

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

MAIKO CRISTIAN SEDOSKI.

**ANÁLISE EM VIGAS DE MADEIRA COMPOSTAS PERFIL “I”,
COM ENCAIXE DIFERENCIADO ENTRE MESAS E ALMA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO

2013

MAIKO CRISTIAN SEDOSKI

**ANÁLISE EM VIGAS DE MADEIRA COMPOSTAS PERFIL “I”,
COM ENCAIXE DIFERENCIADO ENTRE MESAS E ALMA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à Disciplina de TCC 2, do Curso Superior em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil.

**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 27

**ANÁLISE EM VIGAS DE MADEIRA COMPOSTAS PERFIL “I”, COM ENCAIXE
DIFERENCIADO ENTRE MESAS E ALMA por
Maiko Cristian Sedoski**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 19h00 do dia 05 de setembro 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. Msc. Adalberto L. R. de Oliveira

(UTFPR)

Prof. Dr. Leandro Waidemam

(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.

A Deus.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar a oportunidade de cursar engenharia civil, força e amigos nesta caminhada cheia de provações.

Aos meus pais, Lauro e Suzana, pelo apoio necessário. A meu pai, fonte de inspiração em dar soluções simples e criativas um verdadeiro engenheiro nato. A minha mãe por servir deliciosos cafés, sucos e guloseimas nos dias incansáveis de estudo na sala de nossa casa.

Ao meu irmão Marlon, por sempre motivar nos momentos difíceis desta caminhada.

Aos melhores amigos, André Maebara, Marcel, Wilson Fabiano, Migué (César Rodigheri), Lívia, Suzuki, Aline Leutner, Fabiano e Hobwan por sempre estarem prestes a dar apoio naquelas horas de desesperos antes das provas e nos trabalhos, vocês fizeram a diferença.

Aos companheiros e amigos fora da sala de aula, Marcos Sehaber, professor Marcos, Daniel Kamimura, Alécio, Manoel e professora Adriana. Agradeço pela amizade, companheirismo e palavras de fortalecimento.

A Edilma e sua família, a galera da Igreja Metodista em especial ao meu grande irmão e ex-líder no louvor Marcelo, pelas orações e apoio.

A todos os meus mestres, que cooperaram com minha formação. E de uma forma especial ao meu mestre Jorge Góes, poderia dizer que foste mais que um mestre, foi um amigo, obrigado pela oportunidade de participar de suas pesquisas, trabalhos de TCC, ser meu orientador e como técnico poder participar da criação dos espaços de laboratórios da engenharia civil, delegando a mim tarefas e responsabilidades. Isso faz lembrar quando sonhávamos com a construção do pátio, compra das máquinas da marcenaria e até a entrega da DL 30000. Paro por aqui por não saber expressar o quanto sou honrado por ser seu orientado e aluno.

A minha lindinha Vanessa, obrigado por ser meu amparo e esteio, tens feito muito a diferença em meus dias.

Finalmente, a todas as pessoas que participaram em algum momento desse caminho, que de algum modo me incentivaram, acreditaram em mim,

me fizeram melhorar, crescer, aprender, de forma carinhosa ou dura,
obrigada.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- PRODUTOS ENGENHEIRADOS DE MADEIRA.....	16
FIGURA 2- VIGA I DE MADEIRA “I-JOISTS”	19
FIGURA 3- VIGAS COMPOSTAS COM MESAS EM MADEIRA MACIÇA E LVL E ALMA EM COMPENSADO.....	22
FIGURA 4- VIGAS “I” DE MADEIRA	24
FIGURA 5 - MODELO DE FABRICAÇÃO DE VIGAS EM PERFIL “I”	25
FIGURA 6 - DIMENSÕES DE FABRICAÇÃO DE VIGAS “I”.....	26
FIGURA 7- DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO DE UMA VIGA COM SEÇÃO “I” SUBMETIDA À FLEXÃO	28
FIGURA 8- DIMENSÕES PARA CAÇULO DA RIGIDEZ EFETIVA, DIAGRAMA DE TENSÃO MÁXIMA E CISALHAMENTO MÁXIMO	28
FIGURA 9- SEÇÃO TRANSFORMADA PARA VIGA “I” COM TRÊS ELEMENTOS	30
FIGURA 10- GEOMETRIA E DIMENSÕES PARA CÁLCULO DE CG DAS MESAS	31
FIGURA 11- COTAS PARA CÁLCULO DO CENTROIDE DA SEÇÃO TRANSVERSAL	31
FIGURA 12- REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA VIGA “I” ESTUDADA	32
FIGURA 13- DETALHE E DIMENSÕES DA MESA COM GEOMETRIA EM “V”	34
FIGURA 14- REPRESENTAÇÃO GRÁFICA PARA CÁLCULO DO MOMENTO ESTÁTICO..	35
FIGURA 15- BENEFICIAMENTO DAS MESAS DE PINUS E REALIZAÇÃO DE ENTALHE..	37
FIGURA 16- ARRANJO BI-APOIADO PARA ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS MESAS.	38
FIGURA 17- SEÇÃO TRANSVERSAL DAS VIGAS, DETALHE DOS ENCAIXES	39
FIGURA 18- MONTAGEM DA VIGA “I”	40
FIGURA 19- ARRANJO PARA ENSAIO	41
FIGURA 20- COMPARATIVO DAS METODOLOGIAS DE ENSAIO	48
FIGURA 21- COMPARATIVO DAS VIGAS À CAPACIDADE DE CARGA (FORÇA ÚLTIMA).48	

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – MÁXIMA CAPACIDADE DE CARGA, TENSÃO PRINCIPAL MÁXIMA E TENSÃO MÁXIMA DE CISALHAMENTO.	23
TABELA 2 – VALORES DOS MÓDULOS DE ELASTICIDADE DAS MESAS COM SEÇÃO ENCAIXE “V”.	38
TABELA 3 – VALORES DOS MÓDULOS DE ELASTICIDADE DAS MESAS COM SEÇÃO ENCAIXE “RETANGULAR”.....	38
TABELA 4 – RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA VIGA 1 COM ENCAIXE RETANGULAR.	42
TABELA 5 – RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA VIGA 2 COM ENCAIXE RETANGULAR.	43
TABELA 6 – RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA VIGA 3 COM ENCAIXE RETANGULAR.	44
TABELA 7 – RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA VIGA 1 COM ENCAIXE EM “V”.	45
TABELA 8 – RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA VIGA 2 COM ENCAIXE “V”.	46
TABELA 9 – RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA VIGA 3 COM ENCAIXE “V”.	47

LISTA DE SÍMBOLOS

a = Distância do centroide.

b_1 = Largura da seção transversal das mesas.

b_2 = Largura da seção transversal da alma.

b_i = Largura do elemento no ponto a ser analisado.

E_1 = Módulo de elasticidade da mesa superior.

E_2 = Módulo de elasticidade da alma.

E_3 = Módulo de elasticidade da mesa inferior.

E_i = Módulo de elasticidade do elemento i .

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

E_c = Módulo de elasticidade comparativo.

h_1 = Altura da seção transversal das mesas.

h_2 = Altura da seção transversal da alma.

$h_{1,2,3}$ = Altura de cada elemento.

I_{ef} = Inércia efetiva da seção transversal.

L = Distância entre apoios.

M = Momento fletor.

M_s = Momento estático.

$n_{1,2,3}$ = Relação entre o módulo de elasticidade real e o módulo de elasticidade comparativo para cada elemento.

V = Força cortante.

Y_j = Altura do ponto a ser analisado.

y = Distância do ponto de análise até o centroide.

σ = Tensão normal.

δ = Flecha no ponto analisado.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	13
2.1 OBJETIVO GERAL.....	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
3 JUSTIFICATIVA	13
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
4.1 PRODUTOS ENGENHEIRADOS – PEM.....	16
4.2 VIGAS DE MADEIRA “I-JOIST”.....	18
4.3 A MADEIRA SERRADA.....	26
4.4 OSB.....	26
4.5 ADESIVO.....	27
4.6 HIPÓTESE DE CÁLCULO.....	27
4.7 MÉTODO DA SEÇÃO TRANSFORMADA PARA SEÇÃO “I” FORMADA COM TRÊS PEÇAS DE MATERIAIS DIFERENTES.....	29
4.8 MÉTODO DA SEÇÃO TRANSFORMADA ADAPTADO PARA VIGA “I”..	32
4.9 CÁLCULO DAS TENSÕES NORMAIS E DE CISALHAMENTO	34
5 MATERIAIS E MÉTODOS	36
5.1 MATERIAIS UTILIZADOS	36
5.2 VIGAS “I-JOIST”.....	39
5.3 ENSAIO DAS VIGAS	40
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
7 CONCLUSÕES	50
REFERÊNCIAS	51

SEDOSKI, Maiko. C. **ANÁLISE EM VIGAS DE MADEIRA COMPOSTAS PERFIL “I”, COM ENCAIXE DIFERENCIADO ENTRE MESAS E ALMA.** 2013. 51 f. Monografia (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2013.

RESUMO - Com aplicação de materiais ecologicamente corretos na construção civil, os produtos engenheirados de madeiras (PEM) vêm expandindo globalmente, estes são produzidos a partir da junção de um composto de madeira, utilizando a melhor propriedade que cada um possa oferecer. Nisso a indústria tem buscado alternativas para melhorar o desempenho das propriedades físico-mecânicas, resistência a bio-deterioração e a melhor estabilidade dimensional e estrutural ausentes na madeira em seu estado natural. Neste contexto, observando a grande demanda por parte da indústria da construção civil por novas soluções que se enquadrem nos conceitos de racionalização construtiva, as estruturas de madeira e de derivados de madeira possuem um grande potencial para preencher essa lacuna. As vigas de madeira de seção “I”, também conhecidas como “I-Joists”, são perfis industrializados fabricados através da colagem de mesa superior e inferior, formadas por peças de madeira maciça, ligadas à alma, formada por OSB (*Oriented Strand Board*). Neste trabalho foi possível avaliar de forma experimental e analítica, vigas com duas diferentes geometrias de ligações mesa/alma em viga “I”, com objetivo de comparar o desempenho de rigidez e resistência ao cisalhamento.

Palavras chave: Produtos Engenheirados de Madeira, geometrias de ligações, propriedades mecânicas.

SEDOSKI, Maiko. C. **ANALYSIS OF BEAMS IN WOOD COMPOSITE PROFILE "I", FIT WITH DIFFERENTIAL BETWEEN TABLES AND SOUL**.2013. 51 f. Monografia (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2013.

ABSTRACT - The development of new technologies and the use of ecological materials offer to engineered wood products a global growth. They are produced from the junction of more than one wood composite, using the best property of each one, providing qualified and efficient structures. This way the industry has sought alternatives to improve the performance of physical and mechanical properties, resistance to bio-deterioration and better dimensional stability. Noting the great demand from the construction industry to new solutions, the wood structures and wood derivatives products have great potential to fill this space. The wood "I-Joists" are industrial profiles produced by using structural panels on the web, composed of OSB (*Oriented Strand Board*), and solid wood on the flanges. This study evaluated experimentally and analytically, two beams with different web to flange joint, in order to compare the performance of stiffness and shear strength.

Keywords: Engineered wood products, Wood I-joists, mechanical properties, Web-to-flange joint.

1 INTRODUÇÃO

Na construção civil, a utilização da madeira tem apresentado ao longo do tempo um importante papel, por ser um material de característica única, de grande abundância, alta capacidade estrutural, valor estético, propriedades termo acústico, ótima relação resistência/peso, baixo consumo energético para a sua produção, um material facilmente obtido e de fonte renovável. O ciclo de regeneração ou campo de sustentação pode-se facilmente superar o volume que está sendo utilizado.

Atualmente a madeira é um excelente material para a concepção e construção de estruturas inovadoras, devido principalmente aos avanços recentes da tecnologia nas áreas de produção, controle tecnológico, processamento e técnicas construtivas. Além disso, as modernas estruturas de madeira são esteticamente agradáveis, tecnicamente confiáveis, sustentáveis e em muitos casos economicamente competitivas.

Devido à grande preocupação com o impacto ambiental, sustentabilidade e necessidade de utilizar elementos estruturais de qualidade, juntamente com o avanço na tecnologia dos materiais, ocorreram grandes evoluções nos produtos derivados da madeira, principalmente pela possibilidade do emprego de madeiras provenientes de florestas plantadas, tornando esses produtos ecologicamente corretos, propiciando assim novos campos de aplicação e garantindo um sólido mercado consumidor. Além da redução dos agravos ambientais, os Produtos Engenheirados de Madeira (PEM) proporcionam um menor uso da madeira maciça e praticamente a utilização de 100% de matéria prima para sua manufatura.

As vigas de madeira com seção “I” representam um dos principais avanços da tecnologia dos produtos engenheirados de madeira, tendo como características principais a leveza, elevada rigidez e resistência, confiabilidade, fácil manufatura e, custo acessível quando comparado com vigas de madeira maciça.

O objetivo deste trabalho é analisar a influência das geometrias dos encaixes entre mesas e alma, nas propriedades mecânicas das vigas “I”.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

- Avaliação do comportamento de vigas de madeiras colada com seção transversal “I” com duas geometrias diferentes de ligação mesa-alma.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudo de modelos de dimensionamento de vigas I;
- Ensaios preliminares para determinação das características das peças de madeira;
- Confecção de vigas I com alma colada;
- Ensaios de flexão estática em vigas I;
- Comparação dos resultados teóricos e experimentais.

3 JUSTIFICATIVA

O relatório da Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável (CNUDS) (2012), relata que as florestas distribuídas nas mais diversas regiões do planeta, desempenham importantes funções sociais, econômicas ou ambientais, pois ofertam uma variedade de bens, como produtos florestais madeireiros e não madeireiros, além de prestarem serviços ambientais essenciais, como conservação dos recursos hídricos e do solo, a conservação da biodiversidade e a estabilidades climáticas. O manejo responsável de todos os tipos de floresta, para a produção sustentável de bens e serviços, constitui um desafio e uma oportunidade para toda a sociedade, pois se trata de uma fonte para produção de matérias-primas e de biomassa para geração de energia, além

de importante ferramenta para conservação da floresta e geração de trabalho descente.

Silva (2010) afirma que no “Brasil existe um decréscimo em relação aos produtos de madeira devido principalmente a falta de informações. Embora usada em grande escala mas em modo pouco racional, seus usuários, em sua maioria, desconhecem os modos de aperfeiçoar sua durabilidade e propriedades naturais”.

A madeira engloba os requisitos fundamentais para diminuir os impactos ambientais causados pelas construções, sendo um material renovável, reaproveitável e de grande abundância em nosso país. Neste contexto, o processamento industrial agrega aos produtos derivados da madeira características antes ausentes na madeira sólida, como apresentar uma estrutura mais homogênea e com defeitos reduzidos, melhores propriedades físico-mecânicas, resistência à bio-deterioração e melhor estabilidade dimensional, dentre outras, melhorando desta forma a qualidade e aumentando a confiabilidade das estruturas de madeira.

As vigas de madeira de seção “I”, também conhecidas como “I-Joists”, são perfis industrializados fabricados através da colagem de mesas – superior e inferior – à alma. As mesas podem ser formadas tanto de peças de madeira maciça como de LVL (*Laminated Veneer Lumber*). A alma é normalmente constituída por painéis estruturais de madeira como o compensado (*Plywood*) e o OSB (*Oriented Strand Board*).

Esta viga atualmente é utilizada em grande escala na construção civil nos países da América do Norte e Europa, detentoras no desenvolvimento tecnológico de materiais derivados de madeira. No Brasil a viga “I” ainda é objeto de pesquisa nos centros de tecnologias e universidades.

A viga “I” com alma em OSB consiste em elemento estrutural simples e eficiente com relação peso/resistência comparado com vigas brutas de madeira, sabendo da facilidade na obtenção de madeira de reflorestamento na região de Campo Mourão, faremos avaliação do

comportamento estrutural para obtenção de parâmetros que visem sua utilização em sistemas construtivos.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A madeira sendo um material de característica única e de grande abundância tem sido muito utilizada devido a sua alta capacidade estrutural, valor estético, ótima relação resistência/peso, baixo consumo energético para a sua produção, um material facilmente obtido e de fonte renovável. O ciclo de regeneração, ou campo de sustentação, pode-se facilmente superar o volume que está sendo utilizado.

O consumo cada vez maior de materiais de construção e as crescentes dificuldades para obtenção de madeira maciça com dimensões e qualidade adequadas às diversas necessidades, juntamente com a grande explosão da tecnologia de fabricação ocorrida pouco antes da metade do século XIX, conduziram ao desenvolvimento da indústria de produtos derivados da madeira, (VAZ, 1987, *apud* STAMATO, 1998).

As peças compostas de madeira apresentam características antes ausentes na madeira maciça que fazem com que possa ser empregada em diversos fins, possibilitando atingir grandes vãos com peças de dimensões reduzidas (GÓES, 2002).

Os produtos derivados da madeira têm propiciado novos campos de aplicação, levando em consideração que apresentam comportamento compatível com as atuais exigências do mercado da construção civil. A redução considerável dos estoques de madeira e a necessidade de racionalização de seu uso estimulam o desenvolvimento de novas soluções estruturais, mantendo a beleza do material original e podendo aumentar o desempenho, reduzindo assim o seu consumo (MIOTTO, 2009).

4.1 PRODUTOS ENGENHEIRADOS – PEM

Produtos Engenheirados de Madeira (PEM), ou *Engineered Wood Products (EWPs)* são produtos industrializados de madeira que apresentam como características principais a sustentabilidade, controle de qualidade, segurança, estética e usos diversos, nas áreas de instrumentos musicais, indústria naval, indústria moveleira e construção civil. Na construção civil os PEM podem ser empregados na construção de barracos provisórios até elementos estruturais de pontes (*The Engineered Wood Association, 2009*).

A Associação da Madeira Engenheirada, *Engineered Wood Association – (APA)*, divide os produtos engenheirados de madeira em quatro categorias gerais: 1) os painéis estruturais, incluindo o (OSB) – *Oriented Strand Board*, o compensado (*plywood*) e painéis compósitos (*Waferboard*); 2) a madeira laminada colada (*glulam*); 3) madeira serrada composta estrutural (SCL), incluindo principalmente folheado de madeira laminada (LVL); 4) as vigas em “I” de madeira, (*The Engineered Wood Association, 2007*). A figura 1 ilustra os tipos de produtos engenheirados de madeira.



Figura 1- Produtos Engenheirados de Madeira
Fonte: ENGINEERED WOOD ASSOCIATION (2007).

O OSB (*Oriented Strand Board*) é um PEM que merece destaque no cenário mundial como um dos principais avanços da área. No mercado mundial desde 1980, o OSB é uma chapa estrutural, produzida a partir de lascas (cavacos) de madeira, orientadas em camadas, de forma a conferir excelentes propriedades mecânicas de flexão e cisalhamento (MENDES, *et al.* 2003).

A geometria básica do cavaco é 100 x 25 x 0.5 mm, sendo diferente da produção de painéis aglomerados comuns. A chapa é formada por 3 a 5 camadas de cavacos orientadas perpendicularmente entre si, utilizando adesivos resistentes a umidade. Geralmente são produzidos em dimensões de 1220 x 2440 mm com espessuras que variam de 9 a 38 mm. Seu uso é mais difundido em países como os Estados Unidos da América, países da Europa e Japão. No Brasil, a sua produção teve início no ano de 2002 (MENEZZI, 2004).

Outras características do OSB são a homogeneidade das chapas e a grande resistência ao cisalhamento. Os defeitos antes presentes na madeira sólida, como nós e rachadura e empenamentos, são inexistentes nas chapas de OSB e a resistência ao cisalhamento pode ser até duas vezes maiores que do compensado, razões pelas quais o OSB é o material mais indicado para uso como alma das vigas "I" (FISSETTE, 2005).

O OSB está presente na construção civil mundialmente como parcela significativa da produção de edifícios no sistema "frame", também conhecida como construção seca. O OSB estrutural compõe as paredes, lajes, cobertura e como alma das vigas "I".

Menezzi (2004) cita a desvantagem do OSB com relação ao compensado, sua baixa estabilidade dimensional. Isto ocorre basicamente em função da necessidade de compressão do material durante o processo de produção o que implica na incorporação e permanência de elevados níveis de tensão após consolidação do painel.

Quando o OSB entra em contato com a umidade essas tensões de compressão são liberadas, ocasionado inchamento em espessura, cuja

instensidade é muito superior á do compensado, porém essa desvantagem pode ser convertida utilizando o método de tratamento térmico dos painéis.

4.2 VIGAS DE MADEIRA “I-JOIST”

Uma das aplicações estruturais do OSB são as vigas “I” de madeira, conhecidas internacionalmente como “I-Joists” ou “I-Beam” e, representam um dos principais avanços da tecnologia dos PEM. Suas características principais são leveza, elevada rigidez e resistência, confiabilidade, baixo consumo energético para sua produção e, custo acessível quando comparado com vigas de madeira maciça.

Vigas “I” pré-fabricadas são produtos ecologicamente corretos, que permitem utilizar árvores de reflorestamento de pequeno diâmetro, crescimento rápido, que mesmo sendo árvores de qualidade inferior, obtêm-se produtos de alta qualidade (WIJMA, 2001).

Comparando vigas de seção transversal retangular e de seção transversal “I” de mesma dimensão, a diminuição da inércia é menor do que a perda de volume do material, comprovando que a viga de seção transversal “I” é mais eficiente devido à relação peso/resistência (SILVA, 2010).

As vigas com seção “I” podem ser fabricadas com diversas dimensões e, por conseguinte, diferentes rigidezes e resistências. Na flexão, as mesas das vigas “I” são submetidas aos esforços normais e a alma é submetida aos esforços de cisalhamento, predominantemente (FISSETTE, 2000).

A concepção das vigas “I” usando a alma de painéis de madeira e mesas de madeira serrada em alma/mesas coladas ou pregadas surgiu em meados de 1940, na segunda guerra mundial, com o objetivo de se construir aviões de guerra, (SANTOS, 2008). No entanto a empresa americana *Trus Joist Corporation (TJ)* em 1969 foi a primeira a desenvolver a “I-Beam” industrializada, não somente foi a pioneira no desenvolvimento desta indústria, mas tem mantido um papel de liderança no mercado e este

produto tornou-se um dos componentes mais usados para as construções de residências na América do Norte (FISSETTE, 2000).

Até 1977 as vigas “I” de madeira eram produzidas com alma de compensado e madeira serrada nas mesas, até que a empresa americana TJ substituiu a madeira maciça utilizada nas mesas por LVL (*Laminated Veneer Lumber*), facilitando a produção em processo contínuo, proporcionando a fabricação de vigas mais longas. Assim surgiu a segunda geração de vigas “I” de madeira, popularizando o uso desse elemento estrutural (FISSETTE, 2000).

Logo a grande evolução na história das vigas “I” de madeira foi à substituição da alma em compensado por alma em OSB, ocorrido em 1990 (figura 2). O OSB é um PEM de menor custo e mais resistente ao cisalhamento que o compensado, tornando as vigas “I” de madeira o principal elemento estrutural do sistema construtivo seco, com vasta aplicação desde vigas para coberturas até vigas para assoalhos (lajes), para edifícios residências e comerciais.



Figura 2- Viga I de madeira “I-Joists”
Fonte: (ENGINEERED WOOD CONSTRUCTION, 1999)

Em 2012, cerca de seiscentos milhões de metros de vigas “I” de madeira são fabricados nos Estados Unidos e Canadá (APA, 2012). No Brasil, a tecnologia das vigas “I” vem sendo explorada na área acadêmica

com vários estudos sobre este elemento estrutural, no entanto, no setor da construção civil ainda é pouco utilizada em nosso país.

Prada (2003) estudou o comportamento das vigas em perfil “I” utilizando vigas compostas com mesa em madeira maciça (*Pinus Taeda*), vigas compostas com mesas em (LVL) e alma composta por placas denominada *Blockboard* (Sarrafeado em madeira maciça e revestidos em ambas as faces por lâminas resultantes do desfolhamento de toras de pinus em torno automático) e também fez uma comparação de custos e viabilização de vigas “I” e MLC (Madeira Lamina Colada). Definiu a geometria da ligação mesa/alma como sendo o modelo “*finger-joint*”. Concluiu que as emendas apresentaram um perfeito equilíbrio dos entalhes da junção mesa/alma bem como um perfeito funcionamento do adesivo. As vigas compostas por alma em madeira maciça apresentaram tensão de cisalhamento inferior às vigas compostas por mesas de LVL. Verificou-se também que para a utilização de vigas “I” como barrote para lajes, recomenda-se o uso de viga “I” com mesas em madeira maciça, que apresentou um custo médio de R\$ 12,38/ml contra um custo de R\$ 34,04/ml da viga MLC.

De acordo com Pedrosa (2003), o desempenho estrutural de vigas “I” constituídas por painéis sarrafeados de Pinus, compensados de *Pinus Taeda L.*, compensados de *Eucalyptus dunnii Maiden* e OSB de *Pinus ssp* produzidos na região sul do país, foram estruturados de forma a avaliar individualmente as propriedades dos materiais. Os resultados revelaram haver uma pequena variação no teste efetuado com chapas de compensados de Pinus e Eucalipto de mesma espessura, o que não ocorreu com os painéis sarrafeados de Pinus, comprovando a eficácia da classificação das lâminas apenas para a fabricação deste último. Os resultados de ensaios do OSB indicaram propriedades mecânicas elevadas e com pequena dispersão, reforçando a característica de material industrializado e com bom controle de qualidade. Os resultados tornaram evidente a maior contribuição das propriedades das mesas, para a rigidez e resistência a flexão das vigas “I”.

Para Lima (2005) avaliou o comportamento estrutural das vigas “I” utilizando mesa em *Pinus* maciço e alma em OSB, analisou as ligações da alma na mesa pregada, colada e pregada e colada. Constatou-se que o comportamento estrutural é diretamente afetado pelo tipo de ligação mesa/alma. Uma vez que as vigas ensaiadas pesavam em média 12 kg, observou-se que as vigas “pregadas” atingiram a capacidade de carga de até 90 vezes seu peso próprio, as vigas “coladas” e as vigas “coladas e pregadas” atingiram a capacidade de carga de até 230 vezes seu peso próprio. O autor concluiu que a utilização de adesivo na produção das vigas com seção transversal “I” faz com que a alma e as mesas atuem de forma monolítica, sem deslizamento entre as partes constituintes, apresentando um comportamento elástico linear.

Santos et al. (2009) fez uma comparação do comportamento teórico e experimental avaliando o efeito do tipo de alma nas propriedades das vigas “I”. Comparou vigas com mesas de painéis de lâminas paralelas de (LVL) e alma em compensado e em partículas orientadas (OSB). Concluiu que as vigas com alma em OSB apresentam desempenho estrutural superior ao das vigas com alma em compensado, confirmando o que se descreve na literatura.

Silva (2010) apresenta um estudo sobre o comportamento estrutural de vigas H20 para utilização em fôrmas para concreto, compostas por mesa de madeira serrada de *Pinus Oocarpa* com almas de painel de compensado sarrafeado, compensado laminado e madeira serrada de *Pinus Oocarpa*. Concluiu que a melhor combinação foi a de mesa de madeira serrada de *Pinus Oocarpa* e alma em compensado laminado.

Ribeiro (2011) avaliou a eficiência de diferentes combinações de adesivos e geometrias para ligações mesas/alma. Concluiu que a trabalhabilidade da resina é fundamental para a produção das vigas e qualidade das ligações.

Testes com adesivos à base epóxi apresentaram dificuldades na aplicação devido a pouca fluidez, o adesivo formol-resorcinol garantiu facilidade de aplicação bom desempenho e estabilidade na união das

mesas/alma. Já as melhores geometrias foram retangular e “V” por apresentarem melhor desempenho ao cisalhamento na alma bem como a facilidade de confecção das geometrias.

O comportamento estrutural das vigas “I” de madeira é fortemente influenciado pelas características de cada material empregado, bem como nos detalhes de fabricação, como as emendas da alma na mesa.

Jahromi et al. (2006) avaliou o desempenho estrutural de nove diferentes vigas de madeira composta com diferentes seções transversais, inclusive seção transversal “I” e seção transversal caixão com almas múltiplas, analisando as ligações e a quantidade de alma, estudou também a possibilidade de alma com seções circulares vazadas. A Figura 3 ilustra as diferentes seções transversais pesquisadas.

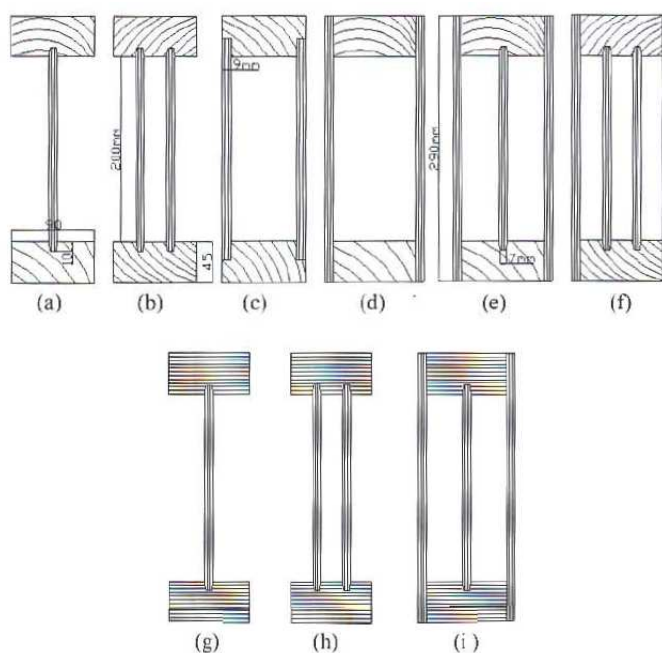


Figura 3- Vigas compostas com mesas em madeira maciça e LVL e alma em compensado
Fonte: JOURNAL OF THE INSTITUTI OF WOOD SCIENCE (2006).

Devido às aberturas na alma a capacidade máxima de carga diminui consideravelmente, porém as múltiplas almas melhoram significativamente o desempenho estrutural das vigas “I”. A viga com seção transversal “I” com alma dupla e abertura de 152 mm obteve um resultado de capacidade de

carga de 52% maior que a viga “I” comum sem abertura na alma, e a viga com seção “I”/caixão com abertura de 152 mm obteve um resultado de 101% maior que a viga “I” comum. A seção caixão com encaixe, Figura 3 (c) apresentou a menor capacidade estrutural devido à geometria da conexão. A Tabela 1 mostra as máximas capacidades de carga e tensões máximas das vigas.

Tabela 1 – Máxima capacidade de carga, tensão principal máxima e tensão máxima de cisalhamento.

SEÇÃO	Carga Máxima	$\sigma_{t,máx.}$	$\tau_{s,máx.}$
	(KN)	(N/mm ²)	(N/mm ²)
SEÇÃO "I"	25,91	0,13	0,47
SEÇÃO "I" Dupla	49,35	0,05	0,2
SEÇÃO CAIXÃO C /ENCAIXE	27,57	0,13	0,16
SEÇÃO CAIXÃO	31,86	0,15	0,34
SEÇÃO "I" CAIXÃO	53,61	0,27	0,52
SEÇÃO DUPLO "I" CAIXÃO	74,84	0,1	0,21
SEÇÃO "I" LVL	26,44	0,11	0,4
SEÇÃO DUPLO "I" LVL	45,81	0,07	0,18
SEÇÃO "I" CAIXÃO LVL	62,23	0,31	0,48

Fonte: Journal of the Institute of Wood Science (2006).

Diante dos vários modelos construtivos de vigas, BERGLUND (2005) apresenta uma viga de composto laminado “*Wafer and Flakeboard*” possivelmente utilizada em paredes e piso residenciais ou comerciais. A figura 4 ilustra a viga de composto laminado.



Figura 4- Vigas “I” de madeira
Fonte: BERGLUND (2005).

As emendas no sentido do comprimento da mesa e da alma e a emenda entre a mesa e alma são os principais desafios para a produção das vigas “I” de madeira e vêm sendo estudadas com frequência em busca da melhor geometria, resistência e praticidade de produção. O comportamento das vigas “I” coladas depende de um grande número de parâmetros, incluindo a mecânica e as características geométricas dos componentes, (RACHER, et al. 2005).

O processo de fabricação das vigas “I” varia de um fabricante para outro, desde o método de produção quanto à geometria da emenda. O Conselho Canadense Madeira (*Canadian Wood Council*) apresenta um modelo de processo fabril de vigas “I” de madeira, Figura 5.

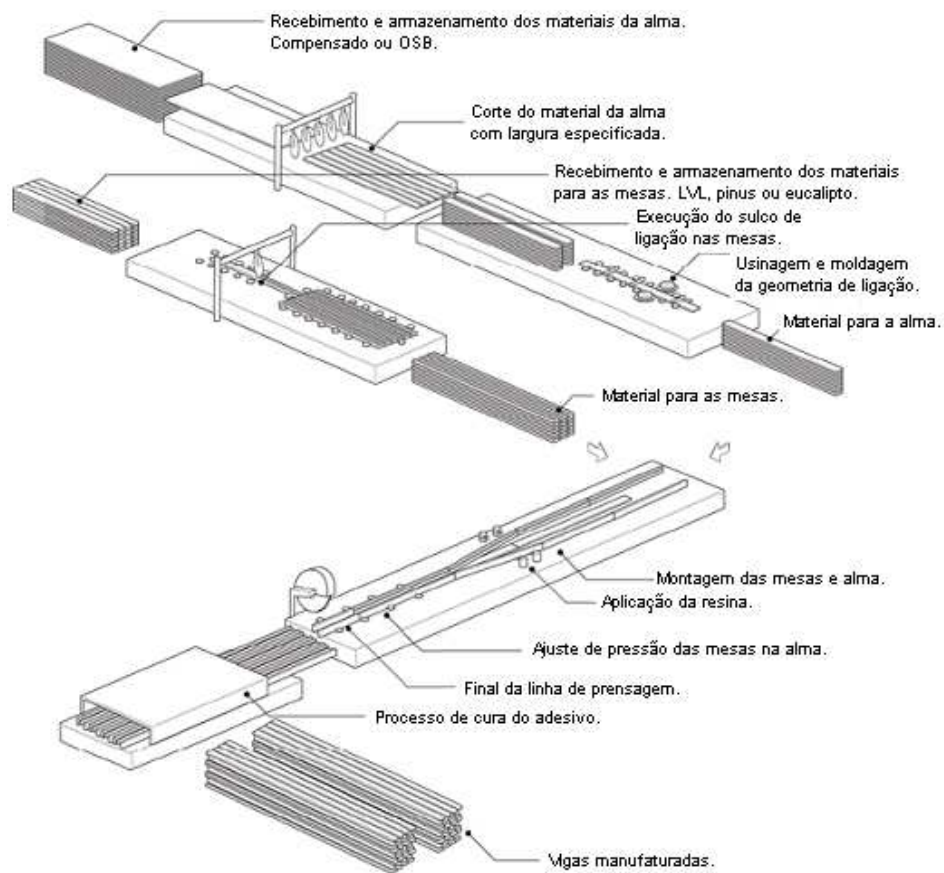


Figura 5 - Modelo de fabricação de vigas em perfil "I"
 Fonte: adaptado de Canadian Wood Council (2013).

Cada fabricante estabelece dimensões de fabricação e modelos de utilização das vigas "I". A empresa canadense *ALPAJOIST* manufatura algumas diferentes dimensões. A Figura 6 ilustra as principais dimensões comercializadas.

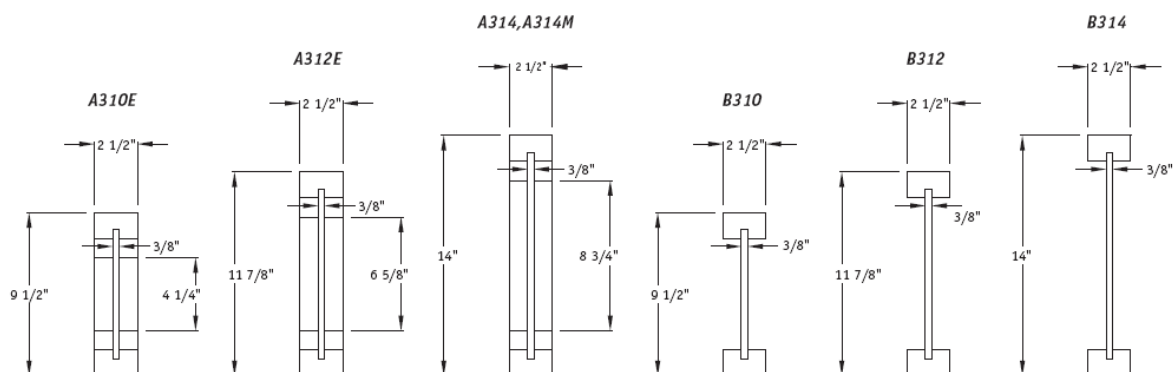


Figura 6 - Dimensões de fabricação de vigas "I"

Série A: Possui aberturas na alma para passagem de tubulações;

Série B: Viga sem aberturas na alma.

Fonte: www.alpafloor.com, acessado em 28/01/2010.

4.3 A MADEIRA SERRADA

Neste trabalho foi utilizada madeira serrada e beneficiada de *Pinus Taeda* nas mesas, considerando a fácil aquisição no município de Campo Mourão e sua resistência/peso.

De acordo com o anuário da ABRAF a área planta de Pinus no Brasil é de 1.562.782 ha, a região Sul do País representa 84,7% desta área. O Estado do Paraná lidera o *ranking* de área plantada de Pinus com 39,7% da área total seguindo pelo Esta de Santa Catarina com 34,5%.

Segundo Silva (*apud* Medrado, 2005), espécies de Pinus são plantadas em escala comercial no Brasil há mais de trinta anos. Este teve início na região Sul e Sudeste do País, com espécies *P. Taeda* para produção de matéria prima para indústria de papel e celulose e *P. Elliottii* para madeira serrada e extração de resina.

4.4 OSB

OSB (Oriented Strand Board) pode ser utilizado para quase todas as finalidades que são destinadas as demais chapas de partículas e compensados. Na indústria é utilizada principalmente em embalagens e móveis e na construção civil tem várias aplicações limitando estes quando expostas diretamente à chuva ou alta umidade relativa por longos períodos.

São formadas por partículas finas e compridas (*strand*) orientadas paralelamente e dispostas em camadas perpendiculares entre si na espessura do painel, podendo ser formada por três ou mais camadas, dependendo do uso final (PEDORSA, 2003).

Na produção dos painéis de OSB está embutido o princípio de laminação cruzada, melhorando desta forma as características de anisotropia relativa à umidade e aos esforços mecânicos. Comparado com o compensado, o OSB tem baixa estabilidade dimensional e maior resistência ao cisalhamento (MENEZZI, 2004).

4.5 ADESIVO

Nas ligações entre mesas e alma foram utilizadas o adesivo comercial CASCOPHEN® RS 216-M, fabricado por Hexion Química Indústria e Comércio Ltda. Esta resina sintética a base de Resorcinol-Formol, em solução álcool/água, é recomendada para colagens exteriores, resistente à água fria ou fervente, alguns solventes orgânicos, fungos e mofo, ao calor seco ou úmido (SILVA, 2010).

4.6 HIPÓTESE DE CÁLCULO

Para a análise do comportamento estrutural de vigas “I” coladas, são consideradas as seguintes hipóteses:

- As partes constituintes (mesas e alma) são interligadas por meio de adesivos que não permitem deslizamentos entre as partes;
- A viga “I” colada apresenta distribuição contínua de deformações longitudinais ao longo de sua altura;
- Se os elementos constituintes possuírem módulo de elasticidade diferente ocorrerá descontinuidade na distribuição das tensões, proporcional a sua rigidez ao seu módulo de elasticidade.

A figura 7 ilustra uma viga com seção transversal “I” submetida à flexão e os correspondentes diagramas de tensões e deformações normais, levando em consideração que possui uma ligação rígida.

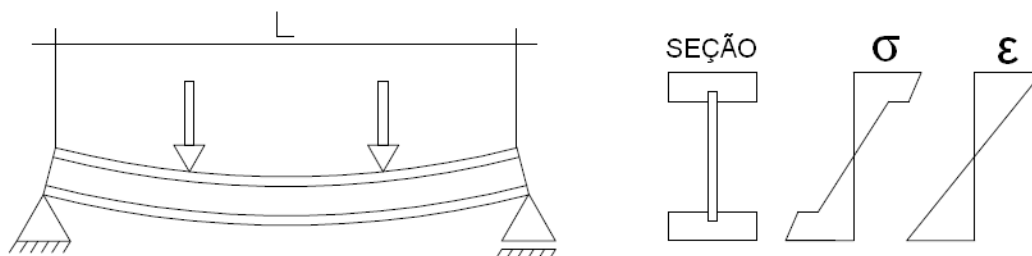


Figura 7- Distribuição de tensão de uma viga com seção “I” submetida à flexão
Fonte: Autor.

Considerando que os elementos constituintes das vigas “I” apresentam propriedades mecânicas diferentes, deve-se calcular a rigidez efetiva $(EI)_{ef}$, utilizando a equação (1).

$$(EI)_{ef} = E_1 \cdot \left(\frac{b_1 \cdot h_1^3}{12} + b_1 \cdot h_1 \cdot a^2 \right) + E_2 \cdot \left(\frac{b_2 \cdot h_2^3}{12} \right) + E_3 \cdot \left(\frac{b_3 \cdot h_3^3}{12} + b_3 \cdot h_3 \cdot a^2 \right) \quad (1)$$

A figura 8 ilustra as dimensões para o cálculo de rigidez efetiva, diagrama de tensão máxima e de cisalhamento máximo.

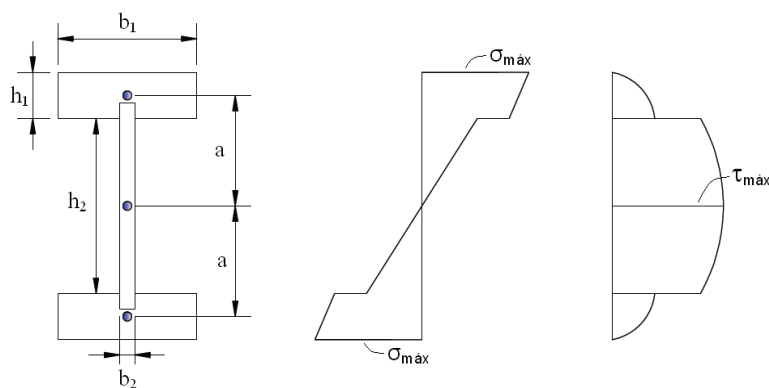


Figura 8- Dimensões para cálculo da rigidez efetiva, diagrama de tensão máxima e cisalhamento máximo
Fonte: Autor.

Para os cálculos das tensões normais (σ)_i e de cisalhamento (τ)_i, devem-se analisar os pontos mais críticos da viga, que são mostrados na figura 9.

As tensões normais e de cisalhamento devem ser obtidas de acordo com as equações 2 e 3, respectivamente.

$$\sigma_j = \frac{M}{(EI)_{ef}} \cdot y_j \cdot E_i \quad (2)$$

$$\tau_{m\acute{a}x.} = \frac{P \cdot M_{s,m\acute{a}x.}}{I_{ef} \cdot b_2} \quad (3)$$

4.7 MÉTODO DA SEÇÃO TRANSFORMADA PARA SEÇÃO “I” FORMADA COM TRÊS PEÇAS de MATERIAIS DIFERENTES

Como a viga é composta por materiais diferentes é necessário fazer o cálculo do centroide. 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).

Com a equação (4) é possível determinar relações entre módulos de elasticidade:

$$n_i = \frac{E_i}{E_c} \quad (4)$$

A Figura 9 apresenta a seção transversal para cálculo de viga “I” com três elementos.

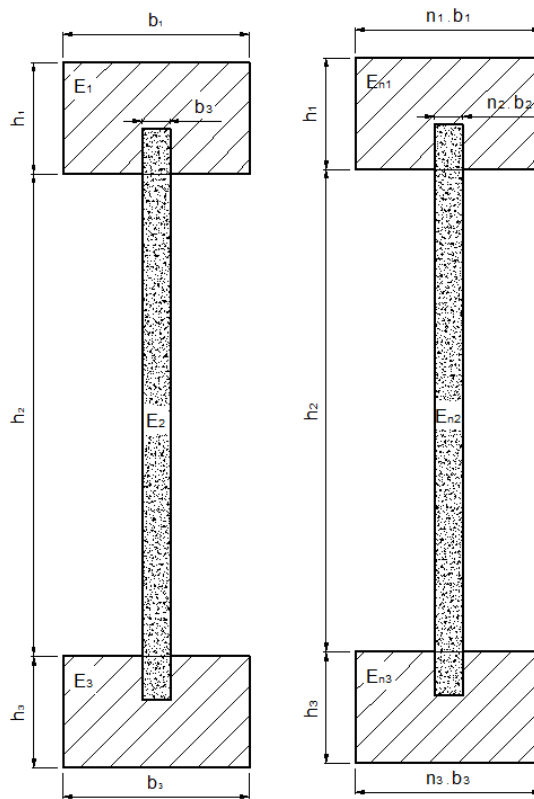


Figura 9- Seção transformada para viga “I” com três elementos
Fonte: Autor.

Com a equação (5) é possível determinar a área da seção transformada de cada peça.

$$A_i = n_i \cdot b_i \cdot h_i \quad (5)$$

Antes de calcular o centroide da viga, é necessário calcular o centroide das mesas. A figura 10 ilustra a geometria das mesas, dos entalhes da mesa/alma e distância dos centroides.

dimensões em centímetros.

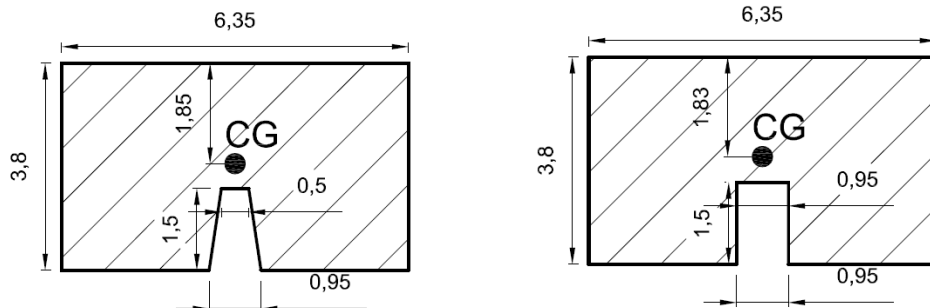


Figura 10- Geometria e dimensões para cálculo de CG das mesas
Fonte: Autor.

A Figura 11 apresenta a seção transversal com suas respectivas cotas para cálculo do centroide.

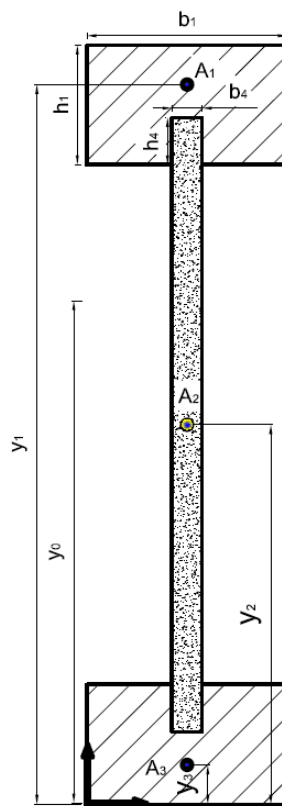


Figura 11- Cotas para cálculo do centroide da seção transversal
Fonte: Autor.

Com a equação (6) é possível determinar a inércia efetiva da seção transversal.

$$I_{ef} = \left[\frac{b_1 \cdot h_1^3}{12} + b_1 \cdot h_1 \cdot \left(\frac{h_1}{2} - y_0 \right)^2 \right] - \left[\frac{b_4 \cdot h_4^3}{12} + b_4 \cdot h_4 \cdot \left(\frac{h_4}{2} - y_0 \right)^2 \right] \quad (6)$$

4.8 MÉTODO DA SEÇÃO TRANSFORMADA ADAPTADO PARA VIGA "I"

A Figura 12 apresenta a seção transversal com suas respectivas distâncias para o cálculo do centroide da viga estudada.

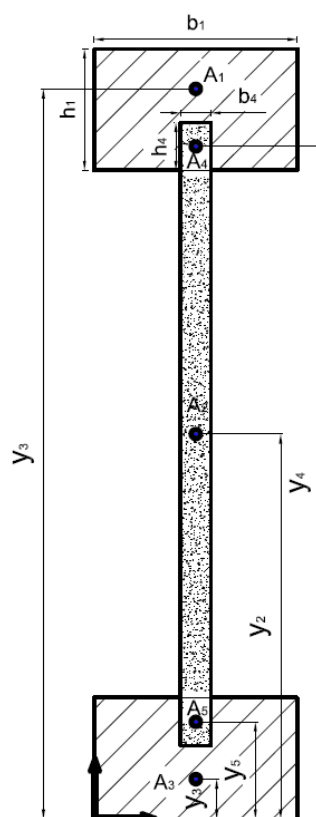


Figura 12- Representação gráfica da viga "I" estudada
Fonte: Autor.

Com a equação (7) é possível determinar relações entre módulos de elasticidade:

$$n_i = \frac{E_i}{E_c} \quad (7)$$

Com a equação (8) é possível determinar o centroide da seção transversal.

$$Y_0 = \frac{y_1 \cdot A_1 + y_2 \cdot A_2 + y_3 \cdot A_3 - (y_4 \cdot A_4 + y_5 \cdot A_5)}{A_1 + A_2 + A_3 - (A_4 + A_5)} \quad (8)$$

Com a equação (9) é possível determinar a inércia efetiva da seção transversal com encaixe em "V".

$$I_{ef} = \left[\frac{b_1 \cdot h_1^3}{12} + b_1 \cdot h_1 \cdot \left(\frac{h_1}{2} - y_0 \right)^2 \right] - \left[\frac{0,5 \cdot 1,5^3}{12} + 0,5 \cdot 1,5 \cdot (0,75 - y_0)^2 \right] - 2 \cdot \left[\frac{0,225 \cdot 1,5^3}{36} + \frac{0,225 \cdot 1,5}{2} \cdot (0,5 - y_0)^2 \right] \quad (9)$$

A figura 13 demonstra detalhe e dimensões do encaixe entre mesa e alma para cálculo da inércia efetiva da viga I.

dimensões em centímetros.

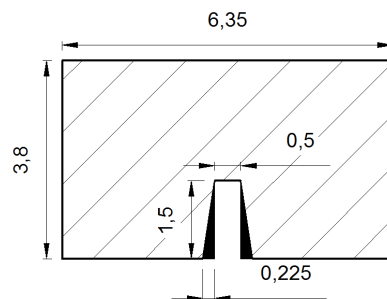


Figura 13- Detalhe e dimensões da mesa com geometria em "V"
Fonte: Autor.

Com a equação (10) é possível determinar a inércia efetiva da seção transversal com encaixe retangular.

$$I_{ef} = \left[\frac{b_1 \cdot h_1^3}{12} + b_1 \cdot h_1 \cdot y_1^2 \right] + \left[\frac{b_2 \cdot h_2^3}{12} + b_2 \cdot h_2 \cdot y_2^2 \right] + \left[\frac{b_3 \cdot h_3^3}{12} + b_3 \cdot h_3 \cdot y_3^2 \right] \quad (10)$$

4.9 CÁLCULO DAS TENSÕES NORMAIS E DE CISALHAMENTO

Considerando as hipóteses de Euler-Bernoulli de vigas, seguem as respectivas equações para o cálculo das tensões normais máximas e tensão de cisalhamento máxima, considerando o ensaio de flexão em quatro pontos.

$$\sigma = \frac{M}{I_{ef}} \cdot y \rightarrow \frac{I_{ef} \cdot \sigma}{y} = \frac{P \cdot L}{6} \rightarrow P = \frac{6 \cdot \sigma \cdot I_{ef}}{y \cdot L} \quad (11)$$

A Figura 14 apresenta a seção transversal para cálculo do momento estático máximo.

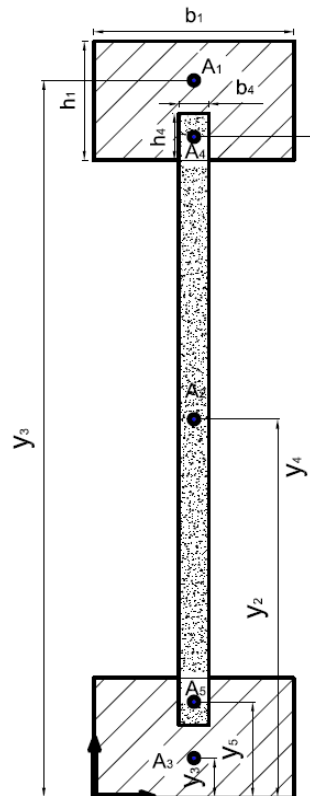


Figura 14- Representação gráfica para cálculo do momento estático
Fonte: Autor.

Com a equação (12) é possível determinar o cálculo do momento estático.

$$M_{s,máx.} = n_i \cdot b_i \cdot h_i \cdot y_i \quad (12)$$

Com a equação 13 é possível determinar a tensão de cisalhamento máxima.

$$\tau_{m\acute{a}x.} = \frac{P.M_{s,m\acute{a}x.}}{I_{ef} \cdot b_2} \quad (13)$$

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a avaliação do comportamento mecânico de vigas compostas, se faz necessário, além de análise analítica, a realização de ensaios de laboratório para comparar os modelos matemáticos e obter parâmetros para serem usados em tais modelos.

Para obter valores e fazer comparativos com modelo teórico foram realizados ensaios em corpos de prova em escala real. Esta verificação foi feita em madeira de *Pinus Taeda*, de modo a constatar a validade do modelo em estudo, para o OSB os valores foram extraídos de (DIAS, 2006).

Realizaram-se estáticos em duas diferentes geometrias de forma a determinar a que proporciona melhor comportamento mecânico e facilidade de produção.

Os ensaios foram desenvolvidos no Laboratório de estruturas da (UTFPR) Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Campo Mourão. A seguir são apresentados detalhadamente os materiais e os procedimentos adotados no programa experimental de ensaios.

5.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Optou-se pela utilização da madeira de *Pinus Taeda* nas mesas, por serem proveniente de áreas reflorestadas, baixa densidade, custo acessível, grande disponibilidade e potencial de produção no país.

As madeiras foram adquiridas em uma empresa da cidade de Campo Mourão, estas foram condicionadas em tabiques até atingir a umidade de equilíbrio, por volta de 12% conforme o anexo E da NBR 7190

(1997). O controle periódico do teor de umidade foi realizado por meio de medidor elétrico Digisystem DL 2000. Após a secagem das peças, estas foram classificadas por processo visual descartando as peças que apresentavam defeitos como medula, trincas, empenas e nós maiores do que 1/4 da seção transversal.

Para a alma, utilizou-se painel de OSB estrutural (*Home Plus*) do fabricante MASISA de Ponta Grossa - Paraná, com dimensões 1220 mm x 2440 mm x 9,5 mm.

Na união entres mesas e alma foi utilizada o adesivo fenol-resorcinol-formaldeído (PRF), o qual é encontrado com o nome comercial de CASCOPHEN – RS 216M, produzido pela *Hexion Specialty Chemicals*, usada em conjunto com o preparado Endurecedor FM-60-M (em pó) na proporção por peso de 20%.

Selecionada as peças de madeira *Pinus Taeda* (mesas superior e inferior), estas foram beneficiadas e preparadas com o entalhe conforme ilustra a figura 15.

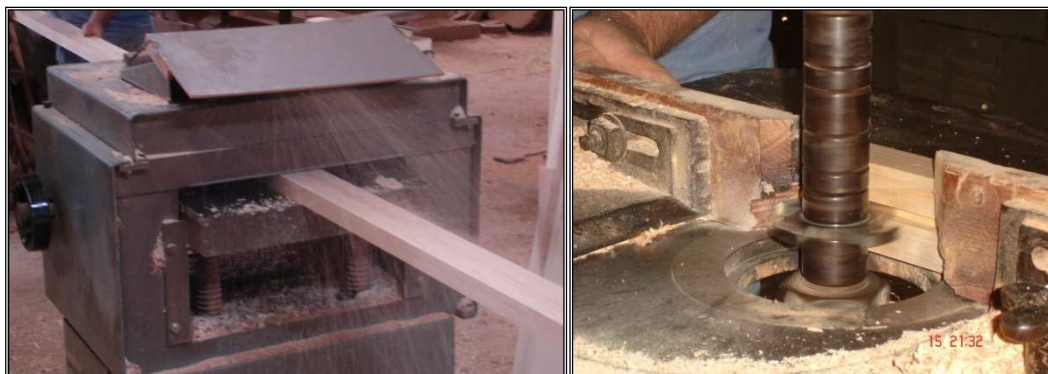


Figura 15- Beneficiamento das mesas de Pinus e realização de entalhe
Fonte: Autor.

Capa peça de madeira utilizada nas mesas das vigas foram caracterizadas por ensaio de flexão estática em quatro pontos, com arranjo bi-apoiado conforme figura 16. As peças foram submetidas a um carregamento monotônico crescente de 10 MPa/min e os deslocamentos

foram registrados por transdutores de deslocamento, tipo relógio comparador da marca *Mitutoyo modelo 543-682B*.



Figura 16- Arranjo bi-apoiado para ensaio de módulo de elasticidade das mesas.
Fonte: Autor.

Tabela 2– Valores dos módulos de elasticidade das mesas com seção encaixe “V”.

Mesa	1V	2V	3V	4V	5V	6V
E (MPa)	12118	14001	9263	13868	11492	11431

Tabela 3 – Valores dos módulos de elasticidade das mesas com seção encaixe “Retangular”.

Mesa	1R	2R	3R	4R	5R	6R
E (MPa)	8499	11190	9667	11892	13693	14182

5.2 VIGAS “I-JOIST”

Após a verificação das características mecânicas das mesas, realizou-se a montagem das vigas “I”. Foram produzidas seis vigas em escala real, sendo três para cada geometria conforme figura 17, estas foram coladas e prensadas até a cura do adesivo, figura 18.

dimensões em centímetros.

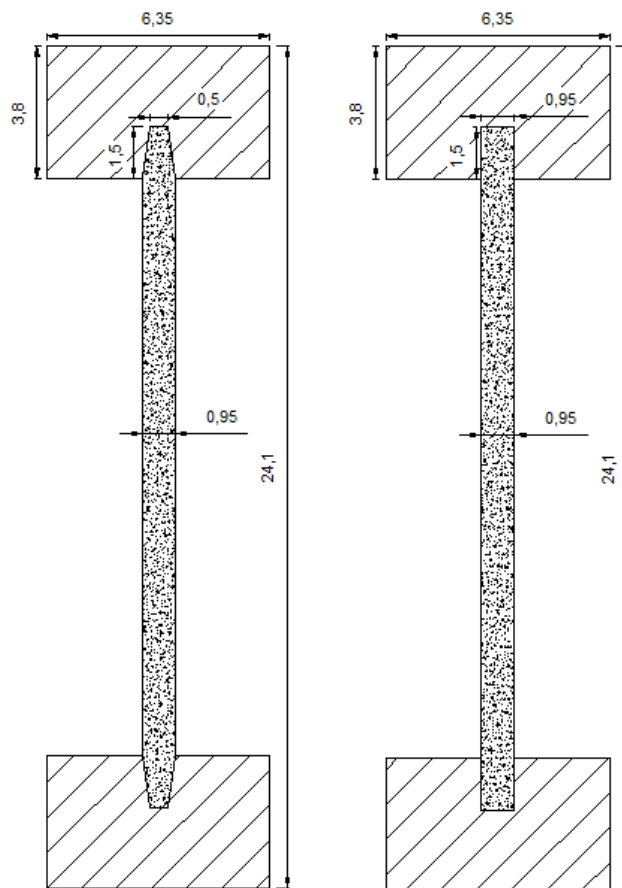


Figura 17- Seção transversal das vigas, detalhe dos encaixes
Fonte: Autor.



Figura 18- Montagem da viga “I”
Fonte: Autor.

Após a fabricação das vigas compostas, foram realizados os ensaios estáticos para a determinação da rigidez efetiva experimental e a capacidade de carga das vigas.

5.3 ENSAIO DAS VIGAS

Os ensaios estáticos foram realizados no pórtico de reação, este composto de uma estrutura metálica combinada com um pistão hidráulico acoplado em uma célula de carga com capacidade de 100 kN.

Conforme figura 19, a viga bi-apoiada foi contraventada evitando assim uma possível instabilidade lateral durante o ensaio. Para obter o módulo de elasticidade (E) das vigas, foi aplicada uma força de 15 kN, com relógios comparadores locados nos extremos e na parte inferior central da viga. De posse desses dados foi possível calcular o módulo de elasticidade das vigas.

Para a determinação da máxima capacidade de carga suportada pela viga o carregamento foi sendo aplicado de forma monotônica crescente até a ruína da viga, registrando-se o valor da força aplicada.



Figura 19- Arranjo para ensaio
Fonte: Autor.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos do programa experimental realizado nesta pesquisa. Os respectivos procedimentos de ensaios foram descritos no capítulo 5 - Materiais e Métodos. Os resultados estão apresentados em forma de tabelas.

Tabela 4 – Resultados dos ensaios para viga 1 com encaixe retangular.

Análise Teórica - Viga 1 - Encaixe Retangular			
Dados	Dados Mesa 1	Dados Alma	Dados Mesa 2
Base (cm)	6,4	0,95	6,4
Altura (cm)	3,8	16,5	3,8
E (MPa)	8499	17300	11190
Inércia (cm ⁴)	29,3	355,6	29,3
Rigidez Efetiva (MN.m)		560,61	
$\tau_{máx. OSB}$ (MPa)		7,50	
δ (cm)		1,16	
V(KN)		30,06	
I _{peça} (cm ⁴)		5395,91	
Ensaio Estático - Viga 1 - Encaixe Retangular			
Rigidez Efetiva (MN.m)		601,96	
V(KN)		32,28	

Tabela 5 – Resultados dos ensaios para viga 2 com encaixe retangular.

Análise Teórica - Viga 2 - Encaixe Retangular			
Dados	Dados Mesa 3	Dados Alma	Dados Mesa 4
Base (cm)	6,4	0,95	6,4
Altura (cm)	3,8	16,5	3,8
E (MPa)	9667	17300	11892
Inércia (cm ⁴)	29,3	355,6	29,3
Rigidez Efetiva (MN.m)		607,99	
$\tau_{máx.}$ OSB (MPa)		7,50	
$\delta_{(cm)}$		1,04	
V(KN)		29,41	
I _{peça} (cm ⁴)		5395,91	
Ensaio Estático - Viga 2 - Encaixe Retangular			
Rigidez Efetiva (MN.m)		475,43	
V(KN)		23,00	

Tabela 6 – Resultados dos ensaios para viga 3 com encaixe retangular.

Análise Teórica - Viga 3 - Encaixe Retangular			
Dados	Dados Mesa 1	Dados Alma	Dados Mesa 2
Base (cm)	6,4	0,95	6,4
Altura (cm)	3,8	16,5	3,8
E (MPa)	13693	17300	14182
Inércia (cm^4)	29,3	355,6	29,3
Rigidez Efetiva (MN.m)		768,10	
$\tau_{máx.}$ OSB (MPa)		7,50	
$\delta_{(cm)}$		0,78	
$V_{(KN)}$		27,78	
$I_{peça}$ (cm^4)		5395,91	
Ensaio Estático - Viga 3 - Encaixe Retangular			
Rigidez Efetiva (MN.m)		718,77	
$V_{(KN)}$		26,00	

Tabela 7 – Resultados dos ensaios para viga 1 com encaixe em "V".

Análise Teórica - Viga 1 - Encaixe "V"			
Dados	Dados Mesa 1	Dados Alma	Dados Mesa 6
Base (cm)	6,4	0,95	6,4
Altura (cm)	3,8	16,5	3,8
E (MPa)	12118	17300	11431
Inércia (cm ⁴)	27,12	355,6	27,12
Rigidez Efetiva (MN.m)		658,43	
$\tau_{m\acute{a}x.}$ OSB (MPa)		7,50	
$\delta_{(cm)}$		0,87	
V _(KN)		26,43	
I _{peça} (cm ⁴)		5395,91	
Ensaio Estático - Viga 1 - Encaixe "V"			
Rigidez Efetiva (MN.m)		864,37	
V _(KN)		34,69	

Tabela 8 – Resultados dos ensaios para viga 2 com encaixe "V".

Análise Teórica - Viga 2 - Encaixe "V"			
Dados	Dados Mesa 3	Dados Alma	Dados Mesa 4
Base (cm)	6,4	0,95	6,4
Altura (cm)	3,8	16,5	3,8
E (MPa)	9263	17300	13868
Inércia (cm ⁴)	27,12	355,6	27,12
Rigidez Efetiva (MN.m)		647,84	
$\tau_{máx.}$ OSB (MPa)		7,50	
$\delta_{(cm)}$		1,08	
V _(KN)		32,44	
I _{peça} (cm ⁴)		5395,91	
Ensaio Estático - Viga 2 - Encaixe "V"			
Rigidez Efetiva (MN.m)		748,53	
V _(KN)		37,48	

Tabela 9 – Resultados dos ensaios para viga 3 com encaixe “V”.

Dados	Dados Mesa 2	Dados Alma	Dados Mesa 5
Base (cm)	6,4	0,95	6,4
Altura (cm)	3,8	16,5	3,8
E (MPa)	11431	17300	11492
Inércia (cm ⁴)	27,12	355,6	27,12

Rigidez Efetiva (MN.m)	642,55
$\tau_{m\acute{a}x.}$ OSB (MPa)	7,50
δ (cm)	0,91
V(KN)	27,08
I _{peça} (cm ⁴)	5395,91

Ensaio Estático - Viga 3 - Encaixe "V"

Rigidez Efetiva (MN.m)	663,14
V(KN)	27,95

A Figura 20 apresenta diagrama comparativo entre os valores de Rigidez Efetiva teórica e experimental para cada uma das vigas analisadas.

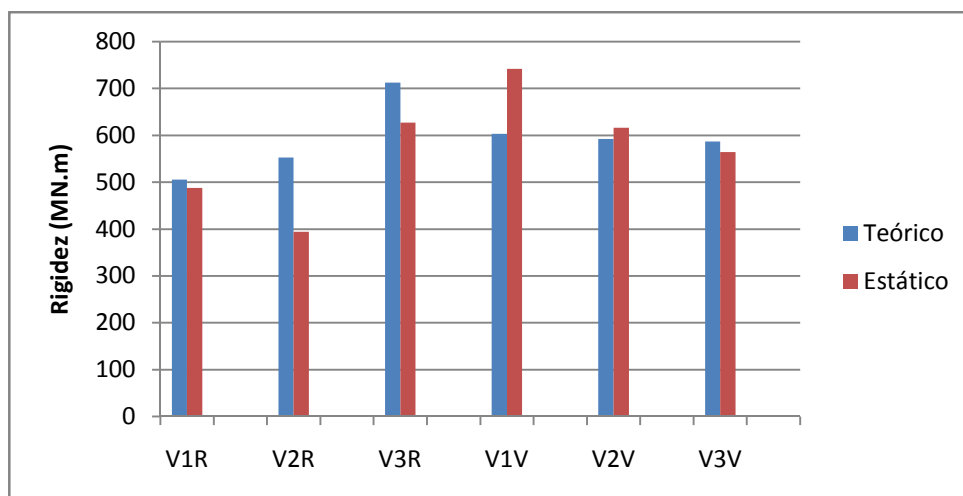


Figura 200- Comparativo das metodologias de ensaio
Fonte: Autor.

Com os diagramas de rigidez e de capacidade de carga das seis vigas analisadas, pode-se observar que não há grandes diferenças de comportamento entre as vigas com encaixe retangular e vigas com encaixe em “V”. Nota-se também que a viga V2R apresentou resultados inferiores às outras devido a problemas de instabilidade na alma verificada durante o ensaio.

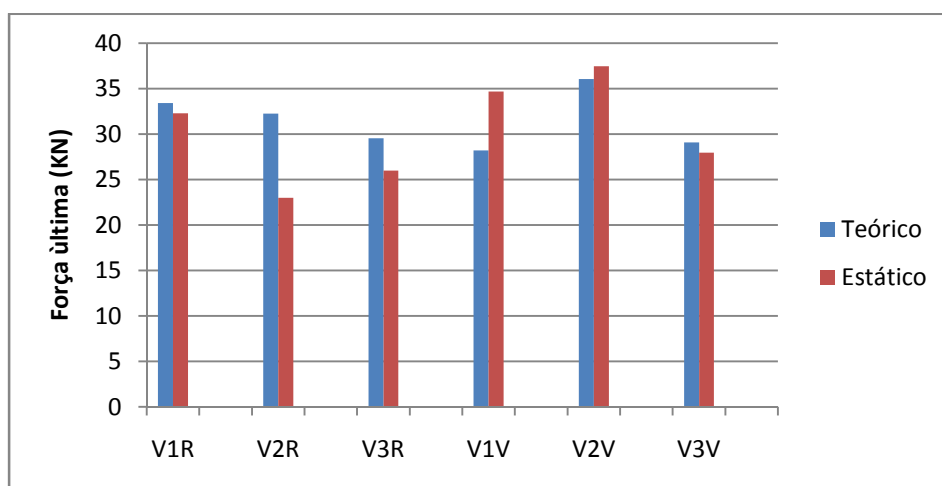


Figura 211- Comparativo das vigas à capacidade de carga (força última).
Fonte: Autor.

O modo de ruptura característico foi o de cisalhamento na alma próximo da região de um dos apoios, com exceção da viga V2R que teve problemas de instabilidade na alma. Pode-se observar também uma homogeneidade nos valores de carga de ruptura tanto teóricos quanto experimentais, principalmente devido ao modo de ruptura por cisalhamento na alma. Como a alma é composta por um produto industrializado “OSB”, fabricado com rígido controle de qualidade, e com propriedades mecânicas homogêneas, as vigas “I” também apresentaram as mesmas características.

7 CONCLUSÕES

- Para as vigas “I” analisadas por meio de modelos teóricos utilizando-se das propriedades dos materiais que compõem estas vigas (mesas e alma). A maioria dos resultados teóricos foram superiores comparados aos resultados obtidos nos ensaios estáticos. Isto ocorreu, por não considerarmos parcela da tensão de cisalhamento nos cálculos.

- Para estimar propriedades de resistência e rigidez da viga “I”, faz-se necessário considerarmos a tensão de cisalhamento nos cálculos de dimensionamento, assim é possível estimar propriedades do produto final.

- Apesar de observar diferenças significativas na viga V2R ocasionadas por instabilidade da alma nos ensaios, houve grande homogeneidade nos resultados apresentados.

- Quanto à geometria dos encaixes entre as mesas e alma, não foi possível verificar diferenças significativas na rigidez e cisalhamento da alma nas vigas ensaiadas.

- O modo de ruptura característico foi o de cisalhamento na alma próximo da região de um dos apoios, com exceção da viga V2R que teve problemas de instabilidade na alma.

- Pode-se observar também uma grande homogeneidade nos valores de carga de ruptura tanto teóricos quanto experimentais, principalmente devido ao modo de ruptura por cisalhamento na alma.

- Como a alma é composta por um produto industrializado “OSB”, fabricado com rígido controle de qualidade, e com propriedades mecânicas homogêneas, as vigas “I” também apresentaram as mesmas características.

REFERÊNCIAS

FISETTE, PAUL. **The evolution of engineered wood I-joists**. 2000. Disponível em: http://www.umass.edu/bmatwt/publications/articles/i_joyist.html Acesso em 11 de janeiro de 2010.

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

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.

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

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.

PRADA, O. J. **Pré-fabricação e comportamento de vigas “I” em madeira**. Florianópolis, 2003. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina.

RACHER, P., BOCQUET, J. F., BOUCHAIR, A. **Effect of web stiffness on the bending behaviour of timber composite I-beams**. Universidade de Blaise Pascal, Campus de Cézeaux – França. 2005.

RELATÓRIO RIO + 20, (2012). Disponível em: <http://www.itamaraty.gov.br/relatorio-rio20>. Acessado em 07/07/13.

RIBEIRO, W. F. **Análise de diferente resinas e geometria de ligações para vigas de Madeira compostas em perfil I**. Campo Mourão, 2012. 52f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação de Engenharia Civil). UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

ROSS, R.J., ERICKSON, J. R. **I-JOISTS**. Program Director, Natural Resources Research Institute, University of Minnesota Duluth, chapter 7, USDA Forest Products Laboratory Madison, WI. 2006.

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**. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), UnB – Universidade de Brasília, Brasília – DF, 2008.

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), USP - Universidade de São Paulo, São Carlos. 2010.

STAMATO, G. C. **Resistência ao embutimento da madeira compensada.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), USP - Universidade de São Paulo, São Carlos. 1998.

WIJMA (**Wood I-Joist Manufacturers Association**), (2001). Disponível em: <http://www.i-joist.org/benefits.asp>. Acessado em 02/06/10.