENSAIO DAS VIGAS.....	44
FIGURA 24 - VIGAS COM OS ENRIJECEDORES .....	44

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CAPACIDADE DE CARGA MÉDIA E TENSÕES DE TRAÇÃO E CISALHAMENTO POR CARREGAMENTO UNITÁRIO .....	25
TABELA 2 - VALORES MÉDIOS PARA FORÇA MÁXIMA, RESISTÊNCIA E MÓDULO DE ELASTIDADE À COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS DE CADA UMA DAS MESAS EMPREGADAS NOS ESTUDOS. ....	45
TABELA 3 - VALORES MÉDIOS DE DENSIDADE APARENTE DAS MESAS. ....	46
TABELA 4 - VALORES MÉDIOS DE UMIDADE DAS MESAS.....	47
TABELA 5 - VALORES DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS MESAS. ....	48
TABELA 6 - TABELA COMPARATIVA ENTRE OS VALORES DE RIGIDEZ EFETIVA TEÓRICA E EXPERIMENTAL DAS VIGAS DE MADEIRA “I”. ....	50
TABELA 7 - TABELA COMPARATIVA ENTRE OS VALORES DE FORÇA DE RUPTURA TEÓRICA E EXPERIMENTAL DAS VIGAS DE MADEIRA “I”. ....	50

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	12
<b>3 JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>13</b>
<b>4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>14</b>
4.1 MADEIRA BENEFICIADA .....	14
4.2 PRODUTOS ENGENHEIRADOS DE MADEIRA (PEM) .....	17
4.3 VIGAS DE MADEIRA I (I-JOISTS) .....	18
4.4 HIPÓTESES DE CÁLCULO .....	29
<b>5 METODOLOGIA</b> .....	<b>35</b>
5.1 MATERIAIS .....	35
5.2 MÉTODOS .....	36
5.3 MONTAGEM DAS VIGAS EM “I” .....	39
5.4 AVALIAÇÃO TEÓRICA DAS VIGAS “I” .....	43
5.5 ENSAIO DAS VIGAS.....	43
<b>6 RESULTADO E DISCUSSÕES</b> .....	<b>45</b>
6.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS MESAS.....	45
6.1.1 Compressão paralela às fibras.....	45
6.1.2 Densidade aparente .....	46
6.1.3 Umidade .....	47
6.2 CARACTERÍSTICAS DO OSB.....	49
6.3 ANÁLISE DAS VIGAS.....	49
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>52</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>53</b>
<b>APÊNDICE A – LAUDO DE ENSAIO COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS MADEIRA MESA 1</b> .....	<b>57</b>
<b>APÊNDICE B – LAUDO DE ENSAIO COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS MADEIRA MESA 2</b> .....	<b>58</b>
<b>APÊNDICE C – LAUDO DE ENSAIO COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS MADEIRA MESA 3</b> .....	<b>59</b>
<b>APÊNDICE D – LAUDO DE ENSAIO COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS MADEIRA MESA 4</b> .....	<b>60</b>
<b>APÊNDICE E – LAUDO DE ENSAIO COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS MADEIRA MESA 5</b> .....	<b>61</b>
<b>APÊNDICE F – LAUDO DE ENSAIO COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS MADEIRA MESA 6</b> .....	<b>62</b>
<b>APÊNDICE H – LAUDO DE ENSAIO COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS MADEIRA MESA 8</b> .....	<b>64</b>
<b>APÊNDICE I – LAUDO DE ENSAIO COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS MADEIRA MESA 9</b> .....	<b>65</b>
<b>APÊNDICE K – RESULTADOS PARA OS ENSAIOS DE UMIDADE E DENSIDADE DAS MESAS DE 1 A 5</b> .....	<b>67</b>
<b>APÊNDICE L – RESULTADOS PARA OS ENSAIOS DE UMIDADE E DENSIDADE DAS MESAS DE 6 A 10</b> .....	<b>68</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Dentre os materiais utilizados no setor da construção civil, a madeira merece destaque devido a sua versatilidade, podendo ser utilizada como esquadrias, pisos, escoramento e fôrmas de lajes, assim como em elementos estruturais. A opção por esse material se dá pela sua grande disponibilidade, capacidade de isolamento acústica e térmica, boa durabilidade, boa relação entre a resistência e o peso, rapidez nas construções devido ao seu uso e por se tratar de um material renovável e reutilizável. A madeira produz menos carbono e utiliza menos energia na produção de seus derivados quando comparados com o concreto e o aço (WIJMA, 2001).

Para fins estruturais a madeira é amplamente utilizada em vários países da América do Norte e Europa, devido em grande parte pelo surgimento dos produtos engenheirados de madeira, que proporcionam uma economia de material pelo uso mais eficiente de suas propriedades. A industrialização desses produtos elimina defeitos antes presentes na madeira como nós e empenamentos, uniformizando suas características. No Brasil esses materiais ainda são pouco utilizados, porém vários estudos vêm sendo desenvolvidos nas universidades brasileiras a fim de comprovar os seus usos no país e também desenvolver novas tecnologias, tirando proveito de suas qualidades.

Entre os produtos engenheirados de madeira as vigas com seção “I” são uma combinação de materiais com características diferentes, aliada a uma geometria mais eficiente. Destaca-se sua elevada rigidez, capacidade de vencer grandes vãos, leveza, custo acessível e facilidade de produção.

A madeira serrada possui grande aplicação na construção civil, destacando-se os seguintes usos: fôrmas para estruturas de concreto armado, estrutura de telhados, esquadrias, pisos, dentre outros. No caso do uso para esquadrias e pisos os padrões de qualidade são rigorosos, principalmente no que diz respeito à estética. Constantemente são descartadas peças que possuem excelentes propriedades mecânicas por causa de defeitos como manchas, pequenos empenamentos, fissuras, etc. O material descartado por um setor da construção civil (acabamento) pode ser aproveitado por outro (estruturas).

A ideia central deste trabalho é reutilizar material de rejeito da construção civil para a produção de um produto estrutural moderno e com confiabilidade

comparável ao tradicional. Trata-se do uso de peças de batentes de madeira rejeitados pelo controle da qualidade para emprego como mesa de vigas de madeira de seção I (I-Joists).

Para analisar o desempenho estrutural das vigas I foram comparados os resultados do modelo teórico com os obtidos através dos experimentos das vigas. O procedimento foi realizado no Laboratório de Sistemas Estruturais da UTFPR – Campus Campo Mourão. Através dos resultados verifica-se a viabilidade técnica ou não do reuso de madeira descartada para a produção de vigas I-joists.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

- Analisar o desempenho estrutural de vigas I-Joists confeccionadas com madeira beneficiada descartada por uma distribuidora localizada na cidade de Corbélia - PR.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar a madeira beneficiada descartada utilizada para confecção das vigas de seção I.
- Estabelecer as seções que podem ser confeccionadas com o uso da madeira beneficiada descartada.
- Comparar o desempenho das vigas de forma teórica e experimental, segundo a rigidez efetiva e o módulo de ruptura.

### 3 JUSTIFICATIVA

Para diminuir os impactos do uso intenso de recursos naturais buscam-se alternativas para um desenvolvimento sustentável. A madeira, que além de ser renovável e ter um baixo consumo de energia para sua produção, apresenta um grande potencial para reaproveitamento. Certas espécies de madeira levam um longo período para se renovar e, portanto, o reuso é imprescindível. Com o desenvolvimento de técnicas de processamento da madeira é possível melhorar algumas propriedades como a resistência mecânica, a resistência contra o ataque biológico e a regularidade dimensional, tornando seu uso mais adequado para estruturas.

As vigas de seção I (I-Joists) são vigas produzidas através da composição de peças unidas em um processo de industrialização em que duas mesas são ligadas a uma alma, aumentando a relação entre a resistência e o seu peso quando comparado a uma viga de seção retangular.

A madeira beneficiada para batentes precisa atender requisitos rígidos quanto à estética e também a regularidade dimensional. Para reaproveitar as peças que não atendem tais especificações é preciso procurar alternativas de uso, que não priorizem a estética. No caso do setor de estruturas de madeira as propriedades mecânicas têm prioridade sobre a estética, tornando-se um mercado interessante para o reuso racional, contribuindo com o meio ambiente e podendo ser uma segunda fonte de renda para as distribuidoras.

Não foram encontrados estudos sobre a quantidade de resíduos gerados pela atividade das distribuidoras que fazem o armazenamento e transporte desse material. Sendo assim, trabalhos sobre esse assunto devem ser incentivados.

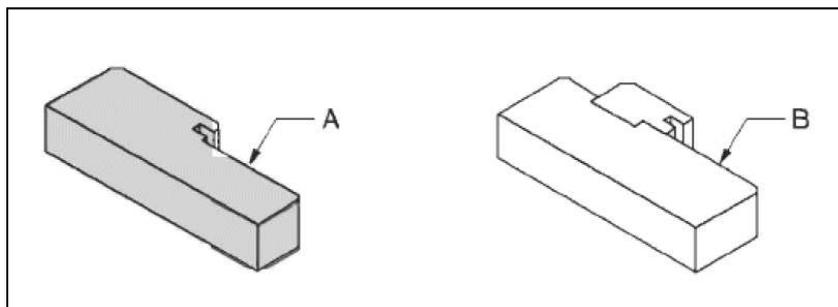
## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 MADEIRA BENEFICIADA

A madeira beneficiada é obtida através do processamento de peças serradas. Para o beneficiamento são utilizados equipamentos que possuem cabeças rotatórias providas de facas, fresas ou serras, que trazem as peças de madeira características como dimensões definitivas, forma e acabamento superficial, agregando valor ao produto final. Esses equipamentos fazem algumas operações como o aplainamento, molduramento, torneamento, desengrosso, desempenho, destopamento, recorte, furação, respigado, ranhurado, entre outras. A operação que cada peça vai sofrer depende do produto final desejado, que pode ser assoalho, forro, batente, rodapé, taco, etc (ZENID, 2009).

A ABIMCI (Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente) considera que a madeira beneficiada é um produto de maior valor agregado e a divide em quatro grandes categorias: 1) as portas de madeira, que podem ser lisas, maciças ou engenheiradas; 2) as molduras, que incluem a meia-cana, rodapé, batente, vista de porta, janela, etc; 3) os pisos de madeira, que são classificados de acordo com as suas dimensões como o assoalho, parquet, lamparquet, taco, entre outros; 4) Painel Colado Lateral, EGP (Edge Glued Panel), é um conjunto de peças de madeira coladas lateralmente formando um painel, utilizado na fabricação de partes e peças de móveis em madeira (ABIMCI, 2009).

Segundo a norma NBR 15930-1, (2011) o marco também é conhecido como caixa, caixão, aduela, batente, etc. O batente é um componente que tem como função guarnecer o vão e sustentar a folha de porta, é composta por três peças, sendo dois montantes que são orientados na vertical onde a folha da porta é fixada e uma travessa orientada na horizontal ligando os dois montantes. Quanto à seção transversal o batente pode ter um rebaixo (A) ou um ressalto (B) que é destinado a impedir o movimento de rotação da folha da porta, como mostra a Figura 1.



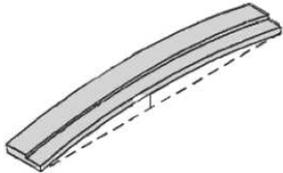
**Figura 1 - Detalhes das seções transversais dos marcos**  
**Fonte: NBR 15930-1 (2011).**

Para ser utilizado em uma construção o batente deve atender a requisitos mínimos quanto ao aspecto visual, dimensões e o desvio de forma que são estabelecidos pela NBR 15930-2, 2011.

Ao se fazer uma inspeção a olho nú, com iluminação de 300 lux e o observador em pé a 1,0m de distância o marco para se enquadrar no padrão A de qualidade não pode apresentar fungos que atacam a madeira, insetos xilófagos, medula, fissura de compressão, cerne quebradiço, apodrecimento, quina morta aparente, furos de insetos mortos na face aparente, bolsa de resina na face aparente, nó solto, rachaduras de topo abertas, fissuras superficiais abertas na face aparente. É permitido a presença de furos de insetos mortos na contra face, nó firme na face aparente de até 3 cm e fissuras superficiais na contraface (NBR 15930-2, 2011).

De modo a se enquadrar nos padrões o marco com rebaixo e do tipo de madeira leve deve apresentar as seguintes dimensões: a espessura da alma de 30 mm, a profundidade do rebaixo deve ser da espessura da folha de porta mais 2 mm, a largura do rebaixo de 10 mm e a largura dos montantes e das travessas do marco deve acompanhar a largura nominal prevista para a parede. Sendo admitido o valor máximo de variação de cada dimensão de 1,5 mm (NBR 15930-2, 2011).

Outro requisito importante são os desvios de forma, que são o encurvamento e o arqueamento, o Quadro 1 apresenta os valores padrões que o batente deve apresentar. Todos os parâmetros devem estar enquadrados em determinado padrão de variação nominal (VN). Se algum parâmetro não for atendido deve ser estudado o enquadramento em padrão inferior, até atender todos os requisitos. Em casos que apresentar variações maiores o material não pode ser utilizado como batente.

Croquis	Variações e desvios em relação ao prisma de base retangular	Padrões e limites dos desvios de forma dos montantes e travessa(s) do marco mm		
		VN 1	VN 2	VN 3
	Encurvamento dos montantes	3,0	2,0	1,0
	Encurvamento da(s) travessa(s)	1,5	1,0	0,5
	Arqueamento dos montantes	2,0	1,5	1,0
	Arqueamento da(s) travessa(s)	1,0	0,7	0,5

NOTA Tratando-se de desvios de forma, os valores grafados e os obtidos através dos ensaios podem ser positivos ou negativos, indistintamente; esta Tabela assume valores absolutos para os resultados.

**Quadro 1 - Desvios de forma máximos dos marcos**  
**Fonte: NBR 15930-2 (2011).**

Conforme Teixeira, (2009) os principais tipos de resíduos de madeira são os galhos e ápices, cascas, costaneiras, destôpo, serragem, pó de lixamento, sobras e os rejeitos, que são peças que ao sofrer processamento não atenderam os padrões técnicos ou comerciais. Portanto os batentes que não atendem as especificações da norma podem ser considerados como rejeitos.

Uma das etapas em que aparecem defeitos na madeira é durante o processo de secagem e depende das características da madeira. Podem aparecer durante o processo ou após a secagem e podem ser divididos em quatro categorias: o colapso, as rachaduras, o endurecimento superficial, e os empenamentos (SANTOS, 2002).

Em consulta a Garbin Madeiras, uma distribuidora de madeiras beneficiadas que informou que grande parte dos defeitos ocorre durante a secagem da madeira que chega ainda úmida, e que a principal categoria é o empenamento, seguido pelas rachaduras. Defeitos como quina morta aparente (esmoado), furos de insetos mortos, presença de apodrecimento e também a presença de cerne quebradiço são

detectados no recebimento. Ocorrem devido à falta de controle de qualidade nas empresas fornecedoras do material. A empresa estima que cerca de 5% dos batentes são classificadas como rejeito, gerando em torno de 100 peças por mês. Procuram-se alternativas para dar um destino final, algo para agregar algum valor ao rejeito de madeira.

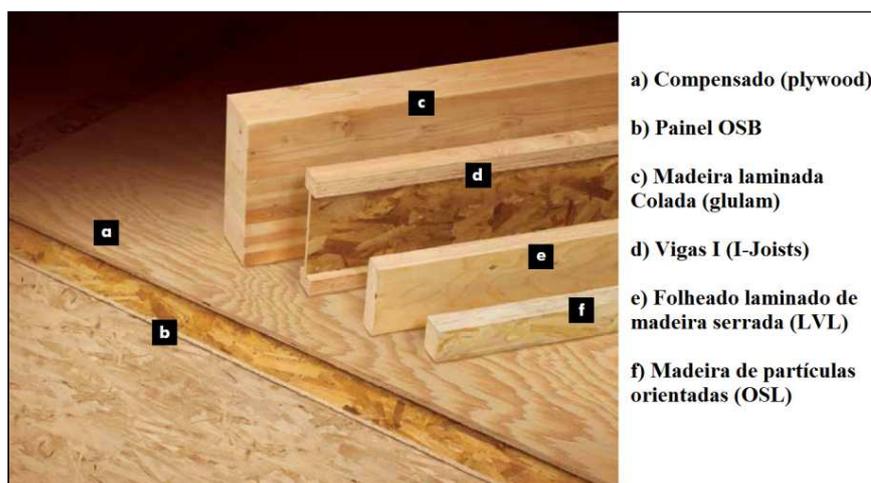
#### 4.2 PRODUTOS ENGENHEIRADOS DE MADEIRA (PEM)

Os Produtos Engenheirados de Madeira (PEM) surgiram através das indústrias de madeira, que em resposta a grande demanda dos consumidores, desenvolveu novas tecnologias para usar árvores menores e aumentar a eficiência da produção. Qualquer produto que consiste na combinação de pequenos componentes em um elemento estrutural e foi concebido usando metodologias de engenharia são considerados PEM. Esses produtos são desenvolvidos para o uso mais eficiente dos materiais e conseqüentemente a maioria deles possui uma relação peso/resistência menor que os produtos convencionais (AMERICAN WOOD COUNCIL, 2006a).

Uma das características dos componentes engenheirados é a possibilidade de produção de elementos com dimensões maiores, se comparados com a madeira serrada (AMERICAN WOOD COUNCIL, 2006a). Para Silva, (2010) o uso desses produtos tem como objetivo eliminar alguns defeitos como nós, fendas, fibra torcida e inclinação excessiva das fibras que normalmente a madeira apresenta, possibilitando uma utilização mais abrangente da madeira.

A Associação da Madeira Engenheirada, APA (The Engineered Wood Association) ressalta as várias aplicações dos PEM, que inclui a construção de casas, edificações comerciais e estruturas de indústrias. Os principais produtos manufaturados são: O compensado (plywood), os painéis de OSB (Oriented Strand Board), a madeira laminada colada (glulam), as vigas de madeira I (I-Joist), o folheado laminado de madeira serrada (LVL) e a madeira de partículas orientadas (OSL), (ENGINEERED WOOD ASSOCIATION, 2010).

A Figura 2 mostra os principais produtos engenheirados de madeira.



**Figura 2 - Produtos Engenheirados de Madeira**  
**Fonte: ENGINEERED WOOD ASSOCIATION (2010).**

As propriedades dos PEM que em diversas situações apresentam desempenho superior ao concreto são pesquisadas e desenvolvidas nos países da América do Norte e em alguns países da Europa, trazendo melhoras gradativas quanto à versatilidade do uso. A perspectiva é que os PEM venham a ganhar espaço tanto no mercado nacional como internacional. (ABIMCI, 2003).

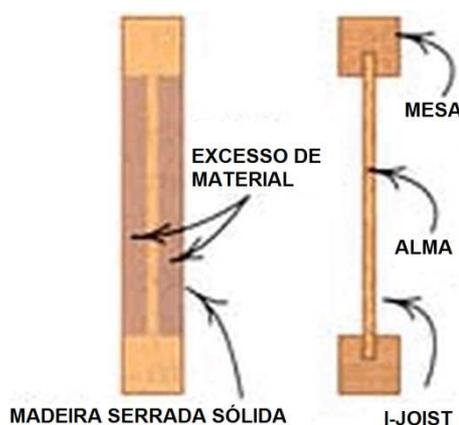
#### 4.3 VIGAS DE MADEIRA I (I-JOISTS)

Um dos PEM são as vigas de madeira de seção transversal “I” ou I-Joists. Seu uso é indicado devido à uniformidade das dimensões, leveza e capacidade de vencer grandes vãos. Utilizadas primordialmente como componentes do sistema de lajes (barrotes), também podem ser usadas em telhados onde grandes vãos e carregamentos são requisitos. Vem como alternativa para a madeira serrada (AMERICAN WOOD COUNCIL, 2006b).

A grande eficiência das vigas I-Joists acontece pela utilização mais eficiente das características mecânicas da madeira. As mesas são responsáveis por resistir

aos esforços normais devido à flexão, enquanto a alma é projetada para resistir às tensões de cisalhamento. A ligação entre as peças é feita tipicamente através de um sulco nas mesas onde é aplicado um adesivo que faz a ligação com a alma (AMERICAN WOOD COUNCIL, 1999).

A Figura 3 apresenta a economia de material da seção da viga “I” se comparado com uma viga retangular de madeira sólida.



**Figura 3 - Viga de madeira I-Joist x Viga de madeira serrada sólida de seção retangular**

**Fonte: FISETTE (2000a).**

As vigas I-Joists são consideradas produtos ambientalmente sustentáveis. Sua produção permite a utilização de árvores de pequeno diâmetro, crescimento rápido, com qualidade inferior e mesmo assim resulta um produto com qualidade, devido principalmente ao processo industrial. Outro aspecto importante é que os produtos de madeira despendem menos energia para sua produção, comparado com os outros materiais tradicionais da construção civil, concreto e aço (WIJMA, 2001).

A Trust Joist Corporation (TJ) inventou a indústria de vigas de madeira I, no ano de 1969 a empresa fez sua primeira viga nesse formato. Ainda hoje a indústria TJ mantém a liderança no segmento. O custo e o desempenho impulsionou o desenvolvimento dessas vigas. Devido ao estilo das construções que estavam surgindo na década de 1970, grandes vãos eram necessários e vigas de madeira serrada eram caras, difíceis de encontrar e ainda não tinham capacidade de carga adequada. A partir disso as vigas I que eram feitas com almas em compensado e

madeira serrada nas mesas, passaram a ser usadas, mas as primeiras versões ainda eram caras (FISSETTE, 2000b).

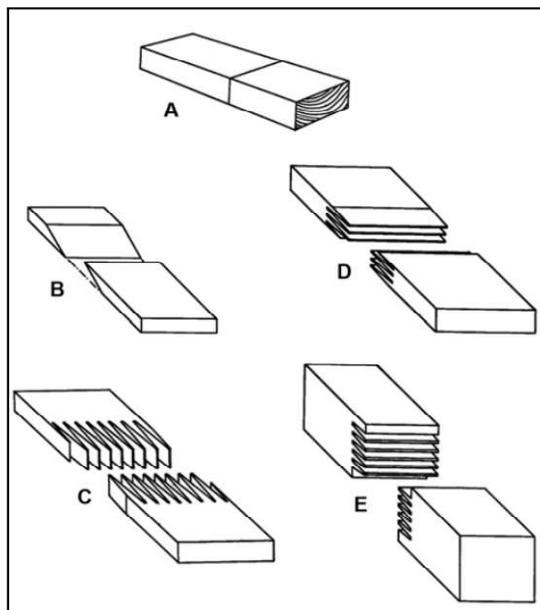
No ano de 1977 a Trust Joist Corporation substituiu as mesas de madeira sólida pelo LVL (Laminated Veneer Lumber). Como a produção de LVL é mais ou menos um processo contínuo era possível fabricar vigas I com comprimentos longos. Em 1990 outro avanço para o produto foi a substituição do compensado pelo OSB (Oriented Strand Board) na alma. O OSB é mais barato, tem grande disponibilidade, e é mais resistente à força cortante que o compensado, atualmente a maioria dos fabricantes usam OSB na alma. Uma tendência inesperada está surgindo que é a crescente demanda por madeira serrada sólida para uso nas mesas (FISSETTE, 2000b).

Recentemente, o desenvolvimento de adesivos melhorados e as técnicas de construção trouxeram o desenvolvimento da indústria de vigas em I pré-fabricadas, que são consideradas como a segunda geração dos PEM. Principalmente nos EUA este produto está substituindo grandes volumes de madeira serrada (SANTOS, 2008).

As mesas podem ser feitas tanto de madeira serrada sólida como de compostos estruturais, como o LVL (Laminated Veneer Lumber). O material e as dimensões das duas mesas devem ser iguais (ENGINEERED WOOD ASSOCIATION, 2012).

No caso de uso de madeira serrada sólida a madeira mais utilizada para produção das mesas é o Pinus. Para Lima, (2005) que realizou um estudo do comportamento estrutural das vigas de madeira, com seção I, com alma em OSB e mesas em Pinus, demonstrou que a utilização dessas na construção civil é viável.

Como a madeira serrada possui limitação quanto ao seu comprimento, algumas emendas são utilizadas para aumentar essa dimensão. Segundo USDA, (2010) no comprimento da madeira pode ser feita a união dos elementos através da emenda de topo (A), biselada (B), dentada horizontal (finger-joint) (C), dentada vertical (D) e dentada não estrutural (E). Como mostra a Figura 4.



**Figura 4 - Tipos de emendas entre elementos**  
**Fonte: USDA (2010).**

Em um estudo que analisou as emendas em vigas de perfil I de madeira, onde foram utilizadas emendas do tipo finger-joint e em bisel. Verificou que os valores de resistência à tração, não foram muito elevados quando comparados aos de madeiras sem emendas, porém este fator não é determinante no cálculo e no uso das vigas de perfil I, pois os valores de carga máxima teóricos ficaram próximos dos experimentais. Chegando a conclusão que qualquer uma das emendas pode ser fabricada, dependendo apenas das facilidades de produção (SILVA; PLETZ; MOURA, 2008).

A emenda de topo e a dentada não estrutural não são aconselháveis para serem utilizadas na junção entre as mesas, já que a mesa é a parte da viga que resiste aos esforços de tração e compressão. As dimensões dos dentes da emenda dentada, assim como relação entre a altura e o comprimento do bisel, dependem do fabricante e do uso que será dado às vigas (SANTOS, 2008). Apesar de serem potencialmente mais fortes que a emenda dentada, a emenda em forma de bisel possui uma dificuldade maior para a sua produção em um processo contínuo de fabricação (LEICHTI; FALK; LAUFENBERG, 1990).

Para as almas das vigas de madeira I os materiais mais utilizados atualmente são os painéis estruturais, que podem ser o compensado ou o OSB.

Devem ter espessura mínima de 3/8" (9 mm), segundo as normas de padronização destes materiais (ENGINEERED WOOD ASSOCIATION, 2012).

O OSB é um painel estrutural que está no mercado mundial desde 1980, produzido a partir de partículas de madeira, formado por algumas camadas, sendo as camadas internas perpendiculares às camadas externas, de modo que as suas propriedades mecânicas se assemelham às da madeira sólida, podendo substituir os compensados estruturais (MENDES, 2003).

No Brasil o OSB é um produto recente, tendo iniciado sua produção no ano de 2002 para maior conhecimento das características estruturais destes painéis Dias, et al (2004) estudaram suas propriedades mecânicas e os valores de resistência e rigidez a flexão foram um pouco superiores aos fornecidos pelo fabricante, mostrando a confiabilidade destas chapas.

Numa comparação entre o OSB e o compensado deve-se destacar a homogeneidade das chapas de OSB, pois não se encontra um ponto fraco devido a um nó ou outro defeito proveniente da madeira sólida e também a delaminação é praticamente inexistente. A resistência ao cisalhamento é outra característica em que o OSB supera o compensado, os valores através da sua espessura, são cerca de duas vezes maiores. Sendo esse o fator mais decisivo na escolha desse material para a confecção das almas de vigas I (FISSETTE, 2005).

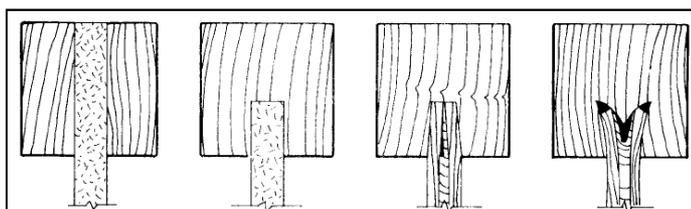
Ainda comparando o OSB com o compensado acredita-se que a principal limitação do OSB seja sua baixa estabilidade dimensional, pois quando ele é exposto à umidade incha em espessura e expande linearmente muito mais que o compensado. Porém o uso de tratamentos térmicos melhora essa propriedade (MENEZZI, 2004).

Segundo Góes, (2002) para realizar a ligação entre as peças de madeira ou dos derivados de madeira, podem ser utilizados vários tipos de ligação. Que são divididas em dois grandes grupos: uniões mecânicas e uniões adesivas. As uniões adesivas podem ser consideradas como "uniões rígidas", ou seja, não proporcionam deslizamentos significantes entre as parte unidas. Já as uniões mecânicas são naturalmente deformáveis.

Em um estudo que avaliou o desempenho estrutural de vigas I submetidas à flexão, contemplando o tipo de ligação entre a mesa e a alma: pregada, colada e pregada e colada. Chegou à conclusão que o comportamento estrutural é diferenciado quando a união da alma e das mesas é realizada com adesivo ou não,

verificou se que as vigas “pregadas” têm capacidade inferior que as “coladas e pregas” e as “coladas”. A utilização do adesivo na confecção dessas vigas faz com que a alma e as mesas trabalhem como se fossem uma única peça (LIMA, 2005).

Devido a esses fatores as ligações adesivas são amplamente utilizadas nas vigas pré-fabricadas de madeira, com seção “I”, dentro dessas ligações existem ainda várias geometrias para a ligação alma/mesa, como mostra a Figura 5.



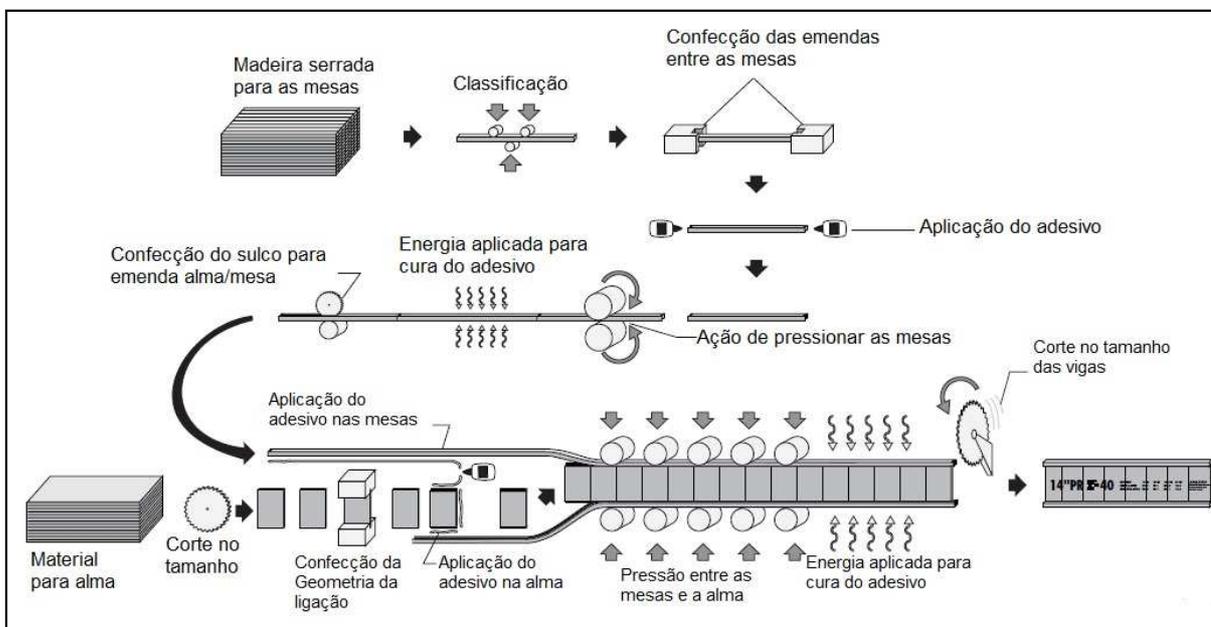
**Figura 5 - Tipos de emendas usadas em vigas "I"**  
**Fonte: LEICHTI; FALK; LAUFENBERG (1990).**

As geometrias da ligação alma/mesa e a ligação alma/alma são designadas por cada fabricante, com a intenção de providenciar uma pressão de fixação adequada para a cura do adesivo. Os adesivos usados devem ser de uso externo e tem que atender os requisitos da norma ASTM D 2559 (YEH, 2003).

As emendas no sentido do comprimento da mesa e alma são os principais desafios para a produção das vigas “I” de madeira e uma série de estudos têm sido desenvolvidos a fim de melhorar a geometria, em função da resistência e facilidade de produção (RIBEIRO, 2012). Ainda segundo o autor, que realizou um estudo que comparou quatro diferentes tipos de geometria, sendo elas a retangular, em cunha, com dois sulcos e com dois sulcos ligeiramente inclinados. A geometria que apresentou o melhor resultado foi a em forma de cunha, pois apresentou resultado satisfatório com ruptura acontecendo por cisalhamento na alma, e proporcionou maior praticidade de montagem, facilitando a sua produção.

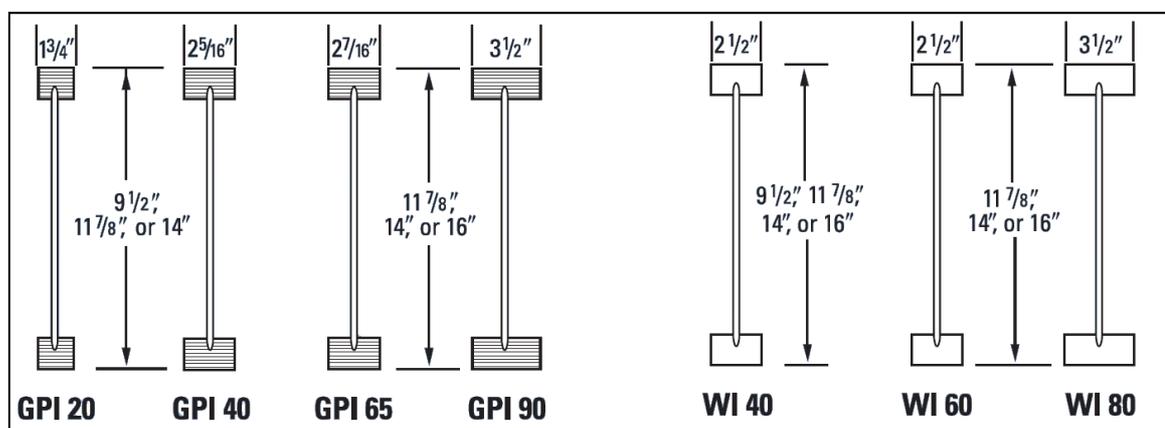
A fabricação das vigas “I” muda de um fabricante para outro, eles podem utilizar diferentes geometrias para ligação, materiais, dimensões e processos. No entanto, em um típico processo de fabricação de vigas de madeira “I”, uma ranhura em forma de cunha é o primeiro processo que a mesa sofre. Então na parte superior

e na parte inferior da alma são encaixadas as mesas e unidas com um adesivo (YEH, 2003). A Figura 6 representa um processo de fabricação de vigas “I”.



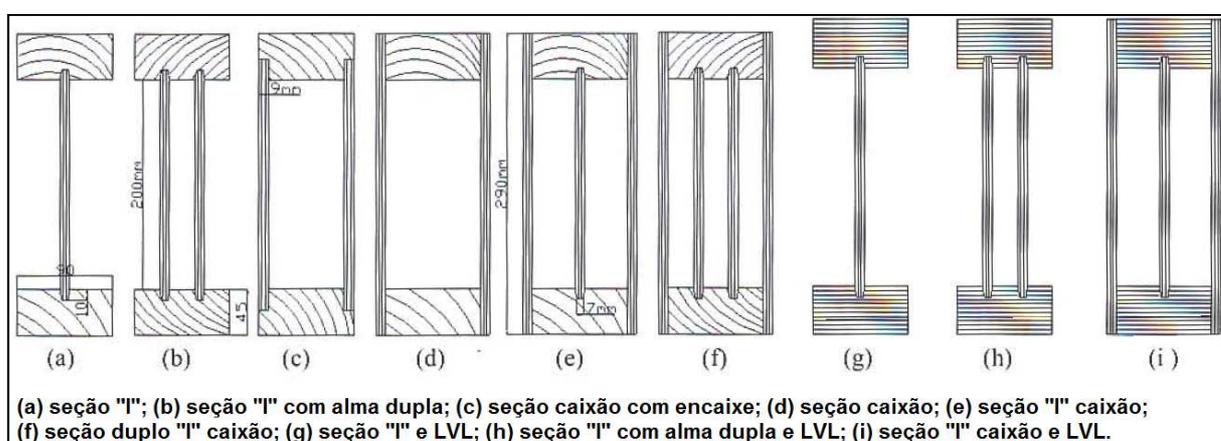
**Figura 6 - Processo de fabricação de vigas “I”**  
**Fonte: AMERICAN WOOD COUNCIL (2006).**

Um dos pontos que podem ser ressaltados no processo de fabricação das vigas “I” de madeira são as seções transversais, que são confeccionadas com várias dimensões. A empresa americana Georgia-Pacific traz em seu catálogo várias dimensões de vigas, como mostra a Figura 7.



**Figura 7 - Dimensões das seções transversais**  
**Fonte: GEORGIA-PACIFIC (2012).**

Para Jahromi et al. (2006) que compararam o desempenho estrutural de nove diferentes vigas de madeira compostas, incluindo as vigas de madeira "I". Foram produzidas com almas de 9 mm de madeira compensada e com mesas de madeira sólida e em LVL. Essas Vigas tinham seção "I" ou retangular com altura de 290 mm e uma largura de 88 mm ou 106 mm, sendo o número de almas e o método de ligação as principais diferenças entre os perfis. A figura 8 apresenta as seções estudadas.



**Figura 8 - Seções transversais das vigas compostas**  
 Fonte: JAHROMI ET AL. (2006).

O estudo mostra que furos atravessando a alma das vigas tem grande efeito para a redução da capacidade de carga máxima das vigas, enquanto que a deflexão devido à carga aplicada tem menor expressão. A Tabela 1 mostra a capacidade de carga média e a tensão de tração ( $\sigma_{t,m\acute{a}x}$ ) e cisalhamento ( $T_{s, Max}$ ) por carregamento unitário (JAHROMI ET AL, 2006).

**Tabela 1 - Capacidade de carga média e tensões de tração e cisalhamento por carregamento unitário**

(continua)

Seção Transversal	Carga Máxima (KN)	$\sigma_{t,m\acute{a}x}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$T_{s, Max}$ (N/mm <sup>2</sup> )
"I"	25,91	0,13	0,47
"I" com alma dupla	49,35	0,05	0,29

**Tabela 1 - Capacidade de carga média e tensões de tração e cisalhamento por carregamento unitário**

<b>(conclusão)</b>			
Seção Transversal	Carga Máxima (KN)	$\sigma_{t,máx}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Ts, Max (N/mm <sup>2</sup> )
Caixão com encaixe	27,57	0,13	0,16
Caixão	31,86	0,15	0,34
"I" caixão	53,61	0,27	0,52
Duplo "I" caixão	74,84	0,10	0,21
"I" e LVL	26,44	0,11	0,40
"I" com alma dupla e LVL	45,80	0,07	0,18
"I" caixão e LVL	62,23	0,31	0,48

Fonte: JAHROMI ET AL. (2006).

O uso de várias almas melhora o desempenho estrutural das vigas, pois a viga de seção "I" com alma dupla e a viga de seção "I" caixão com abertura de 152 mm na alma apresentaram capacidade de carga de 52% e 101% respectivamente, maiores que a viga de seção "I" comum sem aberturas. A baixa capacidade de carga da viga de seção caixão com encaixe quando submetido à compressão destaca a importância de ligação alma/mesa (JAHROMI ET AL, 2006).

A primeira norma reconhecida internacionalmente para as vigas de madeira "I" é a ASTM D5055, que veio para estabelecer e monitorar a capacidade estrutural de vigas pré-fabricadas de madeira "I". Essa norma fornece diretrizes para avaliação das propriedades mecânicas, propriedades físicas e qualidade da madeira. Porém, não especifica os níveis de desempenho, assim cada fabricante tem seus próprios padrões que regem a prática de produção diária de seus produtos. As dimensões e as propriedades de projeto são ditadas pelo mercado e os principais fabricantes de vigas "I" têm produtos semelhantes para oferecer (WILLIAMSON, 2002).

Particularmente no teste de cisalhamento, uma grande variedade de modos de falha é observada, que geralmente não correspondem com o modo de falha de cisalhamento em outros produtos de madeira. Pode-se afirmar que muitos dos modos observados não são totalmente falhas de cisalhamento, porém a maioria dos modos tem influência na resistência ao cisalhamento, com exceção da rigidez da alma relacionada com a flambagem, eles não são geralmente separados pela

avaliação da capacidade. De modo a evitar confusão a figura 9 apresenta os principais modos de falha (ASTM, 2004).

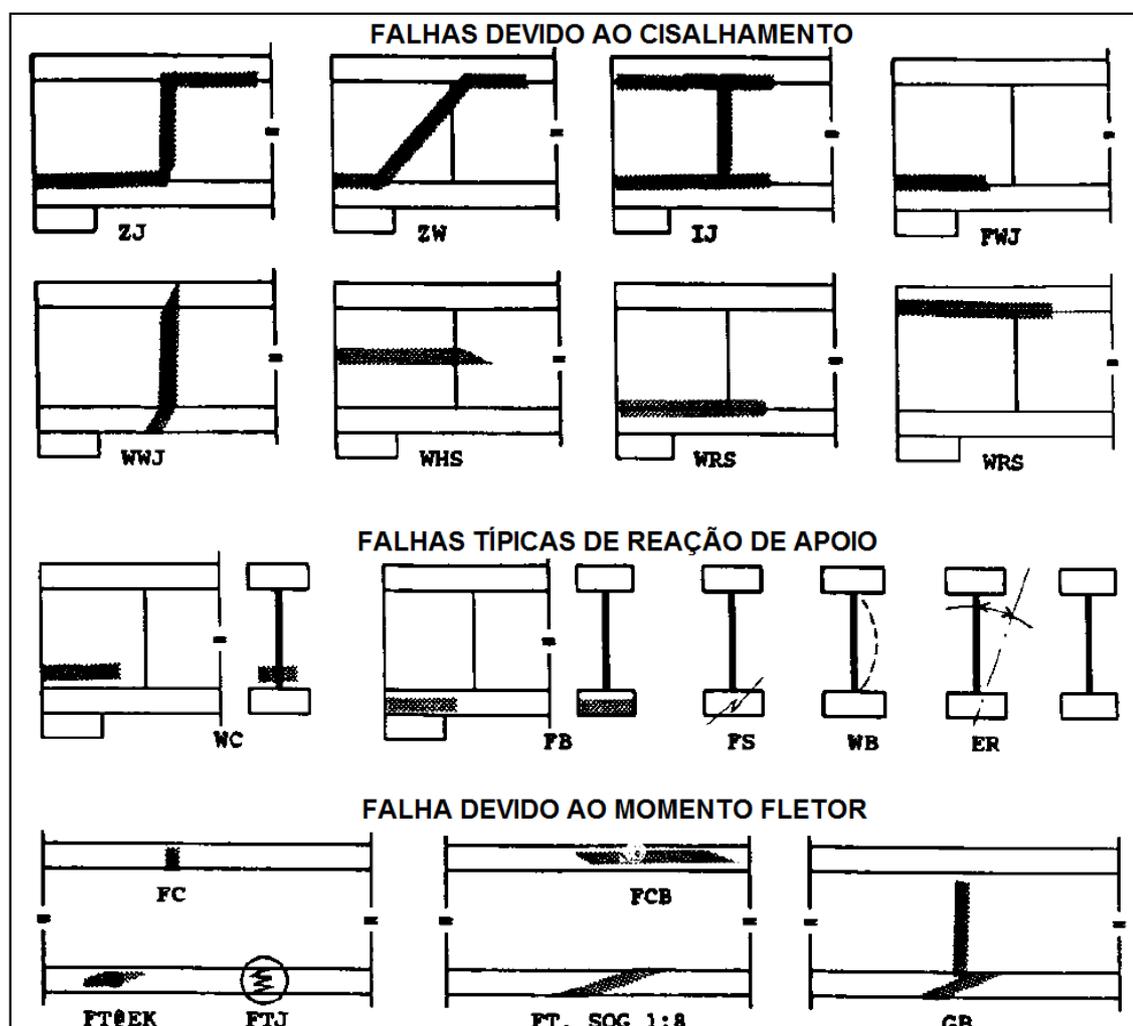


Figura 9 - Principais modos de falhas das vigas "I" em testes feitos em escala real  
Fonte: ASTM (2004).

Sendo:

ZJ: A linha de falha passa horizontalmente ao longo da parte de baixo da ligação mesa/alma no final da viga, passa verticalmente ao longo de uma emenda alma-alma, e horizontalmente ao longo da parte superior da ligação mesa-alma no centro do vão.

ZW: Parecido com ZJ exceto que a falha da alma não envolve a ligação alma-alma, usualmente a linha de ruptura acontece num ângulo perto de 45° com a vertical.

IJ: Similar às falhas do tipo Z, porém as falhas da ligação mesa-alma se estendem pros dois lados da ligação alma-alma.

FWJ: Falha na ligação mesa-alma superior ou inferior.

WWJ: Falha na ligação alma-alma.

WHS: Falha horizontal na alma (comum em almas de compensado).

WRS: Laminação ruim da alma na ligação mesa-alma (para almas de compensado).

WC: Ruptura da alma, usual nas reações de apoio sem enrijecedores.

FB: Esmagamento da mesa no apoio.

WB: Flambagem da alma na reação de apoio, geralmente sem enrijecedores.

FS: Ruptura da mesa devido à ligação na reação de apoio.

ER: Rotação na ponta causando momento na viga (necessidade de contraventamento lateral).

FT: Falha na mesa devido à tração.

FTJ: Falha de tração na emenda finger joint da mesa.

FC: Falha de compressão a flexão, comum perto dos pontos de aplicação da carga.

FCB: Falha na mesa devido à flambagem.

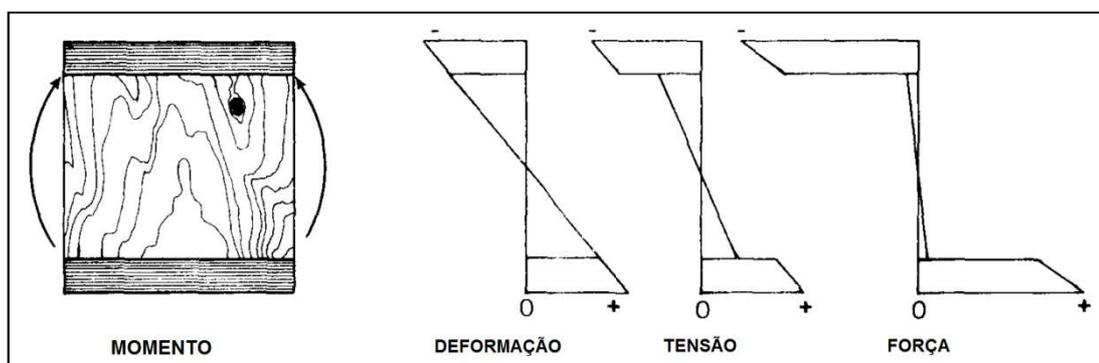
SOG: Falhas devido à inclinação das fibras nas mesas. Ou local, como perto de nós em geral.

GB: Colagem adequada.

Devido à necessidade de se estabelecer um padrão para o desempenho de vigas “I”, a APA, Associação da Madeira Engenheirada, em conjunto com vários fabricantes, elaborou um guia denominado Performance Rated I-Joists (PRI), ou vigas de madeira “I” com desempenho controlado. Para se enquadrar nessa categoria o fabricante precisa estar comprometida com os rigorosos padrões de qualidade da APA, para garantir um desempenho consistente e confiável. A partir dessa normalização engenheiros podem selecionar e usar várias vigas “I” de vários fabricantes, usando apenas um conjunto de informações para projetar (ENGINEERED WOOD CONSTRUCTION, 2012).

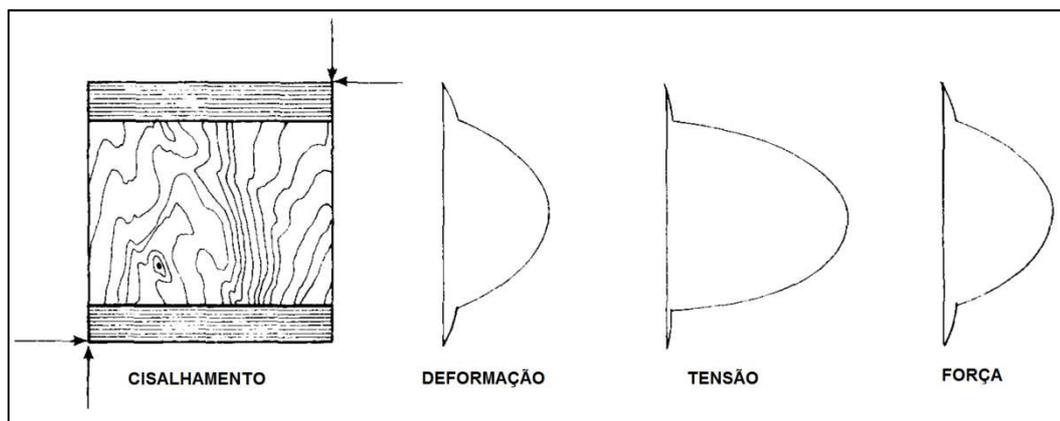
#### 4.4 HIPÓTESES DE CÁLCULO

Em geral, as mesas são concebidas para proporcionar toda a resistência devido ao momento, onde o tamanho da seção transversal é determinado usando a teoria de flexão simples. A alma é responsável pela capacidade de carga referente ao cisalhamento, sendo essa capacidade mais frequentemente determinada empiricamente. Outros critérios a serem observados é a deflexão devido ao momento e a força cortante, capacidade de suporte e estabilidade lateral. O cálculo das seções transversais feito pelo método da tensão admissível é estudado por diversos autores. As vigas encontradas no mercado são tipicamente produzidas usando adesivos rígidos para a ligação mesa/alma, dessa forma elimina-se o deslizamento pelo cisalhamento, simplificando o processo de cálculo (LEICHTI; FALK; LAUFENBERG, 1990). As Figuras 10 e 11 apresentam as tensões que atuam nas vigas “I” devido ao momento e ao cisalhamento, respectivamente.



**Figura 10 - Distribuição da deformação, tensão e força de vigas “I” submetidas a momento.**

**Fonte: LEICHTI; FALK; LAUFENBERG (1990).**



**Figura 11 - Distribuição da deformação, tensão e força de vigas “I” submetidas ao cisalhamento.**

**Fonte: LEICHTI; FALK; LAUFENBERG (1990).**

Devido ao crescimento da competitividade do mercado de vigas de madeira “I”, ocorreu a necessidade de aperfeiçoar esse produto. Na maioria das pesquisas feitas houve um foco na configuração das vigas (abertura e reforços na alma, deformação), através de abordagens empíricas. O desempenho da alma frente ao cisalhamento e a contribuição da mesma para o desempenho global da viga também foram estudados, porém de forma limitada (GRANDMONT et al. 2006).

A partir de 1979 foram feitos esforços para desenvolver modelos de simulação, Fergus (1979) apud Grandmont et al. (2006) desenvolveu um modelo baseado no método de elementos finitos, para ele se um modelo capaz de simular uma viga “I” com precisão suficiente estivesse disponível seria possível economizar tempo e dinheiro em trabalho experimental.

Um dos modelos desenvolvidos para o cálculo foi derivado de princípios básicos de mecânica, que serve para vigas com seção caixão e com seção “I”, foi apresentado pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, USDA (1999). Através das Equações 1 e 2 é possível determinar a rigidez efetiva ( $EI$ ) e as tensões de tração e compressão nas mesas ( $F_x$ ). A Figura 12 esquematiza as dimensões das vigas.

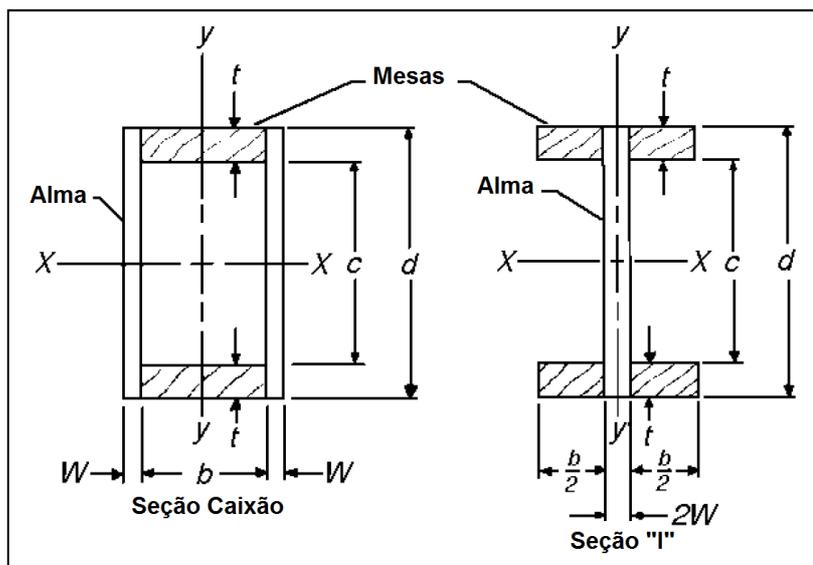


Figura 12 - Dimensões das vigas feitas com painéis estruturais  
Fonte: USDA (1999).

$$(EI)_{ef} = 1/12[E(d^3 - c^3)b + 2E_w W d^3] \quad (1)$$

$$F_x = 6M / [(d^3 - c^3)b/d + (2E_w W d^2)/e] \quad (2)$$

Onde:

$(EI)_{ef}$  = rigidez efetiva.

$E$ ,  $E_w$  = módulo de elasticidade da mesa e alma.

$d$ ,  $c$ ,  $b$  e  $W$  = são dimensões de acordo com a Figura 12.

$F_x$  = tensão nas mesas.

$M$  = momento fletor.

No Brasil GÓES (2002) desenvolveu pesquisas sobre vigas I de madeiras pregadas onde comparou diversos modelos teóricos de comportamento mecânico, concluindo que o modelo apresentado no EUROCODE 5 (1993) oferece a melhor solução. Recentemente o trabalho desenvolvido por (SEDOSKI; RIBEIRO; GÓES, 2011) comprovou a eficiência do modelo, mesmo para ligações coladas. Adaptando o modelo apresentado por GÓES (2002) para ligações coladas, adotando a hipótese que a ligação colada não apresenta deslizamento entre as peças e que as mesas apresentam propriedades mecânicas diferentes da alma, pode-se calcular a rigidez efetiva  $(EI)_{ef}$ , utilizando a Equação 3.

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

Onde:

$(EI)_{ef}$  = rigidez efetiva em kN/cm<sup>2</sup>.

$E_i$  = módulo de elasticidade de cada peça em kN/cm<sup>2</sup>.

$I_i$  = momento de inércia de cada peça em cm<sup>4</sup>.

$A_i$  = área de cada peça em cm<sup>2</sup>.

$a_i$  = distância entre o centro de gravidade das peças em cm.

A Figura 13 apresenta as seções transversais e a distribuição das tensões segundo o EUROCODE 5, também identifica os elementos a serem considerados pela Equação 3.

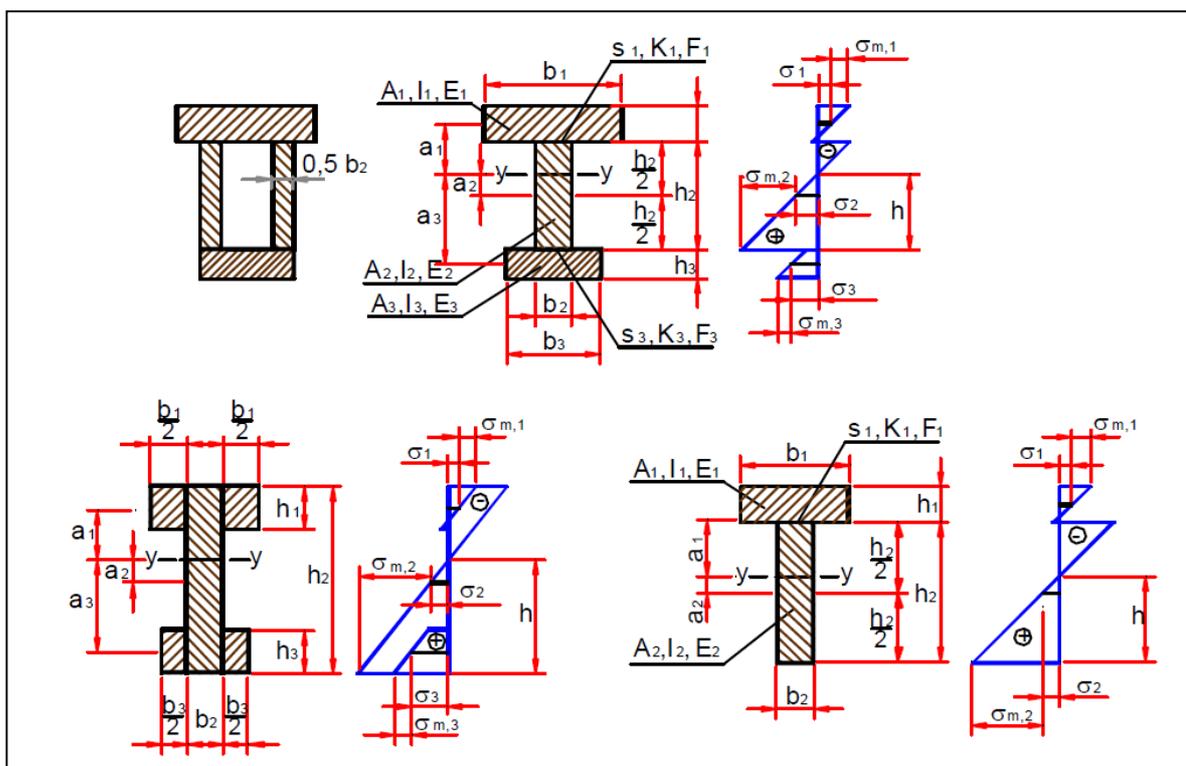


Figura 13 - Seções transversais e distribuição de tensões do EUROCODE 5  
Fonte: GÓES (2002).

Para as vigas com seções transversais semelhantes as da Figura 13, as tensões normais e cisalhantes atuantes nas peças podem ser calculadas segundo as Equações 4 e 5 respectivamente:

$$\sigma_{(m,i)} = 0,5E_i h_i M / (EI)_{ef} \quad (4)$$

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

Onde:

$\sigma_{m,i}$  = tensão normal na extremidade do elemento "i" devido ao momento.

$T_{2,Max}$  = máxima tensão cisalhante na alma.

$E_i$  = módulo de elasticidade de cada peça.

$A_i$  = área de cada peça.

$M$  = momento fletor.

$a_i$ ,  $b_i$  e  $h_i$  = segundo a Figura 13.

Como a viga é composta por diferentes materiais é necessário fazer o cálculo do centro de gravidade da peça. O método da seção transformada consiste em transformar a seção transversal de uma viga composta em uma seção transversal equivalente de uma viga imaginária (GERE, 2003). Através das Equações 6, 7 e 8 é possível obter o centro de gravidade da peça.

$$n = E_1 / E_2 \quad (6)$$

$$A_{eq} = n A_1 \quad (7)$$

$$h_1 = \frac{\sum_{i=1}^3 y_i A_{eq_i}}{\sum_{i=1}^3 A_{eq_i}} \quad (8)$$

Onde:

$n$  = razão modular.

$E_1$  = módulo de elasticidade do material 1.

$E_2$  = módulo de elasticidade do material 2.

$A_{eq}$  = área equivalente.

$A_1$  = área da seção da peça 1.

$h_1$  = centro de gravidade da viga.

$y_i$  = centro de gravidade de cada peça.

$A_{eqi}$  = área equivalente de cada peça.

## 5 METODOLOGIA

Para avaliar o desempenho estrutural das vigas “I” (I-Joists) foi elaborado um modelo teórico e experimental. Após a produção de vigas em escala real, foram realizados testes laboratoriais. A fim de verificar a viabilidade do reaproveitamento de madeira beneficiada foi avaliado a rigidez efetiva e o módulo de ruptura (MOR).

O procedimento foi realizado no Laboratório de Sistemas Estruturais da (UTFPR) Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Campo Mourão.

### 5.1 MATERIAIS

A madeira utilizada para a confecção das mesas são marcos de madeira conhecida como Cedrinho e que não atenderam as especificações e foram descartados por uma empresa da cidade de Corbélia. O material foi escolhido devido a grande quantidade que se acumula no pátio da empresa, pois não existem opções de reaproveitamento para agregar algum valor a um material que ainda possui boas propriedades mecânicas. As peças tem o comprimento em torno de 220 cm e a seção transversal está esquematizada na Figura 14.

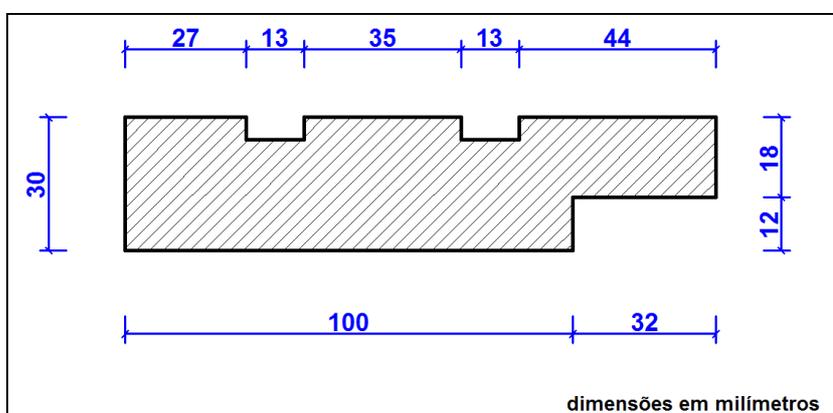


Figura 14 - Seção transversal do marco

Para a alma, foi utilizado painel de OSB estrutural do fabricante LP da cidade de Ponta Grossa – Paraná, com dimensões 1220 mm x 2440 mm x 9,5 mm, fornecido pela UTFPR campus Campo Mourão.

O adesivo utilizado para realizar a união entre as peças será o fenol-resorcinol-formaldeído (PRF), sendo seu nome comercial CASCOPHEN – RS 216M, produzido pela Hexion Specialty Chemicals, é usada com o preparado Endurecedor FM-60-m (em pó) na proporção por peso de 20%. Ribeiro (2012) estudou diferentes adesivos e a CASCOPHEN garantiu facilidade de confecção, alto desempenho e confiabilidade da ligação, justificando a escolha desse adesivo.

## 5.2 MÉTODOS

A primeira etapa após o recebimento do material para as mesas é a classificação visual dos marcos. Em seguida, foi feita a caracterização dos marcos através dos ensaios de compressão paralela às fibras, umidade e densidade.

A NBR 7190 (1997) especifica a forma adequada para a realização do ensaio de compressão paralela às fibras. O ensaio foi realizado para determinar a resistência e a rigidez à compressão paralela às fibras de madeira.

Para uma investigação adequada foi feita uma amostragem, por meio da retirada de no mínimo 6 corpos de prova de cada peça utilizada para a fabricação das mesas.

Como as peças são delgadas a NBR 7190 permite empregar corpos de prova com seção transversal quadrada, com lado igual à espessura do elemento delgado, com pelo menos 1,8 cm. O comprimento deve ser igual a três vezes o lado da seção transversal. A Figura 15 mostra os corpos de prova que têm as dimensões de 25x25x75 mm.



**Figura 15 - Corpos de prova para ensaio de compressão paralela às fibras**

As medidas dos corpos de prova foram feitas com exatidão de 0,1 mm. Para a determinação do módulo de elasticidade foi realizada medidas de deformações em duas faces opostas do corpo de prova, com o auxílio de extensômetros com exatidão mínima de 50  $\mu\text{m/m}$ . O ensaio foi realizado na máquina universal de ensaio DL-30000 da Emic, para dar um melhor ajuste do corpo de prova na máquina de ensaio foi utilizada uma rótula entre o atuador e o corpo de prova. Para determinar a resistência um carregamento monotônico crescente, com uma taxa em torno de 10 MPa/min foi aplicado (NBR 7190,1997).

Para realizar o ensaio é preciso estimar a resistência da madeira através do ensaio destrutivo de um corpo-de-prova selecionado da mesma amostra. Conhecida a resistência estimada, foi aplicado o carregamento em dois ciclos de carga e descarga, de acordo com o procedimento especificado no diagrama de carregamento da Figura 17. As deformações são registradas para cada ponto do diagrama até 70% da carga estimada. Em seguida retira-se a instrumentação e eleva o carregamento até a ruptura do corpo de prova (NBR 7190,1997). A Figura 16 mostra o arranjo para ensaio de compressão paralela às fibras.



Figura 16 - Arranjo para o ensaio de compressão paralela às fibras

Os valores característicos para resistência e em valor médio para o módulo de elasticidade devem ser acompanhados do respectivo teor de umidade.

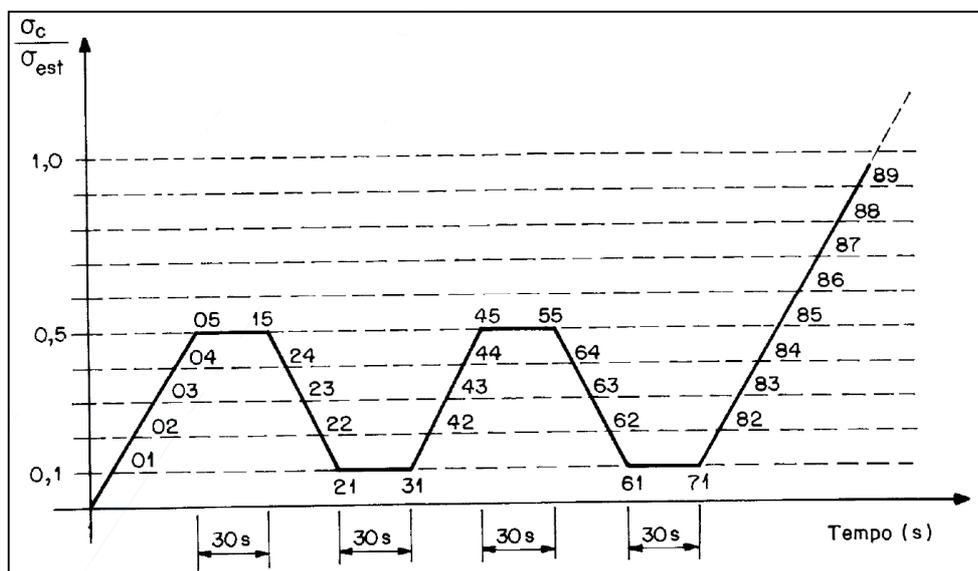


Figura 17 - Diagrama de carregamento para determinação da rigidez da madeira à compressão

Fonte: NBR 7190 (1997).

Para verificar o teor de umidade foram utilizados os mesmos corpos de prova do ensaio de compressão paralela às fibras.

O procedimento de ensaio começa pela determinação da massa inicial do corpo de prova com exatidão de 0,01 g. Após a determinação da massa inicial e do ensaio de compressão paralela às fibras, foram colocados os corpos de prova na câmara de secagem, com temperatura máxima de 103° C. Durante a secagem a massa foi medida a cada 6h, até a obtenção da massa seca. Conhecida a massa seca e a massa inicial a umidade pode ser definida através da Equação 9.

$$U(\%) = [(m_i - m_s) / m_s] 100 \quad (9)$$

Onde:

$m_i$  = é a massa inicial da madeira, em gramas.

$m_s$  = é a massa da madeira seca, em gramas.

A densidade da madeira foi obtida utilizando os mesmos corpos de prova do ensaio de umidade e compressão paralela às fibras. Na determinação da densidade aparente, a massa e o volume dos corpos de prova foram medidos e através da Equação 10 determina-se a densidade. Com a densidade e umidade foi então utilizado o Diagrama de Kolmann para a determinação da densidade a 12%.

$$\rho = m/V \quad (10)$$

Onde:

$m$  = é a massa da madeira, em kg.

$V$  = é o volume da madeira, em  $m^3$ .

$\rho$  = é a densidade da madeira, em  $kg/m^3$

### 5.3 MONTAGEM DAS VIGAS EM "I"

Após a caracterização da madeira de reaproveitamento, essas passaram por três processos: 1) foram cortadas com o auxílio da serra circular; 2) rebeneficiadas através da desengrossadeira e da plaina até chegar às dimensões corretas; 3)

Preparadas com o sulco para compor as mesas da viga através da topia. A Figura 18 mostra o processo de confecção das mesas.



**Figura 18 - Processo de confecção das mesas**

Para obter o valor do módulo de elasticidade relativo à flexão das mesas, foi realizado o ensaio não destrutivo das mesas. A Figura 19 apresenta o arranjo para realização do ensaio.



**Figura 19 - Arranjo para o ensaio do módulo de elasticidade das mesas**

O ensaio foi realizado no pórtico de reação, a NBR 7190 (1997) indica uma taxa de 10 MPa/min para os ensaios de flexão. As deflexões foram medidas com o auxílio de um relógio comparador. Através dos dados obtidos com a realização do ensaio o módulo de elasticidade foi calculado através da Equação 11.

$$E_M = [(23PL^3)/(1296 I \delta)] \quad (11)$$

Onde:

$E_M$  = módulo de elasticidade à flexão, em MPa.

$P$  = força, em N.

$L$  = distância entre os apoios, em mm.

$I$  = momento de inércia, em  $\text{mm}^4$ .

$\delta$  = deformação medida, mm.

Após o ensaio das mesas, a placa de OSB passou por corte para chegar ao tamanho adequado da alma. Como o fabricante apresenta as propriedades do material, não será necessário fazer ensaio nessas peças. Com o auxílio da topia foi feito um pequeno rebaixo na alma para facilitar o encaixe com as mesas. A Figura 20 mostra o processo de confecção das almas.



Figura 20 - Processo de confecção das almas

Em seguida passa-se ao processo de colagem, iniciando pela aplicação do adesivo com o auxílio de um pincel, controlando visualmente para ter uma aplicação homogênea. Por fim a união entre as peças com a prensagem da viga. Através de barras roscadas foi possível fazer o aperto, com o auxílio de um torquímetro. Foi aplicado um torque de 4 N.m para uma prensagem igual em todos os pontos. A Figura 21 mostra o a colagem das vigas.



**Figura 21 - Colagem das vigas**

As dimensões para a viga “I” foram estabelecidas para um melhor aproveitamento das peças de reaproveitamento. A partir dessa seção foram produzidas 5 vigas, sendo essas avaliadas, a fim de fornecer informações sobre a forma de ruptura e a rigidez da peça composta. A Figura 22 apresenta as dimensões dessa viga.

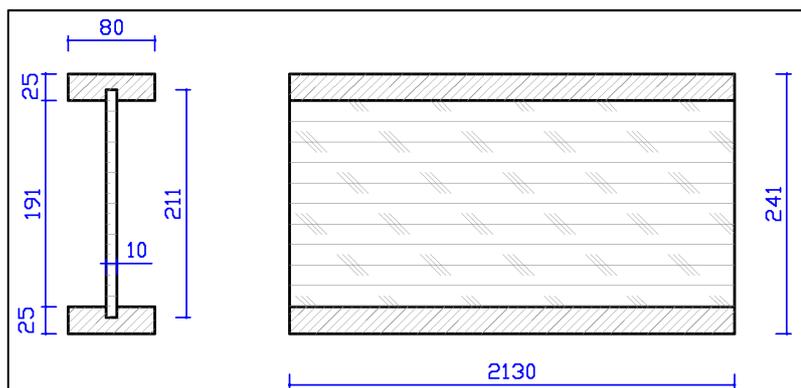


Figura 22 - Dimensões da viga de madeira “I”

#### 5.4 AVALIAÇÃO TEÓRICA DAS VIGAS “I”

A avaliação teórica das vigas “I” foi realizada de acordo com o modelo adaptado de GÓES (2002) para ligações coladas, apresentado na revisão bibliográfica. Sendo utilizadas as equações 3, 4 e 5 para determinar a rigidez efetiva e prever a carga de ruptura das vigas.

#### 5.5 ENSAIO DAS VIGAS

No ensaio das vigas, deve-se obter o valor da rigidez efetiva relativo à flexão e o módulo de ruptura da peça. O ensaio foi realizado no pórtico de reação, que é composto de uma estrutura metálica combinada com um pistão hidráulico acoplado em uma célula de carga com capacidade de 100KN. De modo a evitar uma possível instabilidade lateral durante o ensaio, a viga será contraventada.

A ASTM D198 (2002) indica que o tempo deve ser aproximadamente de 10 minutos, sendo que a carga máxima não deve ser alcançada em menos de 6 minutos e nem mais de 20 minutos. Sendo assim foi ensaiada uma peça como teste para ter uma ideia da taxa para o ensaio, já que a aplicação da carga é controlada manualmente. As deflexões foram medidas com o auxílio de um relógio comparador, através dos dados obtidos com a realização do ensaio a rigidez efetiva foi calculada através da equação 12. A Figura 23 apresenta o arranjo para realização do ensaio.



**Figura 23 - Arranjo para ensaio das vigas**

Para evitar a flambagem da alma após a determinação rigidez efetiva foram colocados enrijecedores nos pontos de aplicação da carga e nos apoios. Finalizando o experimento o carregamento foi aplicado até a ruptura da viga para verificar a carga que ela suporta. A Figura 24 mostra a viga após a colocação dos enrijecedores.



**Figura 24 - Vigas com os enrijecedores**

Para finalizar o estudo serão comparados os resultados obtidos através da análise teórica e experimental, para verificar o comportamento da viga quanto aos esforços solicitantes.

## 6 RESULTADO E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos experimentos realizados nessa pesquisa. Para facilitar a comparação os resultados são apresentados em tabelas. Os experimentos foram conduzidos conforme as especificações apresentadas no capítulo 5.

### 6.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS MESAS

#### 6.1.1 Compressão paralela às fibras

Através da aquisição de dados pelo computador, os resultados desse ensaio são apresentados na Tabela 2, para o módulo de ruptura e o módulo de elasticidade das mesas. Os laudos dos ensaios encontram-se na seção dos apêndices.

**Tabela 2 - Valores médios para força máxima, resistência e módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras de cada uma das mesas empregadas nos estudos.**

(continua)

Material	Nº de CP's	$f_{c0,m}$ (MPa)	Desvio Padrão	Coef. Var. (%)	$E_{c0,m}$ (MPa)	Desvio Padrão	Coef. Var. (%)
Mesa 1	8	27,59	1,02	3,70	10110	3196	31,62
Mesa 2	7	31,52	1,12	3,54	7774	1028	13,23
Mesa 3	7	24,83	1,51	6,06	6154	702	11,41
Mesa 4	6	31,53	2,60	8,25	6666	1592	23,89
Mesa 5	7	38,54	1,44	3,74	10750	933	8,68
Mesa 6	6	32,03	1,93	6,04	7617	1295	17,01
Mesa 7	7	22,45	1,74	7,75	4523	1033	22,83
Mesa 8	7	32,95	1,17	3,55	8487	462	5,45

**Tabela 2 - Valores médios para força máxima, módulo de ruptura e módulo de elasticidade das mesas**

(conclusão)

Material	Nº de CP's	$f_{c0,m}$ (MPa)	Desvio Padrão	Coef. Var. (%)	$E_{c0,m}$ (MPa)	Desvio Padrão	Coef. Var. (%)
Mesa 9	7	30,63	2,71	8,85	11090	2570	23,16
Mesa 10	7	31,76	1,59	4,99	8682	1296	14,92
<b>Média</b>		30,38			8185		
<b>Desv. Padrão</b>		4,50			2092		
<b>Coef. Var.</b>		14,80%			25,56%		

Nota-se uma grande a variabilidade que as amostras da mesma peça apresentaram, principalmente quanto ao módulo de elasticidade. Devido a esse fator é imprescindível o ensaio não destrutivo de flexão em cada mesa, para a determinação da rigidez.

### 6.1.2 Densidade aparente

A Tabela 3 apresenta os resultados do ensaio de densidade aparente do material para a fabricação das mesas. O resultado completo encontra-se na seção dos apêndices.

**Tabela 3 - Valores médios de densidade aparente das mesas.**

(continua)

Material	Nº de CP's	Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )	Desvio Padrão	Coef. Var. (%)	Densidade Aparente a 12% (Kg/m <sup>3</sup> )
Mesa 1	8	560,87	9,57	1,71	530
Mesa 2	7	545,18	12,58	2,31	520
Mesa 3	7	529,07	13,30	2,51	515
Mesa 4	6	619,90	13,67	2,20	595

Tabela 3 – Valores médios de densidade aparente das mesas.

(conclusão)

Material	Nº de CP's	Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )	Desvio Padrão	Coef. Var. (%)	Densidade Aparente a 12% (Kg/m <sup>3</sup> )
Mesa 5	7	621,65	9,60	1,54	600
Mesa 6	6	570,13	30,27	5,31	545
Mesa 7	7	515,61	12,57	2,44	490
Mesa 8	7	580,74	18,56	3,20	560
Mesa 9	7	591,82	8,90	1,50	575
Mesa 10	7	547,04	12,24	2,24	530
<b>Média</b>		568,20			546
<b>Desv. Padrão</b>		35,86			34,12
<b>Coef. Var.</b>		6,31			6,25

No ensaio de densidade aparente as amostras não apresentaram grande variabilidade.

### 6.1.3 Umidade

Para a caracterização do material das mesas são apresentados os dados de umidade na Tabela 4. O resultado completo encontra-se na seção dos apêndices.

Tabela 4 - Valores médios de umidade das mesas.

(continua)

Material	Nº de CP's	Umidade (%)	Desvio Padrão (%)	Coef. Var. (%)
Mesa 1	8	19,04	0,23	1,20
Mesa 2	7	20,38	0,25	1,22
Mesa 3	7	18,75	1,30	6,94

Tabela 4 – Valores médios de umidade das mesas

(conclusão)

Material	Nº de CP's	Umidade (%)	Desvio Padrão (%)	Coef. Var. (%)
Mesa 4	6	20,84	0,45	2,16
Mesa 5	7	19,83	0,31	1,56
Mesa 6	6	20,72	0,70	3,36
Mesa 7	7	18,86	0,20	1,06
Mesa 8	7	22,40	0,53	2,38
Mesa 9	7	19,66	0,34	1,72
Mesa 10	7	18,48	0,36	1,95
<b>Média</b>		19,90		
<b>Desv. Padrão</b>		1,21		
<b>Coef. Var.</b>		6,10		

## 6.1.4 Flexão estática

Finalizando a caracterização do material das mesas são apresentados os valores para o módulo de elasticidade ( $E_M$ ) para as mesas através da Tabela 5.

Tabela 5 - Valores do módulo de elasticidade das mesas.

(continua)

Material	$E_M$ (MPa)
Mesa 1	8902
Mesa 2	9377
Mesa 3	6237
Mesa 4	6991
Mesa 5	8879
Mesa 6	8314
Mesa 7	6507

Tabela 5 - Valores do módulo de elasticidade das mesas.

(conclusão)

<b>Material</b>	<b><math>E_M</math> (MPa)</b>
Mesa 8	8502
Mesa 9	12194
Mesa 10	8392
<b>Média</b>	8429
<b>Desv. Padrão</b>	1702
<b>Coef. Var.</b>	20,20%

Com todos os ensaios realizados e comparando os resultados com a tabela E.1 – Valores médio de madeiras dicotiledôneas nativas e de florestamento da NBR 7190 (1997) a madeira Cedro doce (*Cedrella spp*) possui valores muito próximos dos encontrados nos ensaios, sendo resistência de compressão paralela às fibras  $f_{c0}=31,5$  MPa, módulo de elasticidade do ensaio de compressão paralela às fibras  $E_{c0}=8\ 058$  MPa e densidade aparente a 12% de umidade  $\rho_{ap(12\%)}=500$  kg/m<sup>3</sup>.

## 6.2 CARACTERÍSTICAS DO OSB

As características do OSB foram retiradas do trabalho que determinou as propriedades mecânicas das chapas produzidas no Brasil, com ensaios de flexão vertical. Segundo Dias, (2004) o módulo de elasticidade à flexão vertical médio foi de 4470,9 MPa e resistência média foi de 74,8 MPa.

## 6.3 ANÁLISE DAS VIGAS

Neste item são apresentadas as avaliações teóricas e experimentais do comportamento estrutural das vigas. Os parâmetros a serem comparados são os de

rigidez efetiva e de ruptura. A Tabela 6 apresenta um comparativo entre a rigidez teórica e a experimental.

**Tabela 6 - Tabela comparativa entre os valores de rigidez efetiva teórica e experimental das vigas de madeira "I".**

<b>Material</b>	<b>Mesa Superior</b>	<b>Mesa Inferior</b>	<b><math>EI_{(ef)t}</math> (N.mm<sup>2</sup>) *</b>	<b><math>EI_{(ef)e}</math> (N.mm<sup>2</sup>) **</b>	<b>Diferença (%) ***</b>
Viga 1	6	8	$4,17 \times 10^{11}$	$3,22 \times 10^{11}$	22,79
Viga 2	2	9	$5,08 \times 10^{11}$	$3,50 \times 10^{11}$	31,03
Viga 3	7	4	$3,46 \times 10^{11}$	$2,50 \times 10^{11}$	27,49
Viga 4	5	1	$4,38 \times 10^{11}$	$3,32 \times 10^{11}$	24,23
Viga 5	3	10	$3,65 \times 10^{11}$	$2,95 \times 10^{11}$	19,07

\*  $EI_{(ef)t}$  – Rigidez efetiva teórica.

\*\*  $EI_{(ef)e}$  – Rigidez efetiva experimental.

\*\*\* Diferença entre os valores teóricos e experimentais.

Quanto ao critério de rigidez as vigas apresentaram uma diferença considerável variando de 19% a 31%, porém isso se deve a deformação por cisalhamento que não foi considerada no método de cálculo. Segundo o American Wood Council (1999) as vigas de madeira I, devido ao material otimizado da alma, são suscetíveis aos efeitos de deformação por cisalhamento. A deflexão por cisalhamento pode ser responsável por 15% até 30% do total da deflexão.

No critério de ruptura as vigas apresentaram resistências satisfatórias. A Tabela 7 apresenta um comparativo entre a força de ruptura teórica e a experimental.

**Tabela 7 - Tabela comparativa entre os valores de força de ruptura teórica e experimental das vigas de madeira "I".**

(continua)

<b>Material</b>	<b>Mesa Superior</b>	<b>Mesa Inferior</b>	<b><math>F_{rt}</math> (N) *</b>	<b><math>F_{re}</math> (N) **</b>	<b>Diferença (%) ***</b>	<b>Tipo de Ruptura</b>
Viga 1	6	8	32120	27100	15,63	Cisalhamento na alma
Viga 2	2	9	34280	28400	17,16	Flambagem da mesa

**Tabela 7 - Tabela comparativa entre os valores de força de ruptura teórica e experimental das vigas de madeira "I".**

(conclusão)

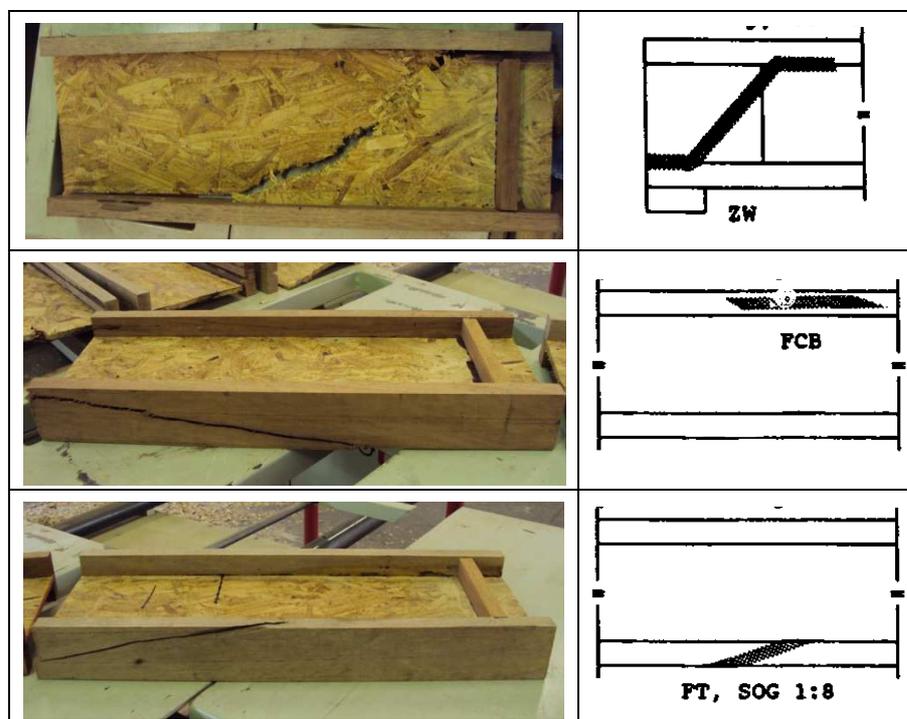
Material	Mesa Superior	Mesa Inferior	$F_{rt}$ (N) *	$F_{re}$ (N) **	Diferença (%) ***	Tipo de Ruptura
Viga 3	7	4	32320	21400	33,78	Tração na mesa
Viga 4	5	1	32220	32570	-1,10	Cisalhamento na alma
Viga 5	3	10	36240	27690	23,59	Cisalhamento na alma

\*  $F_{rt}$  – Força de ruptura teórica.

\*\*  $F_{re}$  – Força de ruptura experimental.

\*\*\* Diferença entre os valores teóricos e experimentais.

O modo de ruptura também foi observado e comparado com os modos de ruptura apresentados na Figura 9, sendo que 3 vigas apresentaram rupturas por cisalhamento, 1 por flambagem na mesa e 1 por tração na mesa influenciado pela inclinação das fibras. O Quadro 2 apresenta o comparativo das falhas.



**Quadro 2 - Comparativo das falhas observadas com as da Figura 9.**

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através dos ensaios realizados foi possível verificar as propriedades do material a ser reutilizado, e também a rigidez e a resistência das vigas.

O material que não atendeu as especificações para utilização como esquadria, apresentou propriedades mecânicas satisfatórias apesar da variabilidade entre as peças.

A resina CASCOPHEN apresentou as propriedades esperadas, a trabalhabilidade facilitou no processo de colagem, e também se verificou a eficiência da ligação mesa e alma, ou seja, não houve descolamento entre as peças.

Sendo o OSB um produto industrializado, com propriedades estruturais de pouca variabilidade, foi possível realizar uma estimativa para o cálculo da rigidez e resistências das vigas. A capacidade apresentou correspondência com o valor teórico, sendo a diferença de até 33,78%, o que pode explicar essa diferença é a possibilidade de instabilidades devido à esbeltez das peças que compõe as vigas. Para tal previsão devem ser estudados métodos que levem em consideração essas variáveis. Os enrijecedores e os contraventamentos ajudaram a diminuir esses fatores, e nos casos onde não ocorreu nenhum tipo de instabilidade a viga atingiu a resistência estimada.

Com relação à rigidez efetiva foram verificadas diferenças entre 19% a 31%. Considerando a indicação do American Wood Council (1999) onde o efeito de cisalhamento é responsável por até 30% da deformação por cisalhamento deve-se estudar outro modelo de cálculo que contemple as deformações devido ao cisalhamento na alma. Os autores sugerem também que seja realizada uma análise numérica por meio de elementos finitos.

As rupturas das vigas de madeira apresentaram modos de falhas típicos estabelecidos em normas, reforçando a confiabilidade das vigas produzidas com o material de reaproveitamento.

Conclui-se que o reaproveitamento de madeira de batente para uso como mesa de vigas I é viável do ponto de vista de comportamento estrutural.

## REFERÊNCIAS

ABIMCI, Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente. **Estudo Setorial 2009 Base 2008**. Curitiba. 2009. Disponível em: <[http://www.abimci.com.br/index.php?option=com\\_docman&task=doc\\_download&gid=206&Itemid=37](http://www.abimci.com.br/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=206&Itemid=37)>. Acesso em: 26 Abr. 2012.

ABIMCI, Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente. **Evolução dos Produtos Engenheirados**. Artigo Técnico n. 9. Ago. 2003. Disponível em: <[http://www.abimci.com.br/index.php?option=com\\_docman&task=doc\\_download&gid=14&Itemid=37](http://www.abimci.com.br/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=14&Itemid=37)>. Acesso em: 10 Mai. 2012.

AMERICAN WOOD COUNCIL. **Engineered wood products primer awareness guide**. Washington: American Forest & Paper Association, 2006a. 5 p. Disponível em: <<http://www.woodaware.info/PDFs/EWPPrimer.pdf>>. Acesso em: 30 Abr. 2012.

AMERICAN WOOD COUNCIL. **Guideline Wood I-Joists: manual for engineered wood construction**. American Forest & Paper Association, 1999. 36 p. Disponível em: <[http://i-joist.org/pdf/Asd\\_ij.pdf](http://i-joist.org/pdf/Asd_ij.pdf)>. Acesso em: 05 Mai. 2012.

AMERICAN WOOD COUNCIL. **Wood I-Joist Awareness Guide**. Washington: American Forest & Paper Association, 2006b. 6 p. Disponível em: <<http://www.woodaware.info/PDFs/I-joists.pdf>>. Acesso em: 05 Mai. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15930-1**: Portas de madeira para edificações - Parte 1: Terminologia, Simbologia. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15930-2**: Portas de madeira para edificações - Parte 2: Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro, 1997.

ASTM, American Society for Testing and Materials. **D198**: Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes. West Conshohocken, 2002.

ASTM, American Society for Testing and Materials. **D5055**: Standard Specification for Establishing and Monitoring Structural Capacities of Prefabricated Wood I-Joists. West Conshohocken, 2004.

DIAS, Gustavo L.; SANTOS, A. C. dos; LIMA, A. L.; SZÜCS, C. A. Determinação de propriedades mecânicas do OSB. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRA E

ESTRUTURA DE MADEIRA, 9., 2004, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: Editora da Universidade Federal do Mato Grosso, 2004. Disponível em: <[http://www.lpbrasil.com.br/inc/download.asp?caminho=ensaios&arquivo=propriedades\\_osb.pdf](http://www.lpbrasil.com.br/inc/download.asp?caminho=ensaios&arquivo=propriedades_osb.pdf)>. Acesso em: 20 Mai. 2012.

ENGINEERED WOOD ASSOCIATION. **A Guide to Engineered Wood Products**. Form N° C800B. 2010. Disponível em: <[http://www.apawood.org/pdfs/download\\_pdf.cfm?PDFFilename=managed/C800.pdf](http://www.apawood.org/pdfs/download_pdf.cfm?PDFFilename=managed/C800.pdf)>. Acesso em: 05 Mai. 2012.

ENGINEERED WOOD ASSOCIATION. **Performance Rated I-Joists**. Form N° EWS Z725D. 2012. Disponível em: <[http://www.apawood.org/pdfs/download\\_pdf.cfm?PDFFilename=managed/Z725.pdf](http://www.apawood.org/pdfs/download_pdf.cfm?PDFFilename=managed/Z725.pdf)>. Acesso em: 05 Mai. 2012.

FISETTE, PAUL. **Choosing Between Oriented Strandboard and Plywood**, 2005. Disponível em: <<http://bct.eco.umass.edu/publications/by-title/choosing-between-oriented-strandboard-and-plywood/>>. Acesso em: 15 Mai. 2012.

FISETTE, PAUL. **The Argument for I-joists: New products and increased competition make superior I-joist performance available at solidlumber prices**. In: Fine Homebuilding Magazine, n. 129, p. 70-73, 2000a.

FISETTE, PAUL. **The evolution of engineered wood I-joists**, 2000b. Disponível em: <[http://www.umass.edu/bmatwt/publications/articles/i\\_joist.html](http://www.umass.edu/bmatwt/publications/articles/i_joist.html)>. Acesso em: 11 Mai. 2012.  
GEORGIA-PACIFIC. **Wood I Beam™ Joists**. Atlanta, 2012. 29 p. Disponível em: <<http://www.gp.com/build/DocumentViewer.aspx?repository=BP&elementid=4372>>. Acesso em: 15 mai. 2012.

GERE, James M. **Mecânica dos Materiais**. 5. ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.

GÓES, J. L. N. **Análise de Vigas de Madeira Pregadas com Seção Composta I**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

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

JAHROMI, A.B.; ZHANG, B.; HARTE, A.; WALFORD, B.; BAYNE, K.; TURNER, J. Investigating the structural performance of multi-webs I-beams. **Journal of the Institute of Wood Science**, v.17, n.3, p.148-158. 2006.

LEICHTI, R. J.; FALK, R. H; LAUFENBERG, T. L. Prefabricated wood composite I-Beams: A literature review. **Wood and Fiber Science**, v.2, n.1, pp. 62-79, 1990.

LIMA, A. L. **Comportamento estrutural de vigas em madeira, com seção “I”, de mesas em Pinus maciço e alma em OSB**. 2005. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

MENDES, Lourival Marin.; IWAKIRI, S.; ABUQUERQUE, C. E. C. OSB - Opções no Mercado. **Revista da Madeira**, v. 2003, p. 82-86, Mai. 2003.

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

RIBEIRO, Wilson. F. **ANÁLISE DE DIFERENTES RESINAS E GEOMETRIAS DE LIGAÇÕES PARA VIGAS DE MADEIRA COMPOSTAS EM PERFIL I**. 2012. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2012.

SANTOS, A. M DE L. **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**. 2008. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade de Brasília, Brasília, 2008. Disponível em: <[http://repositorio.bce.unb.br/bitstream/10482/2243/1/2008\\_Airton%20Mauro%20de%20Lara%20Santos.pdf](http://repositorio.bce.unb.br/bitstream/10482/2243/1/2008_Airton%20Mauro%20de%20Lara%20Santos.pdf)>. Acesso em: 15 Mai. 2012.

SANTOS, Gilson R. V. dos. **Otimização da secagem da madeira de Eucalyptus grandis (Hill ex Maiden)**. 2002. 70 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia de Madeiras) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11149/tde-01082002-163939/publico/gilson.pdf>>. Acesso em: 27 Abr. 2012.

SEDOSKI, M. C.; RIBEIRO, W. F.; GÓES, J. L. N. Avaliação teórica e experimental em vigas de madeira compostas em perfil I. In: Encontro Tecnológico de Engenharia Civil e Arquitetura, 8., 2011, Maringá. **Anais...** Maringá: Universidade Estadual de Maringá, 2011.

SILVA, C. C. e **Análise teórica e experimental de vigas de madeira de seção transversal “I” para uso em fôrmas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010. Disponível em: <[http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-14072010-091217/publico/2010ME\\_CatiaCostaeSilva.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-14072010-091217/publico/2010ME_CatiaCostaeSilva.pdf)>. Acesso em: 04 Mai. 2012.

SILVA, Cátia da Costa e; PLETZ, Everaldo; MOURA, Jorge Daniel de Melo. Emendas em vigas de seção transversal I em madeira. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRA E ESTRUTURA DE MADEIRA, 11., 2008, Londrina. **Anais...** Londrina: Universidade Estadual de Londrina, 2008.

TEIXEIRA, Marcelo G. **Aplicação de conceitos da ecologia industrial para a produção de materiais ecológicos: o exemplo do resíduo de madeira**. 2005. 159 f. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2005. Disponível em: <[http://www.teclim.ufba.br/site/material\\_online/dissertacoes/dis\\_marcelo\\_g\\_teixeira.pdf](http://www.teclim.ufba.br/site/material_online/dissertacoes/dis_marcelo_g_teixeira.pdf)>. Acesso em: 26 Abr. 2012.

USDA, United States Department of Agriculture. **Wood handbook – Wood as an engineering material**. Madison: Forest Products Laboratory, 2010. 508 f. Disponível em: <[http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl\\_gtr190.pdf](http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl_gtr190.pdf)>. Acesso em: 15 Mai. 2012.

USDA, United States Department of Agriculture. **Wood handbook – Wood as an engineering material**. Madison: Forest Products Laboratory, 1999. 473 f.

WIJMA, Wood I-Joist Manufacturers Association. **Why Use Prefabricated Wood I-joists?**, 2001. Disponível em: <<http://i-joist.org/benefits>>. Acesso em: 10 Mai. 2012.

WILLIAMSON, P. E. **APA engineered Wood Handbook**. 1. ed. New York: McGraw-Hill, 2002.

YEH, Borjen. **ASTM Standard for Engineered Wood Products**. 2003. Disponível em <[http://www.astm.org/SNEWS/JUNE\\_2003/yeh\\_jun03.html](http://www.astm.org/SNEWS/JUNE_2003/yeh_jun03.html)>. Acesso em: 20 mai. 2012.  
ZENID, Geraldo J. **Madeira : uso sustentável na construção civil**. 2. ed. São Paulo: IPT, 2009. Disponível em: <[http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/manual\\_madeira\\_1253894638.pdf](http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/manual_madeira_1253894638.pdf)>. Acesso em: 25 abr. 2012.





















### APÊNDICE K – Resultados para os ensaios de umidade e densidade das mesas de 1 a 5

CP	MATERIAL	Largura (mm)	Esp. (mm)	Altura (mm)	Massa Inicial (g)	Massa Seca (g)	Umidade (%)	Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )
A	1	25,50	24,95	75,00	27,34	23,06	18,58%	572,96
B	1	25,80	25,50	75,00	27,67	23,29	18,83%	560,77
C	1	25,70	25,50	75,45	27,83	23,37	19,11%	562,83
D	1	25,75	25,35	75,60	27,52	23,14	18,91%	557,66
E	1	25,55	25,95	75,15	28,03	23,56	19,00%	562,56
F	1	25,50	25,65	74,10	26,63	22,35	19,18%	549,45
G	1	25,45	25,70	75,00	26,91	22,57	19,23%	548,57
H	1	25,10	25,90	75,40	27,25	22,86	19,23%	555,93
I	1	25,55	25,30	74,90	27,94	23,43	19,25%	577,08
A	2	25,50	25,10	74,65	26,48	21,95	20,65%	554,21
B	2	25,20	25,70	74,45	26,34	21,83	20,65%	546,28
C	2	25,60	25,05	75,00	26,70	22,15	20,57%	555,14
D	2	25,15	25,60	75,10	26,06	21,65	20,40%	538,96
E	2	25,00	25,60	74,20	26,47	21,99	20,40%	557,40
F	2	25,20	25,80	75,20	26,25	21,85	20,14%	536,90
G	2	25,00	25,70	75,25	26,70	22,20	20,28%	552,24
H	2	24,45	23,35	74,40	22,10	18,42	19,96%	520,30
A	3	25,95	25,35	74,40	25,68	21,75	18,06%	524,69
B	3	25,40	25,95	75,30	27,39	23,10	18,64%	551,86
C	3	26,05	25,60	75,50	26,74	22,55	18,59%	531,09
D	3	25,55	25,80	75,55	26,15	22,05	18,58%	525,08
E	3	25,40	25,80	74,95	26,62	22,36	19,06%	541,98
F	3	25,90	25,35	75,25	25,16	21,15	18,95%	509,24
G	3	25,50	25,95	75,30	26,43	21,77	21,41%	530,43
H	3	25,75	25,90	75,00	25,92	22,21	16,72%	518,20
A	4	25,50	25,90	74,80	31,05	25,65	21,06%	628,52
B	4	25,40	25,80	74,90	31,50	25,97	21,29%	641,76
C	4	25,65	25,30	75,05	30,00	24,80	20,95%	615,97
D	4	25,85	25,30	74,65	29,28	24,29	20,54%	599,74
E	4	26,00	25,35	74,75	30,20	25,18	19,93%	612,98
F	4	25,30	25,85	74,65	30,62	25,24	21,31%	627,18
G	4	25,35	25,45	74,70	29,55	24,46	20,82%	613,16
H	4	25,30	25,95	75,00	31,61	26,17	20,77%	641,96
A	5	25,25	25,80	74,95	30,91	25,80	19,81%	633,06
B	5	25,85	25,00	75,00	30,36	25,27	20,13%	626,38
C	5	25,80	25,00	75,15	30,56	25,43	20,20%	630,47
D	5	25,80	25,40	75,20	30,45	25,41	19,84%	617,90
E	5	25,70	25,00	74,65	29,13	24,41	19,32%	607,35
F	5	24,65	25,45	75,00	29,62	24,66	20,10%	629,53
G	5	25,85	25,25	75,10	29,94	25,06	19,49%	610,79
H	5	25,75	25,35	75,00	30,24	25,25	19,79%	617,68

### APÊNDICE L – Resultados para os ensaios de umidade e densidade das mesas de 6 a 10

CP	MATERIAL	Largura (mm)	Esp. (mm)	Altura (mm)	Massa Inicial (g)	Massa Seca (g)	Umidade (%)	Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )
A	6	25,10	25,95	74,70	29,77	24,72	20,43%	611,85
B	6	25,75	25,00	74,25	27,05	22,46	20,45%	565,92
C	6	25,80	24,90	75,40	27,05	22,35	21,03%	558,44
D	6	24,95	25,85	74,60	26,53	21,92	21,01%	551,40
E	6	24,70	25,25	74,90	27,06	22,51	20,21%	579,28
F	6	25,80	25,10	74,70	29,07	24,08	20,74%	600,94
G	6	25,90	25,90	75,30	26,42	21,80	21,18%	523,04
A	7	25,85	25,40	75,05	24,91	20,93	19,00%	505,51
B	7	25,70	26,00	75,00	25,94	21,80	19,01%	517,61
C	7	24,65	24,45	74,70	24,16	20,35	18,70%	536,64
D	7	26,00	25,55	74,90	25,01	20,99	19,17%	502,65
E	7	25,85	25,80	75,25	25,52	21,50	18,73%	508,50
F	7	25,05	25,70	74,90	25,25	21,25	18,82%	523,65
G	7	25,80	25,95	75,30	25,38	21,41	18,55%	503,43
H	7	25,00	25,30	73,70	24,56	20,66	18,87%	526,87
A	8	24,50	25,85	74,75	27,87	22,86	21,94%	588,71
B	8	24,80	26,00	74,40	27,07	22,13	22,35%	564,27
C	8	26,00	25,00	74,55	27,91	22,76	22,64%	575,97
D	8	24,35	25,95	75,00	28,61	23,58	21,33%	603,70
E	8	26,05	25,00	74,90	27,02	22,01	22,77%	553,93
F	8	25,90	24,80	74,75	27,69	22,52	22,98%	576,71
G	8	25,00	25,90	74,90	27,86	22,71	22,66%	574,46
H	8	25,85	24,30	75,15	28,71	23,43	22,52%	608,19
A	9	26,15	25,40	75,15	28,87	24,09	19,85%	578,38
B	9	25,35	25,70	74,90	28,59	23,82	20,02%	585,90
C	9	26,10	25,20	75,00	28,89	24,11	19,81%	585,66
D	9	25,30	26,15	75,05	29,46	24,59	19,79%	593,32
E	9	24,85	25,65	74,55	28,85	24,23	19,08%	607,13
F	9	26,00	25,25	74,80	29,40	24,64	19,40%	598,70
G	9	25,25	26,00	74,95	29,30	24,57	19,33%	595,47
H	9	25,30	25,95	75,00	29,05	24,22	19,96%	589,97
A	10	25,75	25,30	74,55	27,07	22,79	18,80%	557,37
B	10	25,65	25,85	75,60	27,63	23,28	18,68%	551,20
C	10	25,65	25,90	74,80	26,55	22,52	17,92%	534,29
D	10	25,60	25,55	75,00	27,00	22,76	18,62%	550,39
E	10	25,60	24,60	74,95	25,07	21,10	18,81%	531,14
F	10	25,60	25,25	75,40	27,69	23,41	18,31%	568,13
G	10	25,90	25,40	75,20	26,78	22,56	18,73%	541,33
H	10	25,40	25,40	75,40	26,39	22,37	18,00%	542,50