

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

GIOVANI ROBERTO RIBEIRO

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO MECÂNICO
DE VIGAS DUPLO “I” COM EMENDAS LONGITUDINAIS DE ALMA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO

2013

GIOVANI ROBERTO RIBEIRO

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO MECÂNICO
DE VIGAS DUPLO “I” COM EMENDAS LONGITUDINAIS DE ALMA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação,
apresentado como requisito parcial para
obtenção de título de graduado em Engenharia
Civil, Universidade Tecnológica Federal do
Paraná.

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 23

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE VIGAS DUPLO
“I” COM EMENDAS LONGITUDINAIS DE ALMA**

por

Giovani Roberto Ribeiro

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 19:00 horas do dia 03 de setembro de 2013 como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

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

**Prof. Msc. Angelo Giovanni Bonfim
Corelhano**
(UTFPR)

**Prof. Dr. Petrônio Rodrigo Mello
Montezuma**
(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 Airton e Beth,

Aos meus irmãos e eternos amigos Fabiano e Cesar,

Aos meus familiares e amigos presentes em minha formação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me dar forças para enfrentar as dificuldades, saúde, alegrias e por me dar a oportunidade de conhecer pessoas especiais durante o curso.

Agradeço infinitamente aos meus pais Airton e Elizabeth por ficarem ao meu lado em todos os momentos, por demonstrarem seu amor incondicional, por todo apoio, pelos conselhos que me guiaram e foram fundamentais para a concretização desta graduação, a eles que se dedicam a entregar aos seus filhos um mundo melhor, AMO VOCÊS.

Aos meus irmãos Fabiano e Cesar pela imensurável amizade, convivência, conselhos, por sempre estarem juntos e dispostos a ajudar, pelos inesquecíveis momentos em nossa república tomando aquele Térés.

Ao meu orientador Professor Dr. Jorge Luis Nunes de Góes, pela preciosa orientação e amizade. Os teus conhecimentos e experiência foram, para mim, muito mais do que inspiração.

Agradeço a Isabelle Pereira Mari, por todo incentivo, compreensão e por estar presente em minha vida neste momento.

A toda minha família, foi essencial para alcançar este objetivo.

Aos meus amigos, todos sem exceção, pela grandiosa e importante amizade, por compreenderem os momentos em que estive ausente estudando.

A todos os professores da COECI – Coordenação de Engenharia Civil da UTFPR.

Ao técnico do laboratório de Estruturas da UTFPR, meu grande amigo Maiko Cristian Sedoski pela amizade, companheirismo e disposição de sempre.

RESUMO

RIBEIRO, Giovani. R. **AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE VIGAS DUPLO “I” COM EMENDAS LONGITUDINAIS DE ALMA.** 2013. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2013.

O crescimento da construção civil está se tornando mais competitivo e a necessidade de otimização nessa área vem aumentando. A utilização de produtos derivados da madeira vem ganhando destaque na construção civil principalmente devido à possibilidade de emprego de madeira proveniente de reflorestamento. As vigas “I”, também conhecidas como “I-Joists”, são um exemplo de produtos industrializados e derivados de madeira e apresentam uma vantagem estrutural que advém de sua elevada rigidez e resistência, ao mesmo tempo são leves e de fácil execução. O objetivo do trabalho foi estudar as vigas “I-Joists” com almas duplas a fim de verificar a influência deste modelo de seção transversal sobre o comportamento estrutural do elemento, bem como avaliar o efeito das emendas na alma. As vigas foram constituídas de duas mesas de madeira serrada provenientes da espécie *Pinus Taeda*, e duas almas de OSB (Painel de tiras de madeira orientadas). Nove (09) vigas de seção transversal duplo “I” em escala real foram montadas e divididas em três modelos, sendo um deles sem emenda na alma, outro com emenda assimétrica na alma e um último modelo com emenda simétrica na alma. Neste trabalho foi realizada a caracterização do material utilizado nas mesas, bem como a análise estrutural teórica e experimental através dos critérios de rigidez efetiva e de ruptura das vigas de seção transversal duplo “I”. Devido ao modo de falha se faz necessário a inclusão de enrijecedores principalmente na região dos apoios e nos pontos de aplicação de carga, sendo necessários mais trabalhos com o objetivo de compreender melhor o comportamento de flambagem local de alma para vigas I-Joists.

Palavras-chave: Vigas duplo “I”, I-Joists, Emendas na alma, OSB, Experimental.

ABSTRACT

RIBEIRO, Giovani. R. **EXPERIMENTAL EVALUATION OF MECHANICAL BEHAVIOR OF DOUBLE "I" BEAMS WITH WEB LONGITUDINAL SEAMS.** 2013. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2013.

The growth of the construction industry is becoming more competitive and the need for optimization in this area is increasing. The use of products derived from wood is gaining prominence in construction mainly due to the possibility of using wood from reforestation. The wood I-beam or I-Joists beams are an example of manufactured from wood and have a structural advantage that comes from their high stiffness and strength at the same time are light and easy to perform. The objective of this paper was study the "I-Joists" beams with double web in order to verify the influence of cross section model on the structural element, as well as evaluating the effect of the web union. The I beams were produced with two lumber flanges from Pinus Taeda and two OSB (Oriented Strand Board) web. Nine (09) double I-beams were produced and divided into three models, one of them seamlessly into the web, the other with asymmetrical seam in the web and the last one with symmetric splicing web. This work was characterized the material used in the flanges, theoretical and experimental structural analysis using the criteria of effective stiffness and rupture of the beams cross-section double "I". Due to the failure mode it is necessary to include stiffeners mainly in the region of the support and the points of load application, requiring more analisys in order to understand the behavior of web local buckling of I-beams.

Keywords: Double "I" beams, I-Joists, Web amendments, OSB, Experimental.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – PRODUTOS ENGENHEIRADOS DE MADEIRA.....	16
FIGURA 2 – POSICIONAMENTO DAS LÂMINAS DE ACORDO COM A ORIENTAÇÃO DAS PARTÍCULAS EM DOIS TIPOS DE OSB	17
FIGURA 3 - VIGAS "I" DE MADEIRA	18
FIGURA 4 – VIGAS COMPOSTAS COM MESAS EM MADEIRA MACIÇA E LVL E ALMA EM CHAPA DE COMPENSADO.....	20
FIGURA 5 – DIMENSÕES DE FABRICAÇÃO DE VIGAS "I"	21
FIGURA 6– MODELOS DE GEOMETRIA.....	22
FIGURA 7 – CARGA MÉDIA DE RUPTURA.	22
FIGURA 8 – VIGAS "I" COM ENRIJECEDORES.	23
FIGURA 9 – TIPOS DE EMENDAS ENTRE ELEMENTOS	24
FIGURA 10– POSICIONAMENTO DAS EMENDAS	24
FIGURA 11– PRINCIPAIS MODOS DE FALHAS DAS VIGAS “I” EM TESTES FEITOS EM ESCALA REAL.	25
FIGURA 12 – CORPO DE PROVA DE CISALHAMENTO COM REFORÇO DE ALMA E ARRANJO PARA ENSAIO.	28
FIGURA 13 - DISTRIBUIÇÃO DA DEFORMAÇÃO, TENSÃO E FORÇA DE VIGAS "I" SUBMETIDAS A MOMENTO.	30
FIGURA 14– DISTRIBUIÇÃO DA DEFORMAÇÃO, TENSÃO E FORÇA DE VIGAS “I” SUBMETIDAS AO CISALHAMENTO.	30
FIGURA 15 – DIMENSÕES DAS VIGAS FEITAS COM PAINÉIS ESTRUTURAIS.	31
FIGURA 16 – SEÇÕES TRANSVERSAIS E DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES DO EUROCODE 5.....	32
FIGURA 17–SEÇÃO TRANSFORMADA PARA VIGA “I” COM TRÊS ELEMENTOS.	34
FIGURA 18 – COTAS PARA O CÁLCULO DO CENTRO DE GRAVIDADE DA SEÇÃO TRANSVERSAL.	35
FIGURA 19 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA VIGA DUPLO “I” ESTUDADA.....	36
FIGURA 20 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA PARA CÁLCULO DO MOMENTO ESTÁTICO.	38
FIGURA 21 – CÁLCULO DE FLECHA PARA VIGAS I-JOISTS CONSIDERANDO A DEFORMAÇÃO POR CISALHAMENTO.....	40
FIGURA 22 – CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS	42
FIGURA 23 – ARRANJO PARA O ENSAIO DE COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS.	43
FIGURA 24 – DIAGRAMA DE CARREGAMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA RIGIDEZ DA MADEIRA À COMPRESSÃO	43
FIGURA 25 – PROCESSO DE CONFECÇÃO DAS MESAS	44
FIGURA 26 – ENSAIO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS MESAS.....	45
FIGURA 27 – PROCESSO DE CONFECÇÃO DAS ALMAS	46
FIGURA 28 – COLAGEM DAS VIGAS.....	47
FIGURA 29 – SEÇÃO DUPLO ‘I’ SEM EMENDAS NAS ALMAS	47
FIGURA 30 – SEÇÃO DUPLO “I” COM EMENDA SIMÉTRICA NAS DUAS ALMAS	48
FIGURA 31 – SEÇÃO DUPLO “I” COM EMENDA ASSIMÉTRICA NAS ALMAS.....	48
FIGURA 32 – SEÇÃO TRANSVERSAL DUPLO “I”	48
FIGURA 33 – VIGAS CONFECCIONADAS.....	49

FIGURA 34 – ARRANJO PARA ENSAIO DAS VIGAS	50
FIGURA 35 – COMPARATIVO ENTRE RIGIDEZ EFETIVA TEÓRICA E EXPERIMENTAL	54
FIGURA 36 – COMPARATIVO ENTRE VALORES DE FLECHA TEÓRICA E EXPERIMENTAL	55
FIGURA 37 – COMPARATIVO ENTRE VALORES DE FORÇA DE RUPTURA TEÓRICA E EXPERIMENTAL ..	56
FIGURA 38 – DIFERENÇA DE CAPACIDADE DE CARGA ENTRE OS TRÊS MODELOS ESTUDADOS ..	57
FIGURA 39 – COMPARATIVO DAS FALHAS OBSERVADAS COM AS DA FIGURA 11	58

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – MÁXIMA CAPACIDADE DE CARGA, TENSÃO PRINCIPAL MÁXIMA E TENSÃO PRINCIPAL MÁXIMA DE CISALHAMENTO.....	20
TABELA 2 – ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COLAGEM	29
TABELA 3 – VALORES MÉDIOS PARA RESISTÊNCIA E MÓDULO DE ELASTICIDADE À COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS DE CADA UMA DAS MESAS EMPREGADAS NOS ESTUDOS	51
TABELA 4 – VALORES DO MÓDULO DE ELASTICIDADE E UMIDADE DAS MESAS.....	52
TABELA 5 – TABELA COMPARATIVA ENTRE OS VALORES DE RIGIDEZ EFETIVA TEÓRICA E EXPERIMENTAL DAS VIGAS DE MADEIRA DE SEÇÃO DUPLO “I”	53
TABELA 6– TABELA COMPARATIVA ENTRE OS VALORES DE FLECHA TEÓRICA E EXPERIMENTAL DAS VIGAS DE MADEIRA DE SEÇÃO DUPLO “I”	54
TABELA 7 – TABELA COMPARATIVA ENTRE OS VALORES DE FORÇA DE RUPTURA TEÓRICA E EXPERIMENTAL DAS VIGAS DE MADEIRA DE SEÇÃO DUPLO “I”	56

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	13
2.1 OBJETIVO GERAL	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3 JUSTIFICATIVAS	14
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
4.1 PRODUTOS ENGENHEIRADOS DE MADEIRA – (PEM)	15
4.2 OSB.....	16
4.3 A VIGA DE SEÇÃO TRANSVERSAL “I”	17
4.4 EMENDAS MESA – ALMA PARA I - JOISTS	21
4.5 TIPOS DE EMENDAS LONGITUDINAIS	23
4.6 MODOS DE FALHA DEVIDO AO CISALHAMENTO	25
4.7 A VIGA DE SEÇÃO TRANSVERSAL DUPLO “I”	27
4.8 ADESIVOS	28
4.9 HIPÓTESES DE CÁLCULO	29
4.9.1 Método da seção transformada para seção “I” formada com três peças de materiais diferentes	33
4.9.2 Método da seção transformada adaptado para a viga estudada.....	36
4.9.3 Cálculo das tensões normais e de cisalhamento	37
4.9.4 Estimativa de rigidez considerando a deformação por cisalhamento.....	39
5 METODOLOGIA	41
5.1 MATERIAIS	41
5.2 MÉTODOS	41
5.3 MONTAGEM DAS VIGAS DE SEÇÃO DUPLO “I”	44
5.4 ENSAIO DAS VIGAS.....	49
6 RESULTADO E DISCUSSÕES	51
6.1 ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO DAS MESAS	51
6.1.1 Compressão paralela às fibras.....	51
6.1.2 Umidade e módulo de elasticidade das mesas	52
6.2 CARACTERÍSTICAS DO OSB.....	53
6.3 ANÁLISE DAS VIGAS.....	53
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
REFERÊNCIAS	60
APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULO DA VIGA 1	64

1 INTRODUÇÃO

Atualmente o setor da construção civil vem presenciando um período de crescimento considerável, sendo a madeira e seus derivados um dos materiais de destaque. A evolução do uso da madeira na construção civil nacional tem por base questões ambientais e o melhor conhecimento das características do material. São destaques na madeira o fácil manuseio, excelente isolante térmico e acústico, baixa demanda de energia para sua produção, alta capacidade estrutural e ótima relação resistência/peso.

Para fins estruturais a madeira apresenta um excelente comportamento mecânico com alta resistência de tração e compressão, que quando utilizada de forma eficiente proporciona ambientes com arquitetura moderna podendo atender grandes vãos. Por outro lado, para que possa ser bem empregada, é necessário a utilização de técnicas adequadas, desde seu processo de produção até sua aplicação.

No Brasil, a aplicação de novas tecnologias em relação à madeira, não tem alcançado a evolução e divulgação como nos demais países, devido principalmente a falta de conhecimento técnico e cultura, mas pode-se dizer que está em evolução acentuada.

Com o desenvolvimento da construção civil, houve uma necessidade de se racionalizar a utilização dos materiais, buscando novos segmentos que agilizem o processo de industrialização devido à grande abundância de fontes existentes.

Um das tecnologias empregadas nas construções de madeira são as vigas I-Joists, constituídas por elementos de pequenas dimensões formando uma nova seção, com maior capacidade de carga. A grande vantagem na confecção dessas vigas é a possibilidade de se obter vigas de grandes dimensões e de baixo consumo de material, obtendo uma elevada rigidez.

Na pesquisa em questão foram estudadas especificamente vigas com alma em chapa de OSB (*Oriented Strand Board*) e as mesas – superior e inferior de *pinus taeda*. Para analisar o desempenho estrutural das vigas I foram comparados os resultados do modelo teórico com os obtidos através dos experimentos das vigas. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Sistemas Estruturais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Campo Mourão – PR.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o comportamento estrutural de vigas duplo “I” com emendas longitudinais de alma.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar a influência das emendas longitudinais de alma sobre o comportamento estrutural do elemento.
- Determinar as propriedades mecânicas dos materiais em estudo.
- Avaliar experimentalmente a contribuição do uso de alma dupla para o comportamento de vigas com emendas de alma.

3 JUSTIFICATIVAS

As vigas de seção duplo “I” podem ser formadas por mesas de madeira maciça ou LVL (*Laminated Veneer Lumber*) e, a alma pode ser formada de compensado (*Plywood*) ou OSB (*Oriented Strand Board*). A distância entre as mesas superior e inferior proporciona uma elevada rigidez à flexão e é responsável por suportar a maior parte do momento fletor. Já a alma é responsável por absorver a maior parte da força cortante.

Com a seção duplo “I” tem-se a possibilidade de realizar as emendas longitudinais das almas de forma assimétrica. A intenção é reduzir o efeito local de perda na continuidade da alma. Sendo assim espera-se que vigas duplo “I” tenham melhores comportamentos mecânicos se comparados com as vigas “I” simples (somente uma alma).

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A utilização da madeira tem mostrado um crescimento importante na construção civil, podendo ser empregada para diversos fins estruturais, tais como, residências, galpões, pontes, construções rurais, etc. Existe ainda um preconceito no que diz respeito à utilização da madeira na construção civil, isto se deve principalmente pela falta de conhecimento de profissionais na área sobre suas propriedades (RISSON, 2011).

Com o elevado custo de determinadas espécies de madeira, o mercado passa a substituir a madeira nativa para a madeira de reflorestamento, isto porque existem alternativas abundantes e preços mais competitivos (RÊGO, 2008).

Outra grande vantagem de utilizar estruturas em madeira é a facilidade no manuseio e agilidade na montagem das peças, possibilitando ainda alcançar grandes vãos com diferentes geometrias.

4.1 PRODUTOS ENGENHEIRADOS DE MADEIRA – (PEM)

Os produtos engenheirados são fabricados pela colagem de lâminas, partículas ou outros derivados da madeira, tornando-se um único elemento com características estruturais. A Associação da Madeira Engenheirada, APA (The Engineered Wood Association), classifica os produtos em quatro categorias: 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 folheado de madeira laminada (LVL); 4) as vigas em “I” de madeira, (THE ENGINEERED WOOD ASSOCIATION, 2007).

Silva (2010) afirma que os produtos engenheirados podem ser considerados como produtos industrializados mais eficientes, principalmente no quesito desenvolvimento sustentável e economia de material.

De acordo com Fiorelli (2005), os produtos desenvolvidos pela colagem de partículas de madeira têm por objetivo reduzir imperfeições como nó, fendas e medula, reduzindo significativamente as características de resistência e elasticidade da peça, comparando-se com a madeira nativa.

Os produtos engenheirados tiveram um crescimento significativo no mercado mundial. O LVL (*Laminated Veneer Lumber*), apresentou um crescimento acima de 66% entre os anos de 1998 e 2002, seguido pela Viga-I com 50%, e pela “Glulam” (*GlulamBeam*), com cerca de 38%. Esses valores mostram que os produtos engenheirados, vêm apresentando um crescimento superior ao apresentado pelo compensado (ABIMCI,2003). A Figura 1 mostra alguns tipos de produtos engenheirados de madeira.

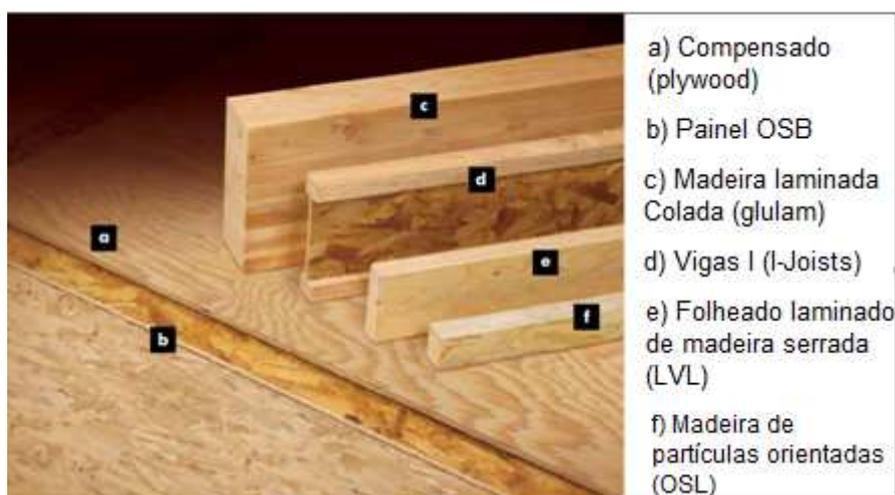


Figura 1 – Produtos Engenheirados de madeira
 Fonte: Adaptado de Engineered Wood Association (2010).

4.2 OSB

O OSB (*Oriented Strand Board*) é um PEM composto de 3 a 5 camadas de tiras de madeira (*strands*) aplicadas em diferentes direções melhorando a estabilidade dimensional da superfície do painel. Seguindo o mesmo princípio do compensado em que as lâminas são colocadas perpendicularmente uma das outras. Produzido predominantemente a partir de madeira de reflorestamento, que quando selecionados, podem ser utilizados em diversas aplicações.

O processo de fabricação do OSB oriundo de árvores de crescimento rápido, segue parâmetros e normas internacionais, iniciando com a extração das toras nas florestas, que são abatidas e transportadas para a fábrica para serem cascadas e picadas. O picador transforma a tora em pequenos cavacos de madeira conhecidos como strands, que depois são secos, classificados e, misturados com um adesivo à prova de água. A mistura é depositada em grandes esteiras contínuas, com

orientação definida em camadas, para melhor desempenho estrutural do material. Em seguida a camada de material depositada na esteira, também conhecida como colchão é prensada continuamente na presença de temperatura elevada, formando um painel contínuo. Durante todo este processo automatizado os painéis são monitorados, testados e certificados para atender rigorosos padrões de qualidade e uniformidade (OSBGUIDE,2013). A Figura 2 mostra o posicionamento das lâminas.

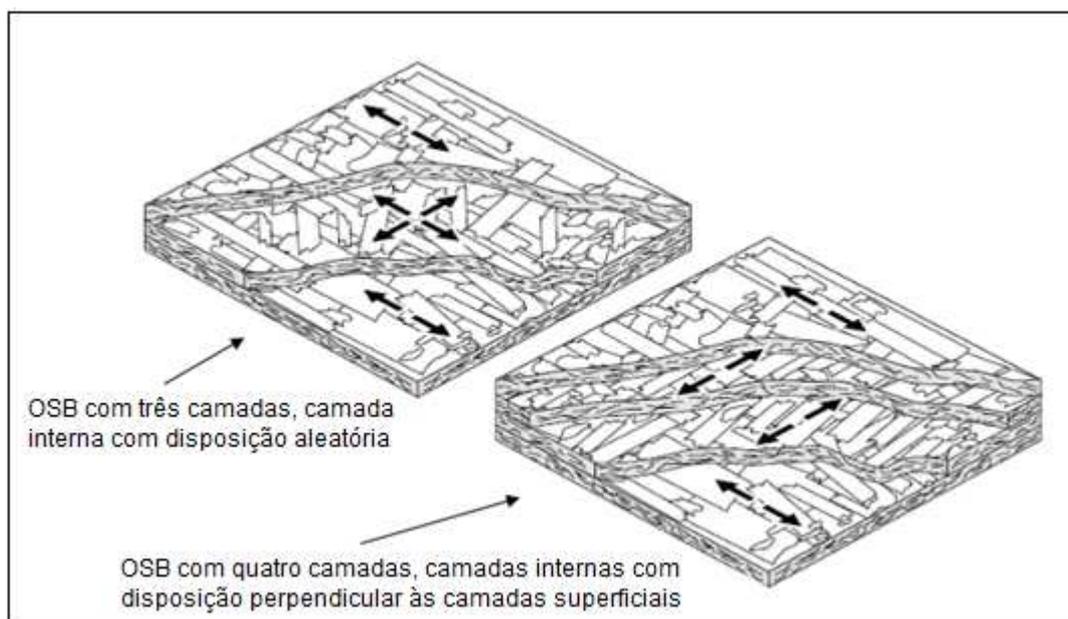


Figura 2 – Posicionamento das lâminas de acordo com a orientação das partículas em dois tipos de OSB

Fonte: Adaptado de (SBA, 2004).

De acordo com Del Menezzi (2004), as dimensões dos cavacos de madeira são 100 x 25 x 0.5 mm, sendo diferente da produção de painéis aglomerados comuns. Geralmente as dimensões dos painéis ofertadas no mercado são de 1220 x 2440 mm com espessura que variam de 9 a 38 mm.

4.3 A VIGA DE SEÇÃO TRANSVERSAL “I”

As vigas “I” mais conhecida como “*I-Joist*” ou “*I-Beam*”, são utilizadas na América do Norte e na Europa, por serem elementos mais leves que os elementos formados de madeira maciça e por apresentarem um ótimo desempenho estrutural. Esse modelo de viga é utilizado principalmente em coberturas, pelo fato de

trabalharem à flexão, e a tensão normal localiza-se mais nas extremidades da seção transversal da viga (SILVA, 2010).

De acordo com Ribeiro (2011), as vigas *I-Joists* representam um dos principais avanços dos Produtos Engenheirados de Madeira. Sabendo-se que suas características principais são leveza, elevada rigidez, resistência, confiabilidade e baixo consumo energético para sua produção.

Segundo Fissette (2000), o surgimento das vigas “I” iniciou-se em 1969, pela “Trus Joist Corporation” (hoje “Trus Joist MacMillan”). O modelo da seção foi originalmente elaborado pelo desempenho e não pelo preço. Projetos arquitetônicos da época buscavam alcançar grandes vãos, com as limitações dimensionais da madeira serrada, houve a necessidade de criar novos modelos estruturais que suprisse essa demanda. As vigas “I” eram formadas por grandes almas de compensado e as mesas de madeira serrada de árvores de menores dimensões, obtendo um maior vão livre.

Em 1977 as vigas “I” produzidas pela “Trus Joist Corporation” substituí as mesas de madeira serrada pelo LVL (*Laminated Veneer Lumber*), tornando sua produção em processo contínuo, possibilitando também alcançar grandes vãos. Com o passar dos anos estudos foram realizados e observaram que o OSB quando utilizado na alma proporciona maior resistência ao cisalhamento em relação ao compensado. A Figura 3 ilustra alguns modelos de vigas “I” com alma em OSB.



Figura 3– Vigas "I" de madeira
Fonte: Engineered Wood Construction (1999).

Para Silva (2010), a viga de seção transversal “I” em relação a uma viga retangular da mesma dimensão, indica que a redução de inércia é menor do que a perda de volume de material, comprovando que a viga “I” é mais eficiente por ter sua relação resistência/peso maior.

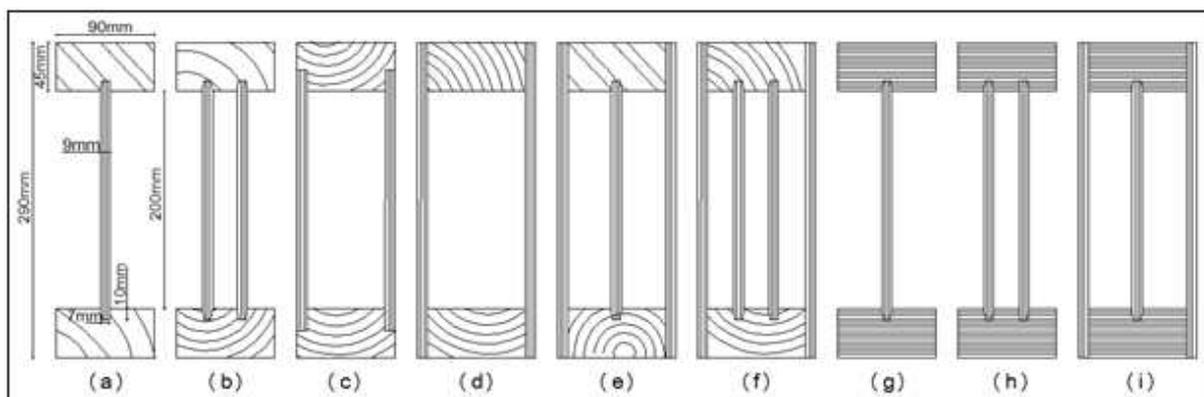
Segundo Risson (2011), a viga “I” é formada por um processo industrializado, no qual permite redução de defeitos internos da madeira, principalmente nos pontos mais solicitados.

De acordo com Lima (2005), estudos realizados para análise do comportamento estrutural de vigas “I” utilizando alma em OSB e a mesa em pinus, indicaram que o comportamento estrutural da viga está ligado diretamente pelo formato da ligação alma/mesa. Em ensaios realizados observou-se que as vigas “pregadas” atingiram uma capacidade de até 90 vezes o seu próprio peso. Já as vigas “coladas” e “coladas e pregadas” a capacidade superou 230 vezes o seu próprio peso. A ligação de alma/mesa com o adesivo proporcionou um desempenho mais eficiente fazendo com que a alma e a mesa atuem de forma monolítica.

Para Góes (2003), as ligações por pinos metálicos permitem o deslizamento entre peças unidas, esse deslizamento depende da rigidez da ligação, o qual causa redução nas propriedades mecânicas da peça. Este sistema de viga não possibilita emendas na direção longitudinal, estando seu comprimento restrito ao tamanho usual das peças de madeira serrada, fazendo com que estas vigas se limitam entre dimensões de 3 a 6 metros de vão, sendo utilizadas preferencialmente em residências, mesmo assim é de grande procura devido sua facilidade de aplicação e baixo custo.

O principal requisito dos elementos de ligação é a resistência, essas ligações devem transmitir os esforços de uma peça de madeira para a outra. Outro aspecto importante é a rigidez, o deslizamento entre as peças ligadas deve ser restringido de modo a não danificar o funcionamento da estrutura (PFEIL, 2003).

Em um estudo realizado por Jahromi et al. (2006), avaliaram o desempenho estrutural de nove modelos de vigas de madeira compostas com diferentes seções transversais. Como mostra a Figura 4.



(a) Seção "I"; (b) seção "I" com alma dupla; (c) seção caixão com encaixe; (d) seção caixão; (e) seção "I" caixão; (f) seção duplo "I" caixão; (g) seção "I" e LVL; (h) seção "I" com alma dupla e LVL; (i) seção "I" caixão e LVL.

Figura 4– Vigas compostas com mesas em madeira maciça e LVL e alma em chapa de compensado

Fonte: Adaptado de Jahromi et al. (2006).

Os resultados obtidos mostraram que o desempenho das vigas devido à abertura nas almas de 152 mm, fez com que a capacidade de carga diminuísse, as vigas com múltiplas almas apresentaram um melhor desempenho. O desempenho estrutural da viga de seção transversal duplo "I" obteve um resultado na capacidade de carga de 52% maior que a viga "I" simples e a viga de seção caixão resultou em uma capacidade de carga superior a 100% em relação à viga "I" simples. Já a seção caixão com encaixe, mostrada na Figura 4 (c), apresenta a menor capacidade de carga devido o formato da ligação. A Tabela 1 mostra a capacidade de carga e as tensões máximas de cada perfil.

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

Seção	Carga Máxima (kN)	$\sigma_{t,max}$ (N/mm ²)	$T_{s,max}$ (N/mm ²)
Seção "I"	25,91	0,13	0,47
Seção "I" Dupla	49,35	0,05	0,20
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	0,10	0,21
Seção "I" LVL	26,44	0,11	0,40
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).

Com o desenvolvimento de novos materiais e novos métodos para sistemas estruturais, houve uma necessidade de realizar e aprofundar estudos nas ligações, os elementos estruturais têm mostrado um crescimento considerável na construção civil, por esse motivo novos conceitos devem ser aperfeiçoados para o melhor dimensionamento, tendo em vista que a transmissão dos esforços na estrutura depende do comportamento das ligações (STAMATO e CALIL, 2002).

Existem diferentes dimensões de fabricação e modelos de utilização das vigas "I". A Figura 5 demonstra às principais dimensões comercializadas, sendo a série A com aberturas na alma para passagem de tubulações e série B sem aberturas.

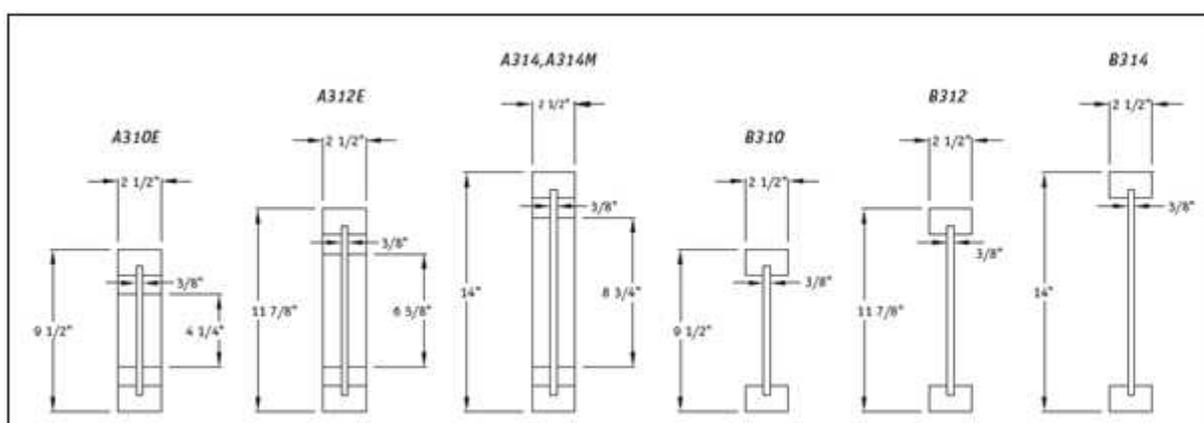


Figura 5– Dimensões de fabricação de vigas "I"
Fonte: Engineered Wood Association (2010).

4.4 EMENDAS MESA-ALMA PARA I-JOISTS

As ligações devem ser consideradas elementos fundamentais na segurança de estruturas de madeira. A falha de uma conexão pode ser responsável pelo colapso da estrutura (CALIL ET AL, 2003).

Para Ribeiro (2011), as ligações são os principais desafios para a fabricação das vigas *I-Joist* e vêm sendo estudadas com muita frequência em busca de resultados satisfatórios. O autor estudou quatro diferentes tipos de geometria no encaixe alma/mesa, garantindo eficiência e rigidez, sendo elas em "V", retangular, com dois sulcos e com dois sulcos ligeiramente inclinados. Conforme ilustra a Figura 6.

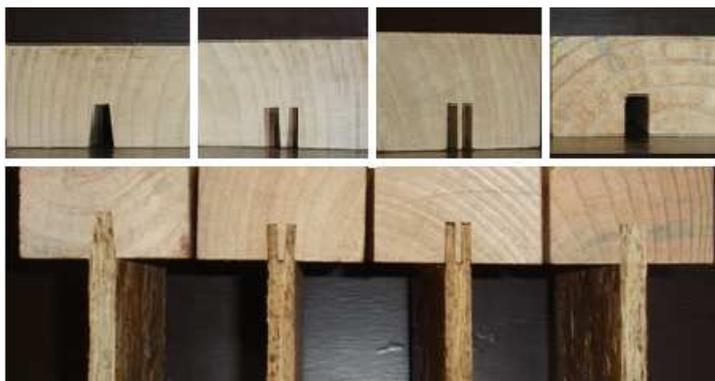


Figura 6—Modelos de geometria
Fonte: Ribeiro (2011).

A Figura 7 ilustra o comparativo das geometrias analisadas com suas respectivas cargas médias de ruptura.

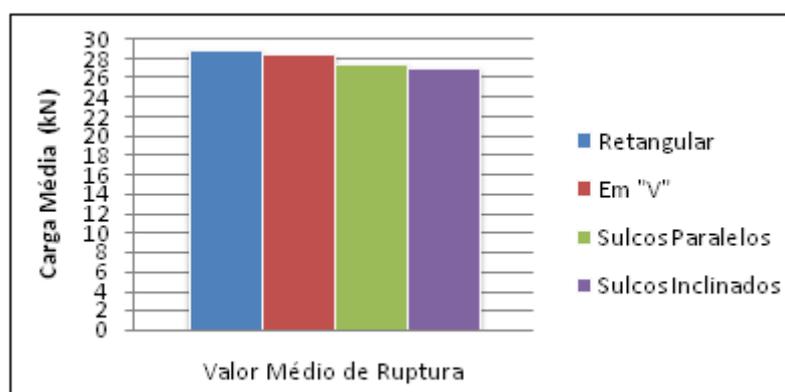


Figura 7 – Carga média de ruptura
Fonte: Ribeiro; Sedoski; Góes (2011).

Nota-se que a geometria retangular apresentou resistência superior às geometrias em forma de “V” e com sulcos paralelos e inclinados. Outra constatação foi a forma de ruptura do corpo de prova, onde as geometrias em V e retangular apresentaram ruptura por cisalhamento na chapa de OSB distante da ligação mesa-alma. Já os corpos de prova que utilizaram a geometria com sulcos paralelos e inclinados apresentaram ruptura na chapa de OSB na interface da ligação mesa-alma. Em nenhum dos casos houve descolamento da ligação. Ribeiro (2011) conclui que as ligações com geometria em forma retangular e em forma de “V” podem ser empregadas para vigas *I-Joists*.

Para Risson (2011), um dos aspectos mais importantes no projeto de vigas de seção transversal “I” é a garantia da estabilidade lateral para peças comprimidas,

pelo fato de serem peças esbeltas. Por esse motivo é necessário modificar o modelo da viga incluindo enrijecedores, conforme mostra a Figura 8.

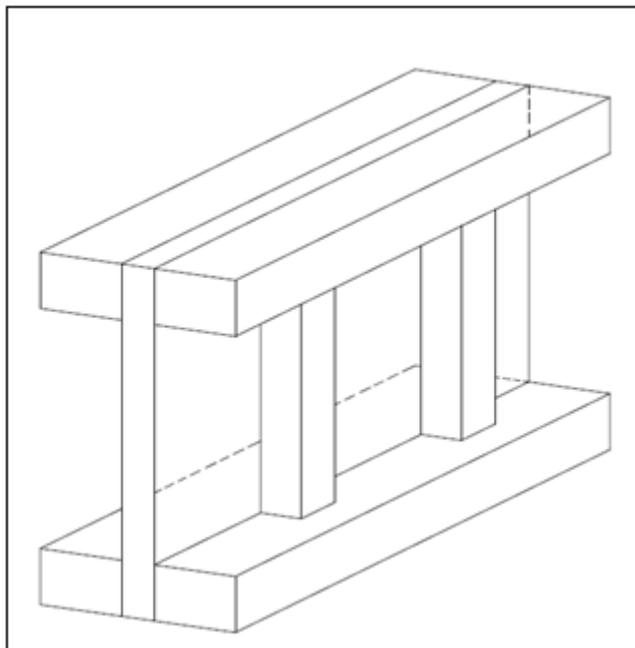


Figura 8–Viga “I” com enrijecedores
Fonte: Adaptado de Hanono(2001).

4.5 TIPOS DE EMENDAS LONGITUDINAIS

As emendas longitudinais de alma e mesa proporcionam uma vantagem nas estruturas de madeira, o comportamento dessas vigas depende de alguns fatores que devem ser seguidos, incluindo a mecânica e o formato geométrico dos componentes, podendo alcançar grandes vãos com um baixo volume de madeira.

Para Risson (2011), que estudou a utilização de vigas “I” para grandes vãos, as emendas das mesas pouco influenciam na resistência a tração, ao contrário da emenda da alma que, se não produzidas detalhadamente podem comprometer a estrutura. O módulo de elasticidade dessas vigas é pouco variável e aproximam-se do valor da rigidez da madeira serrada, tornando-se viável a utilização e possibilitando a economia de madeira quando comparado com outros métodos.

A madeira serrada possui limitação quanto ao seu comprimento, por isso modelos de emendas são estudados para aumentar essa dimensão. Segundo o Forest Products Laboratory, (2010) os tipos de emendas mais usuais são (A),

biselada (B), dentada horizontal (finger-joint) (C), dentada vertical (D) e dentada não estrutural (E), mostrada na Figura 9.

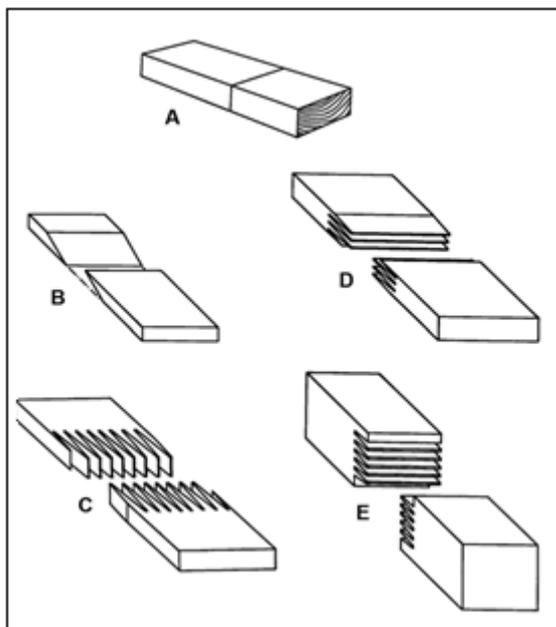
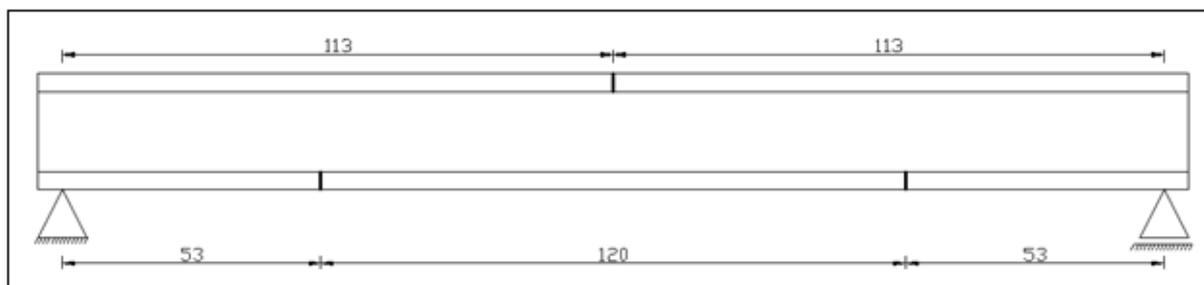


Figura 9 – Tipos de emenda entre elementos
Fonte: (USDA, 2010).

Para Silva; Pletz; Moura (2008), as emendas biseladas e dentadas nas vigas criam uma descontinuidade, dependendo da localização da emenda e do tipo de aplicação da carga na viga, com isso pode-se verificar as vantagens de implantação deste sistema estrutural, pois os valores obtidos ficaram próximos dos valores experimentais. Concluindo-se que qualquer uma das emendas pode ser produzida. A Figura 10 mostra o posicionamento das emendas utilizado pelos autores.



Medidas em centímetros*.

Figura 10 – Posicionamento das emendas
Fonte: Adaptado de Silva; Pletz; Moura (2008).

De acordo com Santos (2008), as emendas dentadas não estruturais e a de topo não são aconselháveis para utilização, tendo em vista que as mesas são os elementos que recebem os esforços de tração e compressão.

4.6 MODOS DE FALHA DEVIDO AO CISALHAMENTO

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. A Figura 11 apresenta os principais modos de falha (ASTM, 2004).

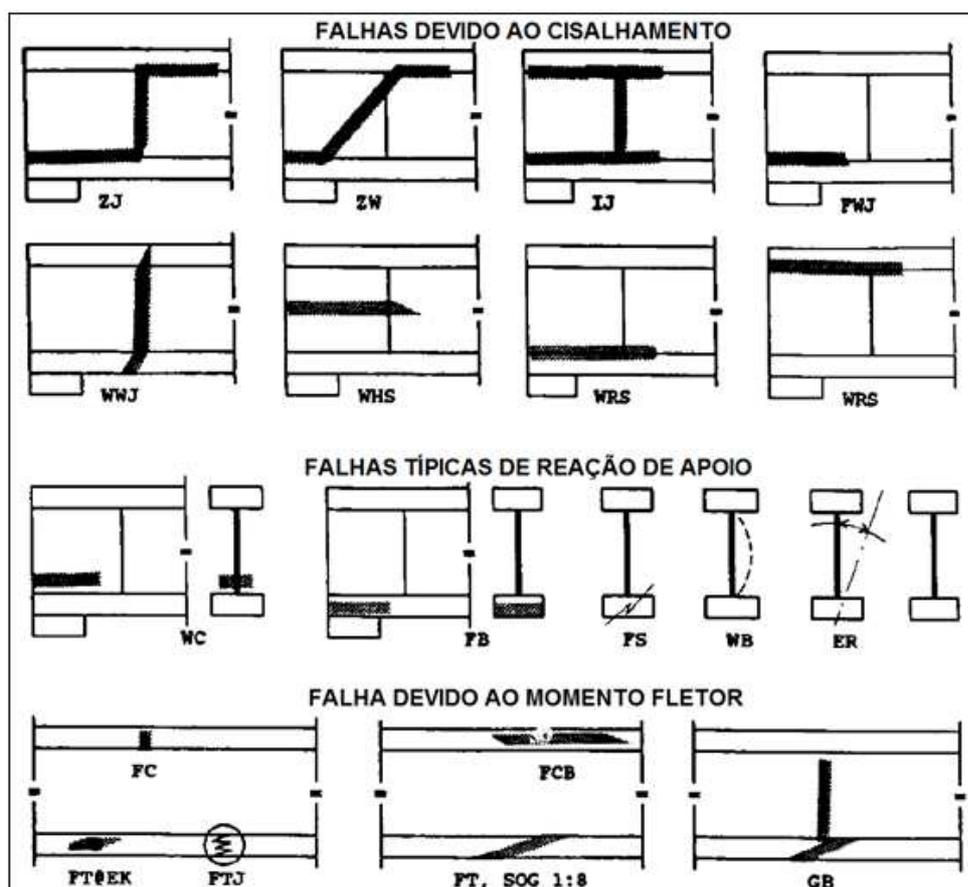


Figura 11 - Principais modos de falhas das vigas "I" em testes feitos em escala real
Fonte: ASTM (2004).

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 para os 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.

4.7 A VIGA DE SEÇÃO TRANSVERSAL DUPLO “I”

Risson (2011) avaliou o comportamento de sete vigas de madeira com 3 metros de comprimento e seção transversal duplo “I”. O autor realizou ensaios de flexão avaliando os tipos de falha e capacidade de carga de cada uma das vigas. Seguem os tipos de vigas e as respectivas emendas utilizadas no estudo de Risson (2011):

- Viga 1: Sem emendas na mesa; uma emenda na alma;
- Viga 2: Sem emendas na mesa; com oito emendas na alma;
- Viga 3: Sem emendas na mesa; com oito emendas na alma;
- Viga 4: Sem emendas na mesa; com oito emendas na alma;
- Viga 5: Com emendas dentadas na mesa; sem emendas na alma;
- Viga 6: Com emendas dentadas na mesa; sem emendas na alma;
- Viga 7: Com emendas dentadas na mesa; sem emendas na alma;

As combinações foram realizadas para analisar a interferência dos diferentes tipos de emendas que podem ter em uma viga “I”. Assim, foram obtidos os seguintes resultados, conforme o Gráfico1.



Gráfico 1 – Resistência a flexão das vigas

Fonte: Risson (2011).

Pode-se notar nos resultados de Risson (2011), a influência das emendas no comportamento das vigas. O autor afirma que as emendas devem ser executadas com zelo, pois são pontos importantes de falha.

Ainda não se encontram muitos trabalhos que abordem a questão de vigas com seção transversal duplo “I”, portanto, este estudo pretende contribuir e elucidar alguns aspectos sobre esse tema, tais como, a influência das emendas longitudinais de alma sobre o comportamento estrutural do elemento e também avaliar experimentalmente a contribuição do uso de alma dupla para o comportamento das vigas com emenda de alma.

4.8 ADESIVOS

(Ribeiro; Sedoski; Góes, 2011), analisaram oito diferentes marcas de resinas estruturais, sendo elas: Resina estrutural a base de Resorcinol-formaldeído (PRF) CASCOPHEN RS-216M própria para madeira e utilizada na indústria naval e as resinas a base de epóxi: COMPOUND (fluido), COMPOUND (Gel), RHEOPOX (Média fluidez), MSET EP (Pega normal), MSET EP (Pega lenta), SIKADUR 32 e SIKADUR 32 (Gel). Os testes foram realizados em corpos de prova com a mesma geometria, sendo utilizado o modelo de encaixe retangular, como mostra a Figura 12.



Figura 12–Corpo de prova de cisalhamento com reforço de alma e arranjo para ensaio

Fonte: Ribeiro; Sedoski; Góes (2011).

A Tabela 2 mostra a carga média de cada resina.

Tabela 2 - Ensaio de resistência à colagem.

Resinas	Carga média (kN)	Desvio padrão (kN)	Modo de ruptura
Cascophen	31,15	1,82	Cisalhamento na alma
Compound Fluido	23,47	1,87	Cisalhamento na alma
Compound Gel	28,10	2,10	Cisalhamento na alma
Rheopox (Média fluidez)	25,00	1,89	Cisalhamento na alma
M-Set EP (Pega normal)	31,75	1,90	Cisalhamento na alma
M-Set EP (Pega lenta)	24,12	1,72	Ligação descolada
Sikadur- 32	26,60	2,80	Ligação descolada
Sikadur - 32 gel	30,38	1,87	Cisalhamento na alma

Fonte: Ribeiro; Sedoski; Góes (2011).

Apenas duas resinas não apresentaram resultados satisfatórios, M-SET EP (pega lenta) e SIKADUR – 32, com deslocamento das emendas. Todas as outras resinas proporcionaram excelente resistência de colagem com alta capacidade de carga. Apesar dos excelentes resultados obtidos, outros estudos devem ser realizados com vistas ao comportamento das resinas sobre a influência de intempéries. Sendo assim, recomenda-se o uso do adesivo CASCOPHEN por ser de fácil aplicação e já ter sido testado em outras pesquisas no Brasil e no mundo.

4.9 HIPÓTESES DE CÁLCULO

A distância entre as mesas superior e inferior proporciona uma elevada rigidez à flexão e suporta a maior parte do momento fletor. Já a alma é responsável pela capacidade de carga referente ao cisalhamento, onde suporta a maior parte da força cortante. O cálculo das seções transversais é estudado por diversos autores. As vigas encontradas no mercado são produzidas utilizando adesivos rígidos para a ligação alma/mesa, onde elimina-se o deslizamento pelo cisalhamento, simplificando o cálculo (LEICHTI; FALK; LAUFENBERG, 1990). A Figura 13 e Figura 14 ilustram as tensões atuantes nas vigas devido ao momento fletor e ao cisalhamento.

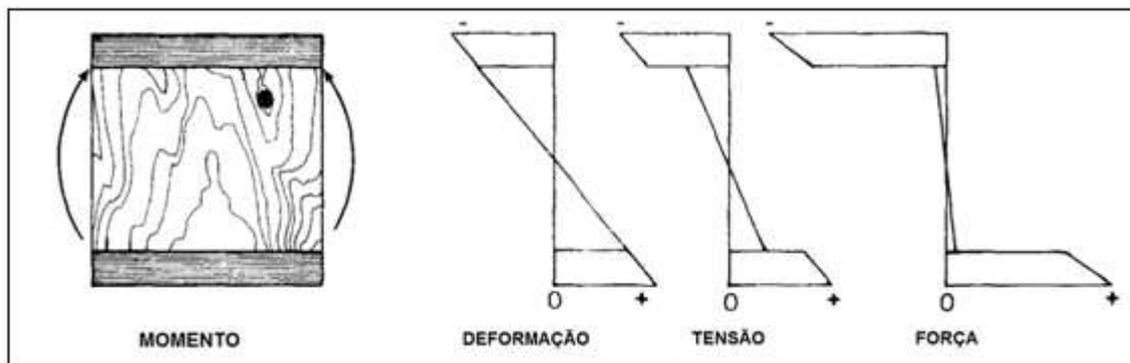


Figura 13 – Distribuição da deformação, tensão e força de vigas “I” submetidas a momento
Fonte: Leichti; Falk; Laufenberg (1990).

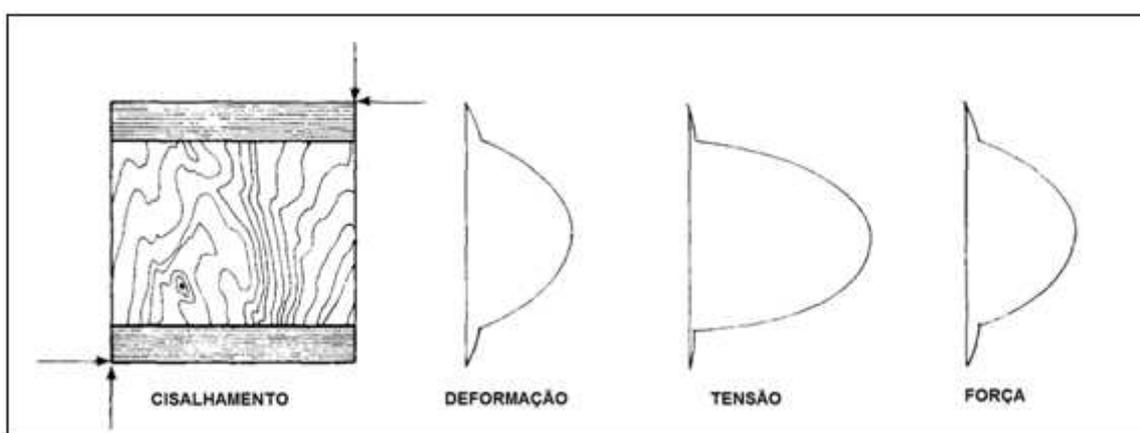


Figura 14–Distribuição da deformação, tensão e força de vigas “I” submetidas ao cisalhamento
Fonte: Leichti; Falk; Laufenberg (1990).

O modelo desenvolvido para o cálculo foi derivado de princípios básicos de mecânica dos sólidos, que servem para calcular as vigas com seção caixão e com seção “I”, apresentado pela USDA (1999), através das Equações abaixo é possível determinar a rigidez efetiva (EI) e as tensões de tração e compressão nas mesas (F_x). A Figura 15 mostra as dimensões das vigas.

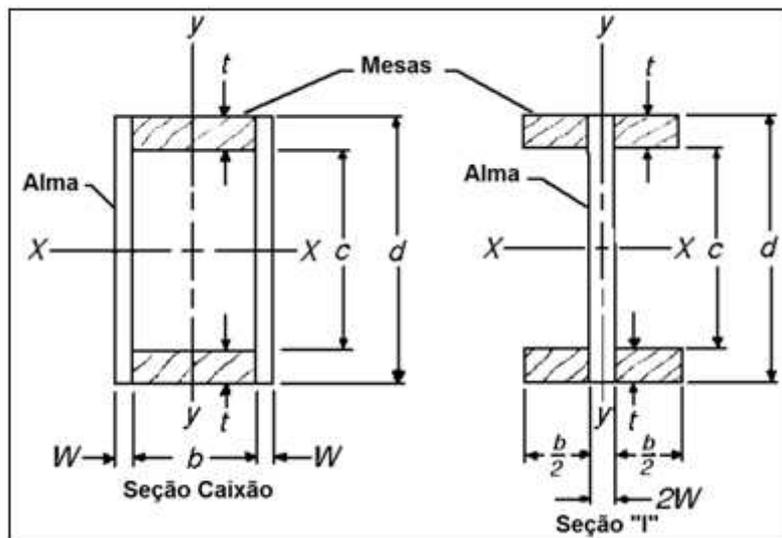


Figura 15 – Dimensões das vigas feitas com painéis estruturais
Fonte: (USDA, 1999).

Com a Equação (1) é possível calcular a rigidez efetiva:

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

Com a Equação (2) é possível calcular as tensões de tração e compressão nas mesas:

$$F_x = \frac{6M}{\left[\frac{(d^3 - c^3)b}{d} + \frac{(2E_w W d^2)}{e} \right]} \quad (2)$$

Onde:

EI = rigidez efetiva.

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

d, c, b e W = são dimensões de acordo com a Figura 15.

F_x = tensão nas mesas.

M = momento fletor.

Para Góes (2002) que estudou vigas I de madeiras pregadas, comparando com diversos modelos teóricos de comportamento mecânico, o modelo apresentado no EUROCODE 5 (1993) para o dimensionamento de vigas I de seção composta oferece a melhor solução, considerando que o mesmo conduz a resultados mais

precisos. O trabalho desenvolvido recentemente por (Sedoski; Ribeiro; Góes, 2011) comprovou a eficiência do modelo 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, podendo ser calculada a rigidez efetiva $(EI)_{ef}$, de acordo com a seguinte equação.

Com a Equação (3) é possível calcular a rigidez efetiva:

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

Onde:

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

E_i = módulo de elasticidade de cada peça, kN/cm².

I_i = momento de inércia de cada peça, cm⁴.

A_i = área de cada peça, cm².

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

A Figura 16 apresenta as seções transversais e a distribuição das tensões segundo o EUROCODE 5.

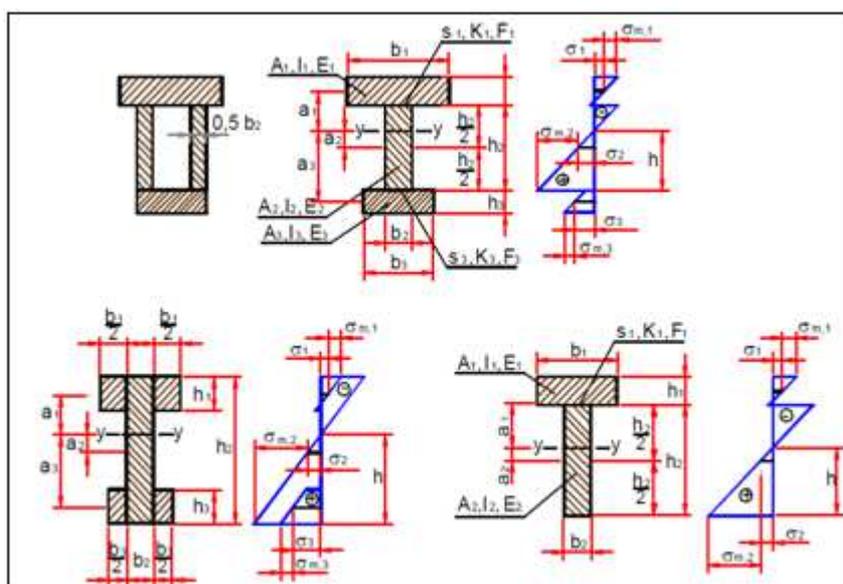


Figura 16– Seções transversais e distribuição de tensões do EUROCODE 5
Fonte: Góes (2002).

Para as vigas com seções transversais semelhantes as da Figura 16, podem ser calculadas as tensões normais e cisalhantes atuantes nas peças de acordo com as seguintes equações.

Com a Equação (4) é possível calcular as tensões normais:

$$\sigma = \frac{0,5E_i h_i M}{(EI)_{ef}} + E_i a_i \frac{M}{(EI)_{ef}} \quad (4)$$

Com a Equação (5) é possível calcular as tensões cisalhantes:

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

Onde:

σ = tensão normal na extremidade do elemento.

$\tau_{2,máx}$ = máxima tensão cisalhante na alma.

E_i = módulo de elasticidade de cada peça.

A_3 = área de cada peça.

M = momento fletor.

a_i , b_i e h_i = segundo a Figura 16.

4.9.1 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 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).

Com a equação (6) é possível determinar relações entre módulos de elasticidade:

$$n_1 = \frac{E_1}{E_c} \quad n_2 = \frac{E_2}{E_c} \quad n_3 = \frac{E_3}{E_c} \quad (6)$$

Onde:

$E_{1,2,3}$ = módulo de elasticidade de cada elemento.

E_c = módulo de elasticidade comparativo.

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

A Figura 17 apresenta a seção transversal para cálculo de viga “I” com três elementos.

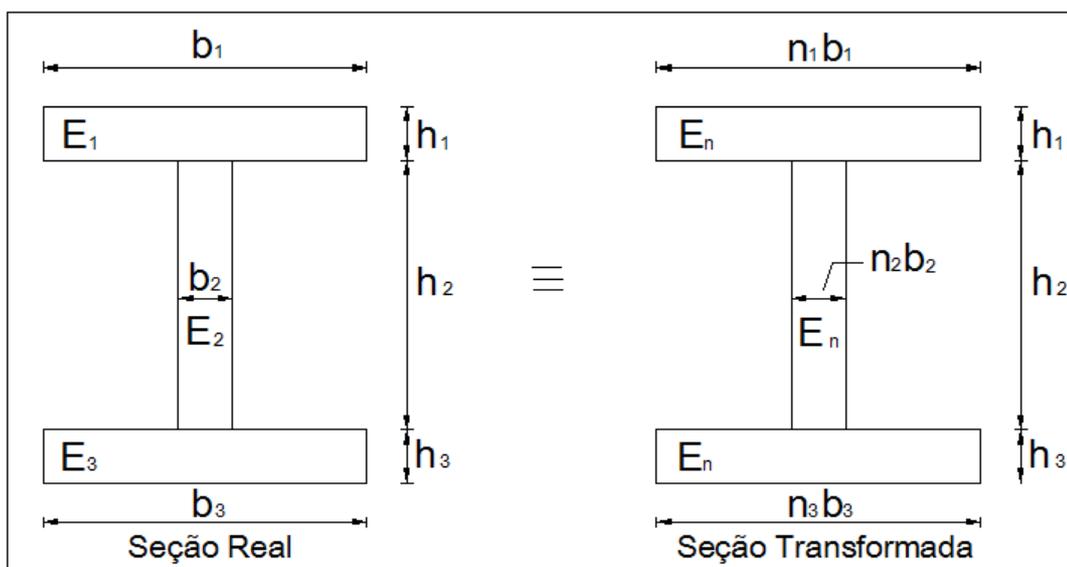


Figura 17 – Seção transformada para viga “I” com três elementos.

Com a equação (7) é possível determinar a área da seção transformada de cada peça.

$$A_1 = n_1 b_1 h_1 \quad A_2 = n_2 b_2 h_2 \quad A_3 = n_3 b_3 h_3 \quad (7)$$

Onde:

$b_{1,2,3}$ = largura de cada elemento.

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

A Figura 18 apresenta a seção transversal com suas respectivas cotas para cálculo do centro de gravidade.

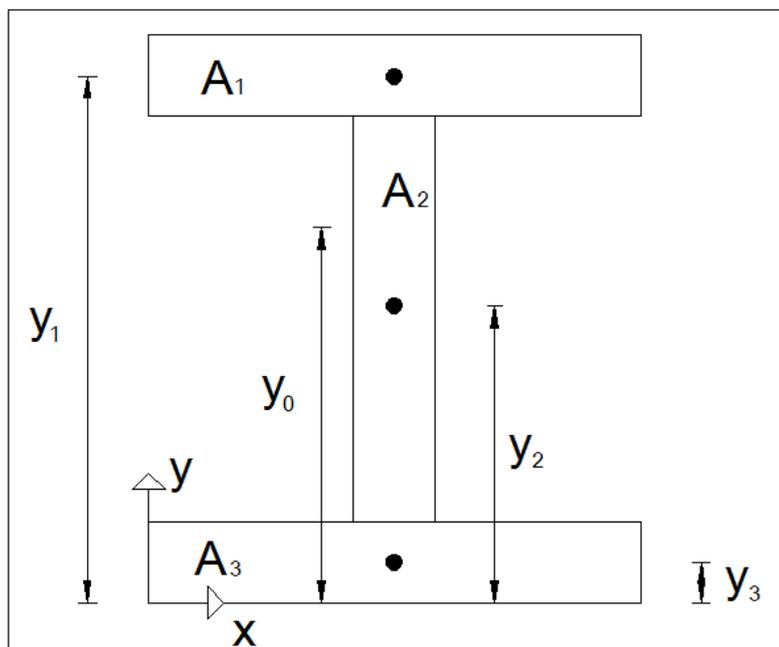


Figura 18–Cotas para o cálculo do centro de gravidade da seção transversal.

Com a equação (8) é possível determinar o centro de gravidade da seção transversal.

$$CG_{y_0} = \frac{y_1 A_1 + y_2 A_2 + y_3 A_3}{A_1 + A_2 + A_3} \quad (8)$$

Onde:

$y_{1,2,3}$ = distância do centro de gravidade de cada um dos elementos até a origem do sistema.

$A_{1,2,3}$ = área da seção transformada de cada um dos elementos.

Com a equação (9) é possível determinar a inércia efetiva da seção transversal.

$$I_{ef} = \frac{n_1 b_1 h_1^3}{12} + n_1 b_1 h_1 (y_1 - y_0)^2 \quad (9)$$

$$+ \frac{n_2 b_2 h_2^3}{12} + n_2 b_2 h_2 (y_2 - y_0)^2$$

$$+ \frac{n_3 b_3 h_3^3}{12} + n_3 b_3 h_3 (y_3 - y_0)^2$$

Onde:

I_{ef} = Inércia efetiva da seção transversal.

$[E_n I_{ef}]$ = Rigidez efetiva para a seção transformada.

4.9.2 Método da seção transformada adaptado para a viga estudada

A Figura 19 apresenta a seção transversal com suas respectivas distâncias para o cálculo do centro de gravidade da viga estudada.

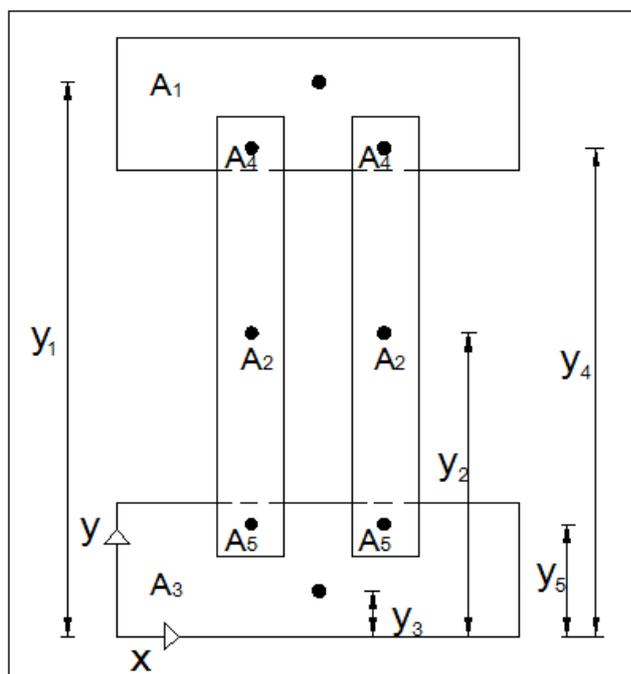


Figura 19–Representação gráfica da viga duplo “I” estudada.

Com a equação (10) é possível determinar relações entre módulos de elasticidade:

$$n_1 = \frac{E_1}{E_C} \quad n_2 = \frac{E_2}{E_C} \quad n_3 = \frac{E_3}{E_C} \quad (10)$$

Com a equação (11) é possível determinar o centro de gravidade da seção transversal.

$$CG_{y_0} = \frac{y_1 A_1 + 2y_2 A_2 + y_3 A_3 - 2y_4 A_4 - 2y_5 A_5}{A_1 + 2A_2 + A_3 - 2A_4 - 2A_5} \quad (11)$$

Com a equação (12) é possível determinar a inércia efetiva da seção transversal.

$$\begin{aligned} I_{ef} = & \frac{n_1 b_1 h_1^3}{12} + n_1 b_1 h_1 (y_1 - y_0)^2 \\ & + 2 \left[\frac{n_2 b_2 h_2^3}{12} + n_2 b_2 h_2 (y_2 - y_0)^2 \right] \\ & + \frac{n_3 b_3 h_3^3}{12} + n_3 b_3 h_3 (y_3 - y_0)^2 \\ & - 2 \left[\frac{n_1 b_4 h_4^3}{12} + n_1 b_4 h_4 (y_4 - y_0)^2 \right] \\ & - 2 \left[\frac{n_3 b_5 h_5^3}{12} + n_3 b_5 h_5 (y_5 - y_0)^2 \right] \end{aligned} \quad (12)$$

$[E_c I_{ef}]$ = Rigidez efetiva de resistência dos materiais teórica.

4.9.3 Cálculo das tensões normais e de cisalhamento

Considerando as hipóteses de Bernoulli-Navier de vigas, seguem as respectivas equações para o cálculo das tensões normais máximas e tensão de

cisalhamento máxima, considerando o ensaio de flexão com carregamento em quatro pontos.

$$\sigma = \frac{M}{I_{ef}} y \quad (13)$$

$$\frac{\sigma I_{ef}}{y} = \frac{PL}{6}$$

$$P = \frac{6\sigma_c I_{ef}}{Ly}$$

Onde:

σ = tensão normal.

I_{ef} = inércia efetiva de resistência dos materiais teórica.

L = distância entre apoios.

y = distância do ponto de análise até o centróide

A Figura 20 apresenta a seção transversal para cálculo do momento estático.

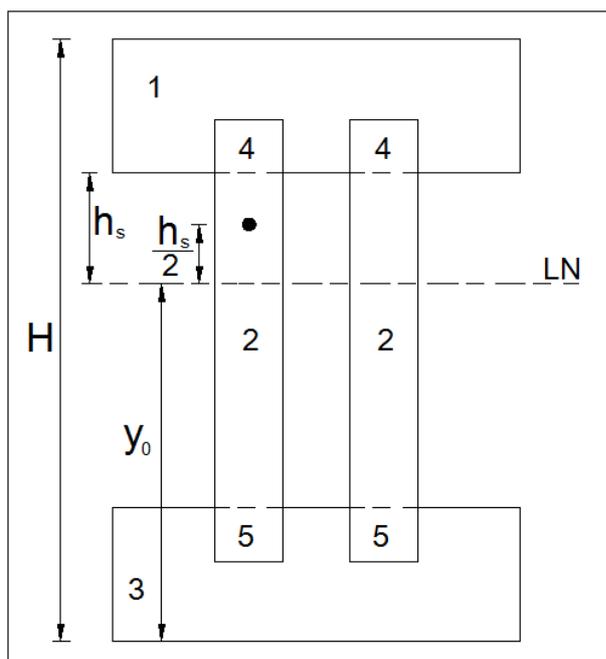


Figura 20–Representação gráfica para cálculo do momento estático.

Com a equação (14) é possível determinar o cálculo do momento estático.

$$M_s = n_1 b_1 h_1 (y_1 - y_0) + 2 \left[n_2 b_2 h_s \left(\frac{h_s}{2} \right) \right] - 2 \left[n_4 h_4 b_4 \left(h_s + \frac{h_4}{2} \right) \right] \quad (14)$$

Com a equação (15) é possível determinar a tensão de cisalhamento máxima.

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{VM_s}{I_{ef} 2b_2} \quad (15)$$

Onde:

M_s = Momento estático.

V =cortante.

I_{ef} =inércia efetiva.

b_2 =largura de uma alma.

4.9.4 Estimativa de rigidez considerando a deformação por cisalhamento

No comportamento das vigas *I-Joists* deve-se considerar a deformação por cisalhamento (GARBIN,2012). Sendo assim a (APA-PR310C), recomenda que sejam utilizadas as seguintes equações para o cálculo de flecha para vigas “I”:

$$\delta_{total} = \delta_{tens\tilde{a}o\ normal} + \delta_{tens\tilde{a}o\ cisalhante} \quad (16)$$

Segundo Rancourt (2008), a deformação devido à flexão deve ser calculada considerando as teorias de resistência dos materiais. A deformação por cisalhamento pode ser considerada como sendo:

$$\delta = \frac{8M}{K} \quad (17)$$

A Figura 21 apresenta métodos de cálculo de flecha para vigas *I-Joists* considerando a deformação por cisalhamento.

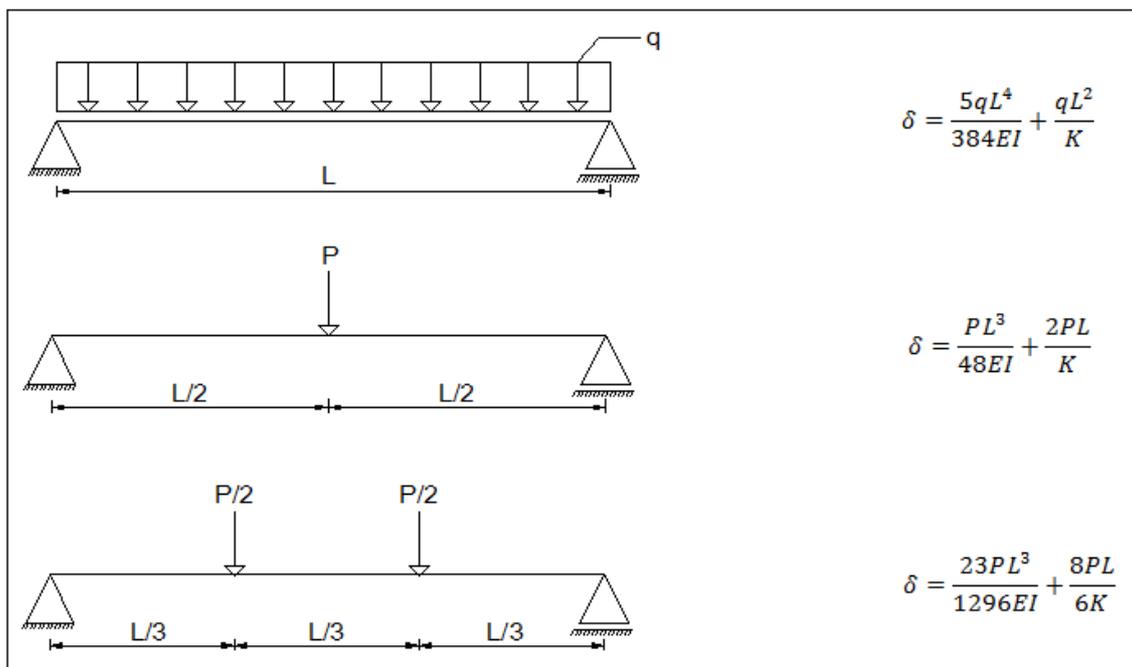


Figura 21–Cálculo de flecha para vigas *I-Joists* considerando a deformação por cisalhamento.

Onde:

δ =flecha máxima.

q =carregamento distribuído.

L =distância entre apoios.

EI =rigidez efetiva não considerando a deformação por cisalhamento.

K =coeficiente de deformação por cisalhamento para viga padrão (APA-PR310C)9,5”=23000kN).

5 METODOLOGIA

Para avaliar o desempenho estrutural das vigas de seção transversal duplo “I” foi realizado o estudo teórico e experimental. As vigas foram produzidas em escala real para os testes laboratoriais e comparados com resultados teóricos existentes.

Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Sistemas Estruturais 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

As madeiras foram doadas pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Campo Mourão, onde a espécie de *Pinus Taeda* utilizada nas mesas foi selecionada para padronização. Em seguida foram colocadas em tabiques para a secagem até a umidade de equilíbrio de 12% conforme a NBR 7190 (1997). A madeira foi aferida periodicamente através de medidor elétrico de umidade, estando próximo da condição seca a madeira foi classificada por um processo visual separando o máximo de peças isentas de defeitos, exemplo medula, trincas e nós.

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

O adesivo utilizado foi o fenol-resorcinol-formaldeído (PRF), o qual é encontrado no mercado 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%.

5.2 MÉTODOS

O ensaio de caracterização da madeira foi realizado de acordo com a NBR 7190 (1997), com ensaios de compressão paralela às fibras, que tem por objetivo determinar a resistência e a rigidez paralela às fibras da madeira. Foram retiradas 6 amostras de corpos de prova de cada mesa de regiões afastadas das extremidades das peças. Como as peças possuem pequenas dimensões a NBR 7190 permite

empregar corpos de prova com seção transversal quadrada, com lado igual à espessura do elemento, com pelo menos 1,8 cm, o comprimento deve ser três vezes o lado da seção transversal. A Figura 22 mostra os corpos de prova que têm as dimensões de 40x40x120 mm.



Figura 22 – 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 24. 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 23 mostra o arranjo para ensaio de compressão paralela às fibras.

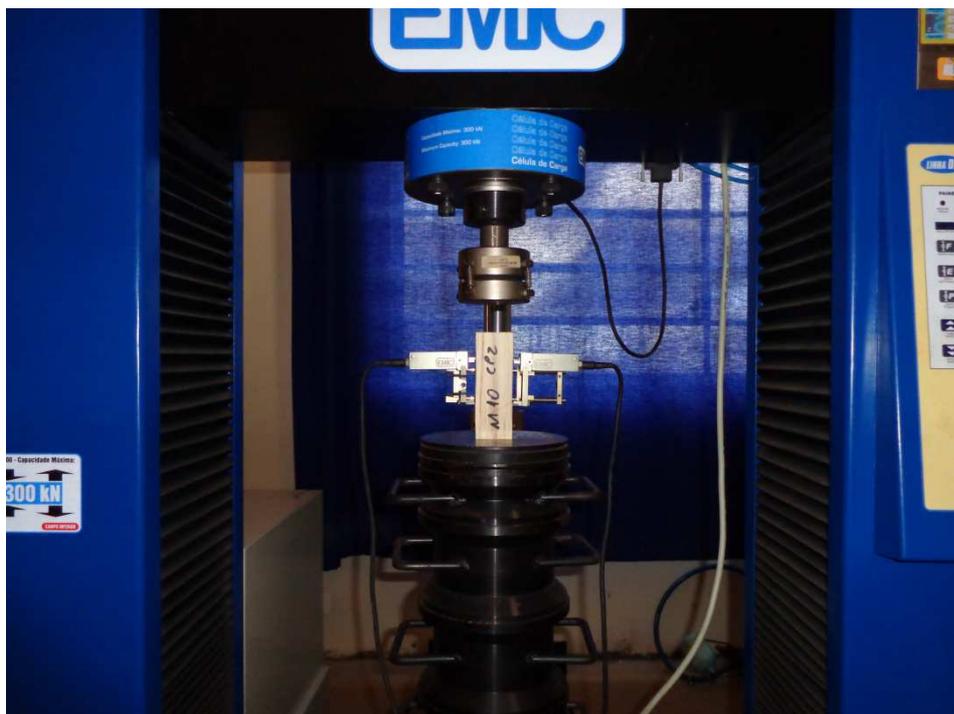


Figura 23 – Arranjo para o ensaio de compressão paralela às fibras.

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

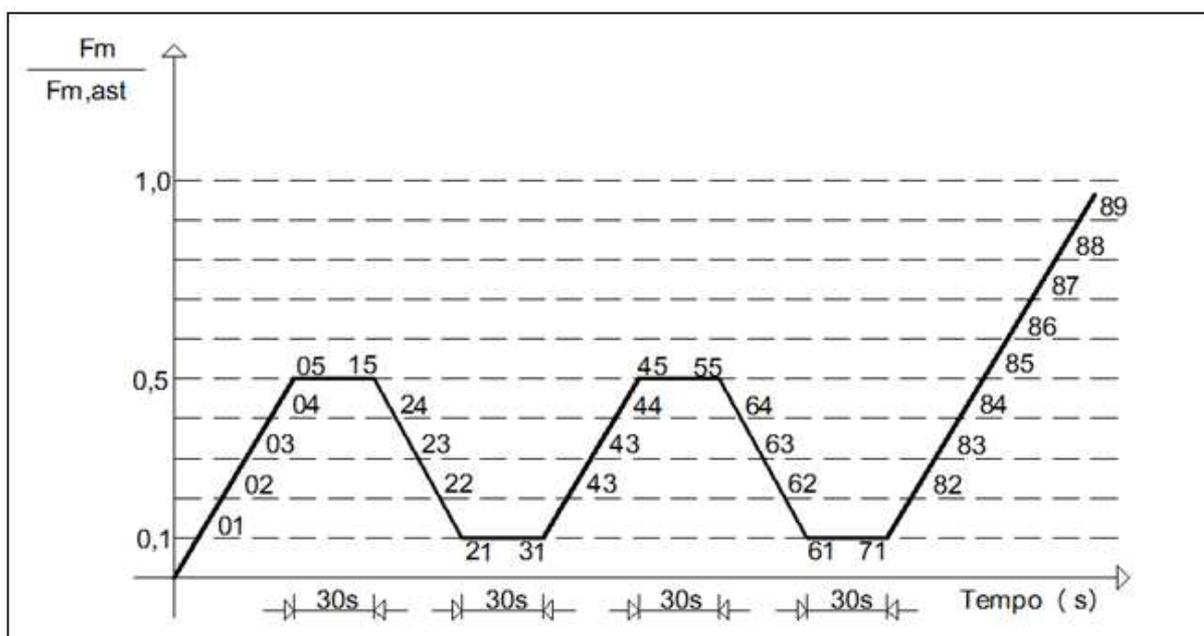


Figura 24 – Diagrama de carregamento para determinação da rigidez da madeira à compressão
Fonte: Adaptado de NBR 7190 (1997).

O teor de umidade de cada peça foi determinado por meio de medidor elétrico do modelo DL-2000.

5.3 MONTAGEM DAS VIGAS DE SEÇÃO DUPLO “I”

Após a caracterização da madeira, as mesmas passaram pelo processo de confecção das mesas, a saber: 1) foram cortadas no comprimento adequado com o auxílio da serra circular; 2) passou-se pela desgrossadeira e plaina chegando às dimensões corretas; 3) com o auxílio da tupia foi feito os sulcos para o encaixe da alma. A Figura 25 mostra o processo de confecção das mesas.



Figura 25 - 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 de acordo com a ASTM D198 (2002), a Figura 26 apresenta o arranjo para realização do ensaio.



Figura 26 – 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 flechas foram medidas com o auxílio de transdutores de deslocamento, conhecidos como relógios comparadores.

O módulo de elasticidade experimental das mesas foi calculado conforme a equação (18):

$$E_m = \frac{23PL^3}{1296I\delta} \quad (18)$$

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 mm⁴.

δ = flecha medida no centro do vão, em mm.

Após o ensaio das mesas, o OSB utilizado na alma das vigas passou por corte para adequação das dimensões especificadas anteriormente. Com o auxílio da tupa foi feito um pequeno rebaixo na alma para facilitar o encaixe com as mesas. A Figura 27 mostra o processo de confecção das almas.

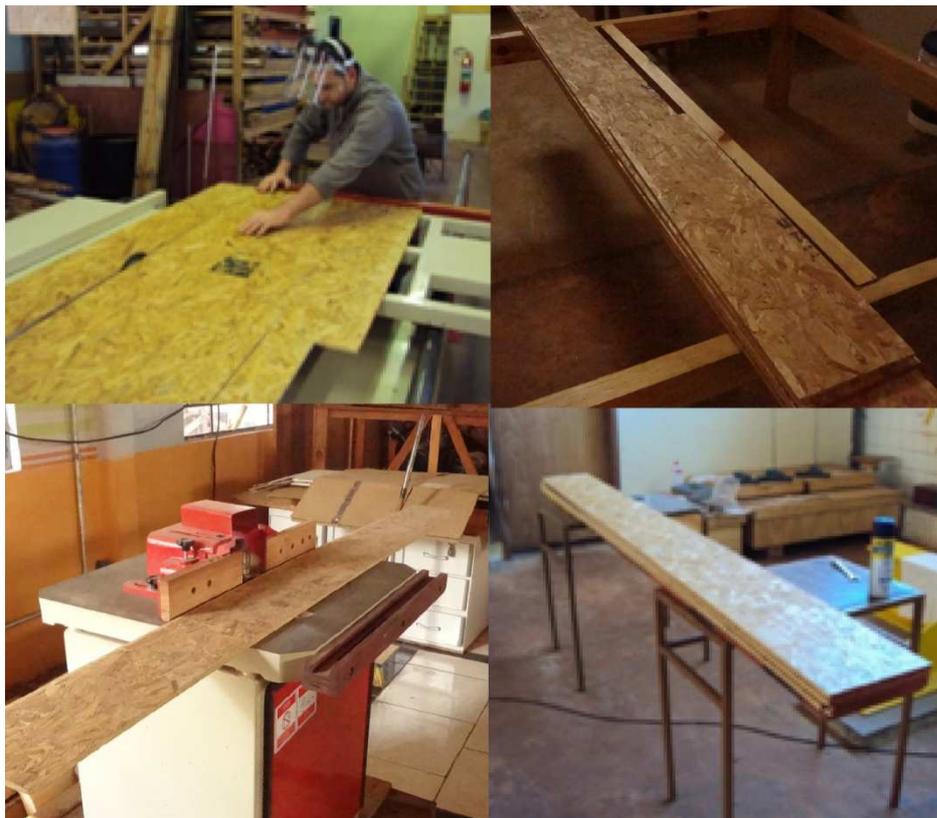


Figura 27– Processo de confecção das almas.

Após a confecção das mesas e almas iniciou-se o processo de colagem, onde o adesivo foi aplicado com o auxílio de um pincel, controlando visualmente para ter uma aplicação homogênea. Por fim foi realizada a união entre as peças com a prensagem da viga. A pressão de colagem foi aplicada com o auxílio de um dispositivo especial e controlada por torquímetro. Para cada barra rosqueada foi aplicado um torque de 14Nm, de forma a obter para uma prensagem homogênea. A Figura 28 mostra a colagem das vigas.

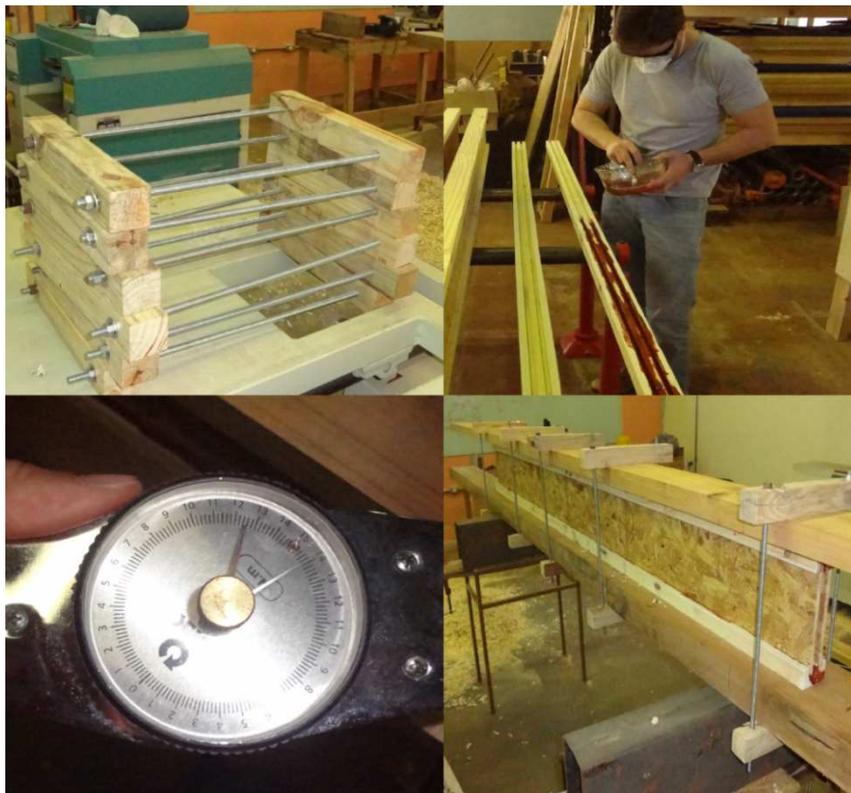
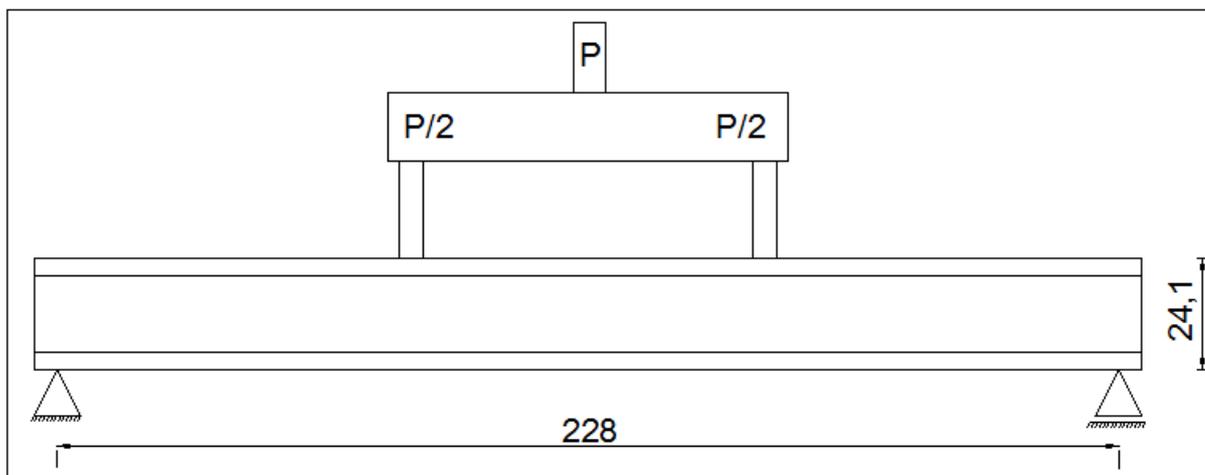


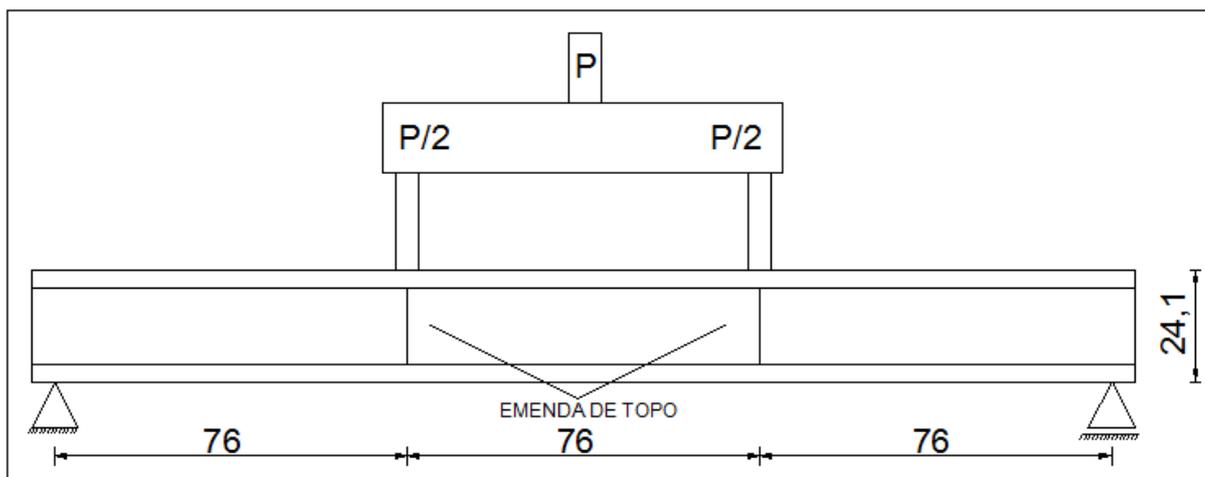
Figura 28– Colagem das vigas.

Ao todo foram confeccionadas nove (9) vigas, divididas em três modelos. Sendo três (3) vigas sem emenda na alma, três (3) vigas com emenda simétrica na alma no ponto de aplicação da carga e três (3) vigas com emenda assimétrica também no ponto de aplicação da carga. Todas as vigas foram constituídas de duas mesas de madeira da espécie *Pinus Taeda* e duas almas de OSB, conforme ilustram as figuras a seguir.



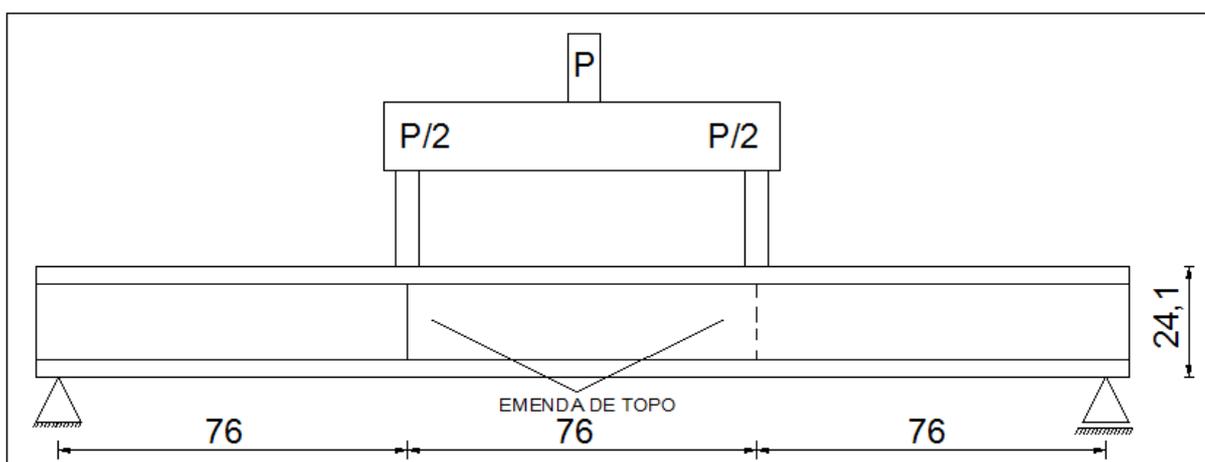
Medidas em centímetros*.

Figura 29–Seção duplo “I” sem emenda nas almas.



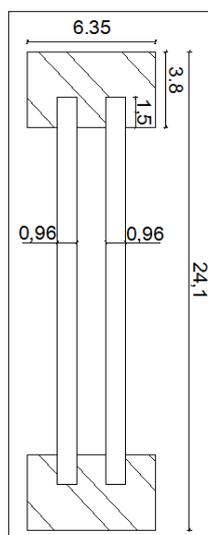
Medidas em centímetros*.

Figura 30–Seção duplo “I” com emenda simétrica nas duas almas.



Medidas em centímetros*.

Figura 31–Seção duplo “I” com emenda assimétrica nas almas.



Medidas em centímetros*.

Figura 32– Seção transversal duplo “I”.

A Figura 33 a seguir ilustra as vigas confeccionadas.



Figura 33 – Vigas confeccionadas.

5.4 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 foi contraventada.

A ASTM D198 (2002) indica que o tempo de execução do ensaio 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. Os deslocamentos foram medidos com o auxílio de transdutores de deslocamento, tipo relógios comparadores. A Figura 34 apresenta o arranjo para realização do ensaio.



Figura 34 - Arranjo para ensaio das vigas.

Finalizando o experimento o carregamento foi aplicado até a ruptura da viga para verificar a carga máxima. Com os resultados obtidos dos ensaios experimentais foram realizadas as comparações para a rigidez e capacidade de carga das vigas, estimadas teoricamente.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos experimentos realizados nessa pesquisa. Para facilitar a comparação os resultados são apresentados em forma de 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

Os ensaios de compressão foram realizados em corpos de prova segundo metodologia apresentada no capítulo 5. Os resultados são apresentados na Tabela 3, indicando os resultados médios para cada mesa com os respectivos valores de resistência a compressão paralela às fibras e módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras.

Tabela 3 - Valores médios para resistência e módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras de cada uma das mesas empregadas nos estudos.

Material	N° de CP's	$f_{c0,m}$ (kN)	$E_{c0,m}$ (kN.cm²)
Mesa 1	3	1,95	521
Mesa 2	6	2,21	523
Mesa 3	5	2,41	641
Mesa 4	3	2,65	1183
Mesa 5	5	2,37	487
Mesa 6	6	1,60	293
Mesa 7	5	3,10	731
Mesa 8	5	2,84	649
Mesa 9	3	3,28	950
Mesa 10	6	1,73	218
Mesa 11	4	2,61	1102
Mesa 12	5	2,84	1161

Mesa 13	4	2,53	965
Mesa 14	6	1,67	319
Mesa 15	5	2,53	811
Mesa 16	3	3,60	1674
Mesa 17	6	1,49	225
Mesa 18	6	1,94	609

6.1.2 Umidade e módulo de elasticidade das mesas

Na Tabela 4 são apresentados os valores de teor de umidade e o módulo de elasticidade à flexão de cada mesa.

Tabela 4 - Valores do módulo de elasticidade e umidade das mesas.

Material	E_M (kN.cm²)	Umidade (%)
Mesa 1	493	24,4
Mesa 2	883	18,9
Mesa 3	801	22,6
Mesa 4	1156	21,2
Mesa 5	537	21,8
Mesa 6	818	22,2
Mesa 7	1063	21,0
Mesa 8	1032	21,5
Mesa 9	350	25,2
Mesa 10	768	24,0
Mesa 11	933	21,2
Mesa 12	1181	24,1
Mesa 13	462	20,6
Mesa 14	462	21,0
Mesa 15	918	21,2
Mesa 16	1193	23,4
Mesa 17	321	21,8
Mesa 18	413	21,1

É necessário ressaltar que os valores de módulo de elasticidade e resistências não foram corrigidos para o valor de umidade de referência (12%) indicado pela norma NBR 7190. Isso é justificável devido a necessidade de comparação dos valores teóricos e experimentais, realizadas neste trabalho. A correção dos valores de resistência e rigidez é essencial para a elaboração de projetos, entretanto neste caso não se aplica.

6.2 CARACTERÍSTICAS DO OSB

As características do OSB foram obtidas de trabalho anterior realizado para determinação das propriedades mecânicas das chapas produzidas no Brasil. Segundo Dias (2004), o módulo de elasticidade à flexão vertical médio é 4470,9 MPa e a resistência média é 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 carga de ruptura. A Tabela 5 apresenta um comparativo entre a rigidez teórica e a experimental.

A rigidez teórica foi calculada utilizando a equação 12, e a rigidez experimental foi obtida utilizando a equação 19:

$$EI_{exp} = \frac{23PL^3}{1296\delta_{exp}} \quad (19)$$

Tabela 5 - Tabela comparativa entre os valores de rigidez efetiva teórica e experimental das vigas de madeira de seção duplo "I".

Material	Mesa Superior	Mesa Inferior	$EI_{(ef)t}$ (kN.cm ²)	$EI_{(ef)e}$ (kN.cm ²)	Diferença (%)
Viga 1	M13	M3	4934718	3699146	25
Viga 2	M5	M4	4918546	4232247	14
Viga 3	M15	M14	3453873	2884370	16
Viga 4	M11	M2	4283556	2681232	37

Viga 5	M1	M16	3928925	3820939	3
Viga 6	M12	M17	2977155	2452976	18
Viga 7	M18	M8	3477229	3038536	13
Viga 8	M6	M7	3538837	3173786	10
Viga 9	M10	M4	3198554	2687227	16

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

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

Diferença = $(EI_{(ef) t} - EI_{(ef) e}) / EI_{(ef) t}$

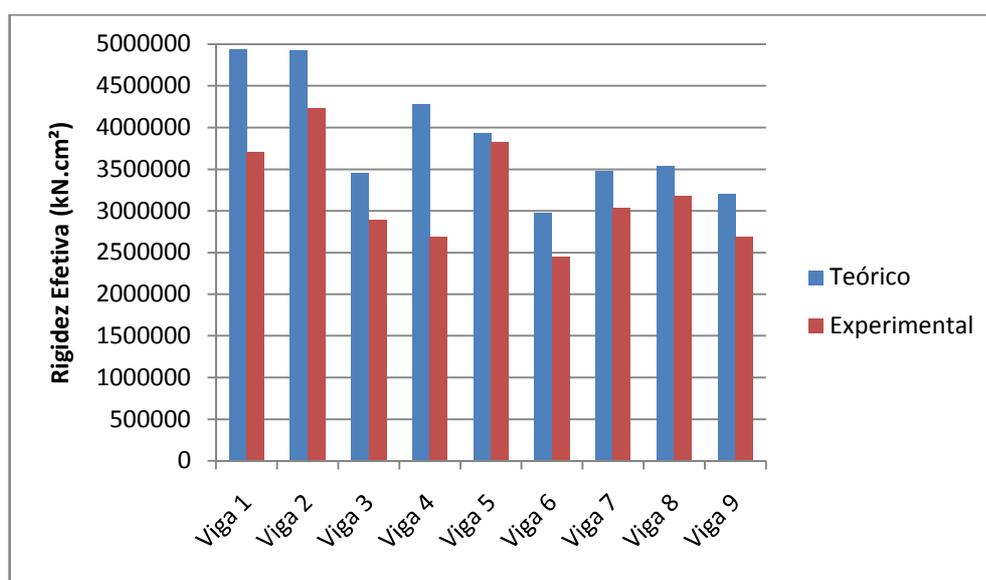


Figura 35 – Comparativo entre rigidez efetiva teórica e experimental.

Da análise da Tabela 5 e da Figura 35 pode-se observar que a rigidez efetiva estimada teoricamente é superior em todas as vigas quando comparada com a rigidez obtida dos experimentos. A média de diferença entre os valores é de 17 %.

A Tabela 6 apresenta um comparativo entre a flecha teórica e a flecha experimental.

Tabela 6 - Tabela comparativa entre os valores de flecha teórica e experimental das vigas de madeira de seção duplo "I".

Material	Flecha devido à flexão (cm)	Flecha cisalhamento (cm)	Flecha total Teórica (cm)	Flecha Experimental (cm)	Diferença (%)
Viga 1	0,256	0,079	0,335	0,338	-0,8
Viga 2	0,257	0,079	0,336	0,301	10,4

Viga 3	0,365	0,079	0,445	0,446	-0,4
Viga 4	0,295	0,079	0,374	0,472	-26,2
Viga 5	0,321	0,079	0,401	0,325	18,9
Viga 6	0,424	0,079	0,503	0,520	-3,4
Viga 7	0,363	0,079	0,442	0,445	-0,5
Viga 8	0,357	0,079	0,436	0,397	8,9
Viga 9	0,395	0,079	0,474	0,478	-0,8

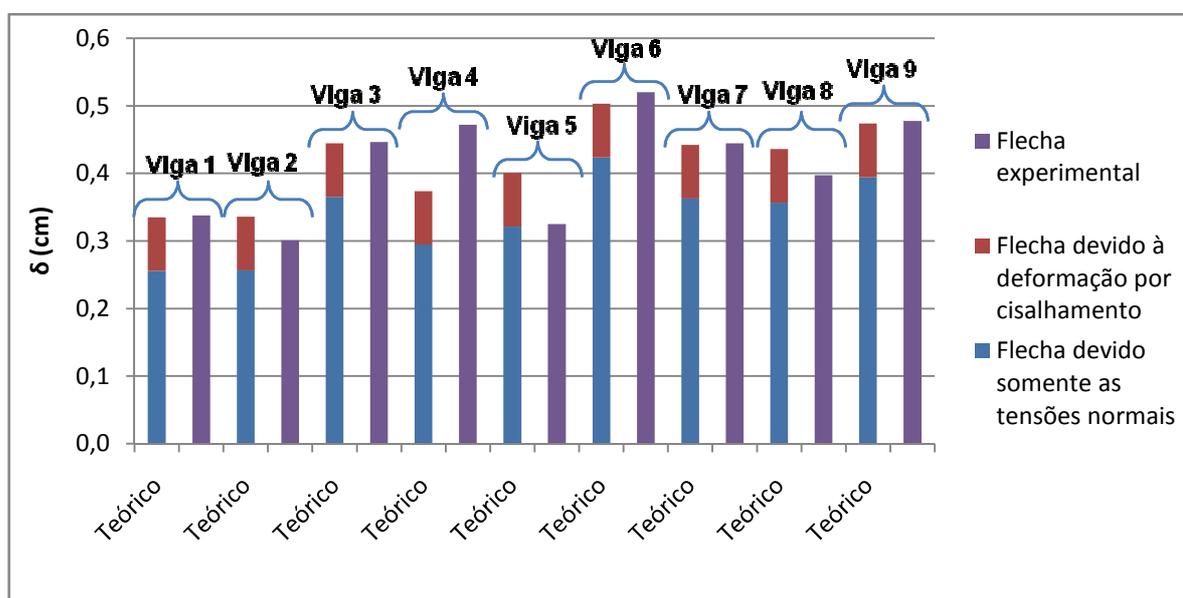


Figura 36 – Comparativo entre valores de flecha teórica e experimental.

No caso da Tabela 6 pode-se observar que o cálculo de flecha considerando a teoria simplificada de resistência dos materiais resulta em flechas inferiores a experimental. Considerando na análise teórica as deformações por cisalhamento a comparação das flechas teóricas e experimentais resultam em valores muito mais próximos com diferença média de 0,7%.

A análise de flechas teóricas e experimentais realizada neste trabalho indica que se deve considerar a influência da deformação por cisalhamento para as vigas / Joists.

As comparações entre a capacidade de carga máxima das vigas foram realizadas considerando os estados limites últimos de tensão normal máxima de compressão na mesa superior e tensão cisalhante máxima na região da linha neutra

na alma, Tabela 7. A metodologia para o cálculo da capacidade de carga está descrita no item 4.9.3.

Tabela 7 - Tabela comparativa entre os valores de força de ruptura teórica e experimental das vigas de madeira de seção duplo “I”.

Material	Mesa Superior	Mesa Inferior	P_c (kN)	P_t (kN)	V (kN)	P_e (kN)
Viga 1	M13	M3	30,87	23,27	27,28	32,00
Viga 2	M5	M4	28,54	25,71	27,34	36,00
Viga 3	M15	M14	23,23	10,73	27,00	22,99
Viga 4	M11	M2	23,51	21,59	28,21	23,93
Viga 5	M1	M16	13,47	40,76	29,09	29,78
Viga 6	M12	M17	24,80	7,70	26,21	25,80
Viga 7	M18	M8	11,83	28,59	29,42	25,68
Viga 8	M6	M7	11,17	27,17	29,10	32,00
Viga 9	M10	M4	9,50	31,30	29,79	26,00

P_c – Força de ruptura a compressão teórica.

P_t – Força de ruptura a tração teórica.

V – Força de ruptura ao cisalhamento teórico.

P_e – Força de ruptura experimental.

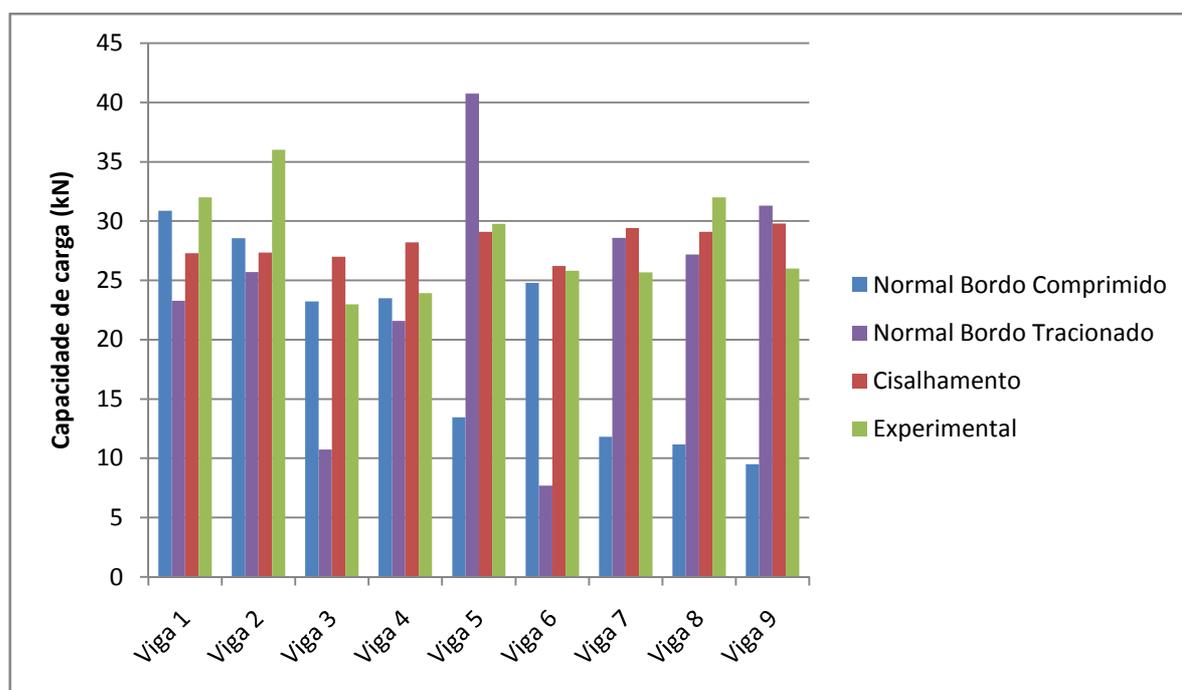


Figura 37 – Comparativo entre valores de força de ruptura teórica e experimental.

Observando a Tabela 7 e o diagrama da Figura 37 pode-se notar grandes variações entre as estimativas de cargas de ruptura para cada uma das vigas. Os valores limites para esforço normal é diretamente afetado pelos valores de resistência a compressão paralela utilizada nas análises. Pode-se notar que algumas vigas possuem mesas com grandes diferenças de resistência, prejudicando a análise dos dados. Fato confirmado pelos valores encontrados nas vigas 1,2 e 4, que possuem mesas mais homogêneas.

Também é possível notar que não há uma diferença muito grande em capacidade de carga para os três modelos de vigas testados: sem emendas na alma (Vigas 1, 2 e 3), com emendas simétricas (vigas 4, 5 e 6) e com emendas assimétricas (vigas 7, 8 e 9). Como era de se esperar as vigas com emendas apresentaram capacidade de carga inferior as vigas sem emendas, entretanto a diferença foi de apenas 8% para vigas com emendas assimétricas e 12,6% para vigas com emendas simétricas, como pode ser observado no diagrama da Figura 38.

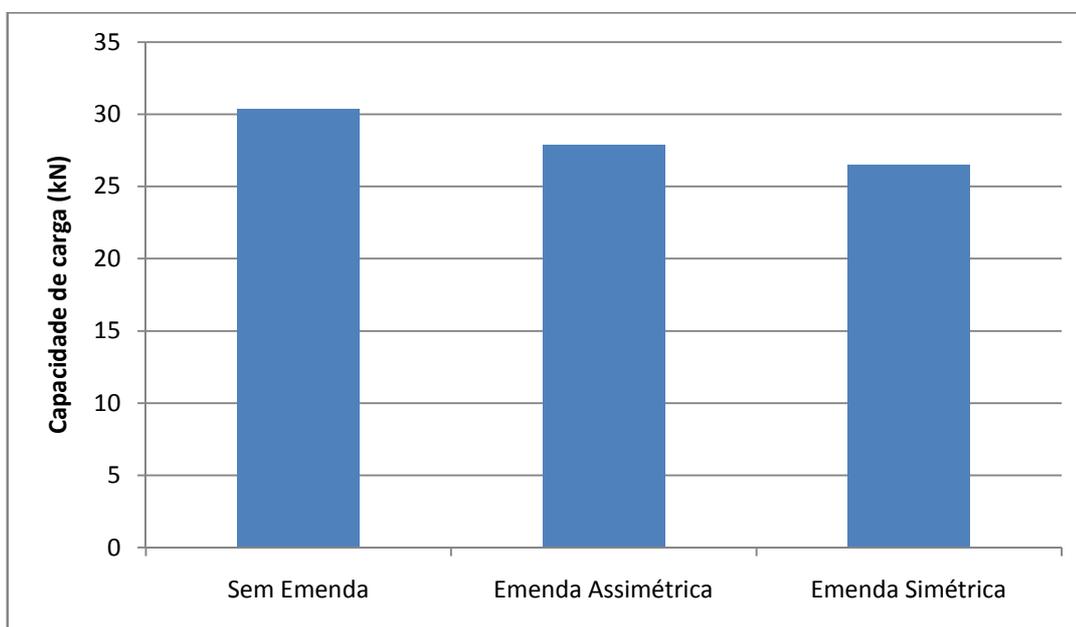


Figura 38–Diferença de capacidade de carga entre os três modelos estudados.

O modo de ruptura foi observado em todas as vigas e comparado com os modos de ruptura apresentados na Figura 11, sendo que sete vigas romperam por tração e em duas vigas ocorreu instabilidade de alma. A Figura 39 apresenta os modos de falhas ocorridos nas vigas.

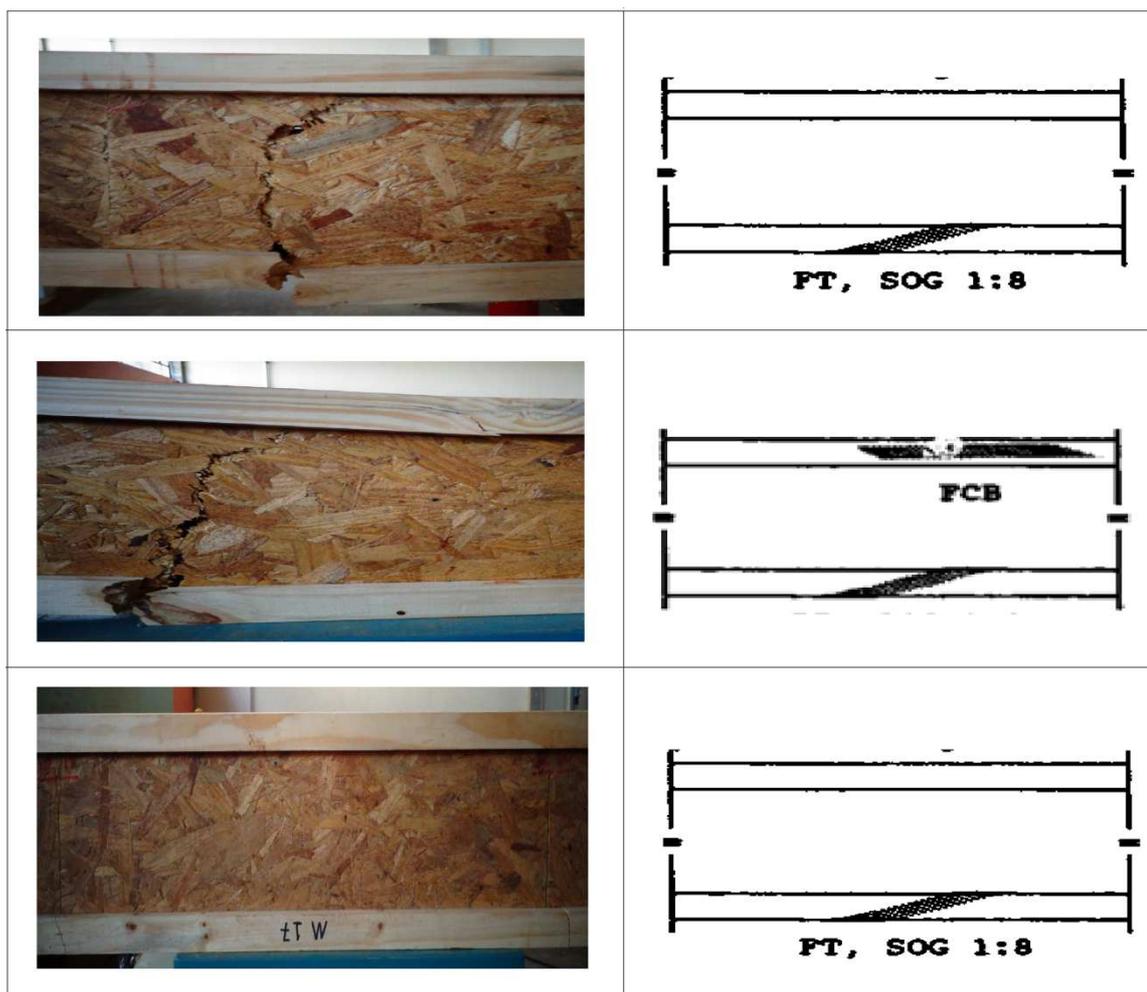


Figura 39 – Comparativo das falhas observadas com as da Figura 11.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As vigas *I-Joists* estudadas neste trabalho podem ser utilizadas para diversas finalidades, sendo mais usado como elemento de lajes em sistemas Wood-frame. No Brasil ainda não existem fábricas especializadas na produção de vigas *I-Joists*, entretanto existem várias pesquisas no Brasil sobre o tema. Neste trabalho foram estudadas as vigas *I-Joists* com almas duplas a fim de verificar a influência deste modelo de seção transversal sobre o comportamento estrutural do elemento. Com base nos resultados da pesquisa podem-se tecer as seguintes conclusões:

- As vigas com alma dupla e emendas assimétricas possuíram um ganho de resistência se comparadas com as de emendas simétricas de apenas 5%.

- As formas de ruptura observadas foram ora por tração na mesa inferior (vigas 2,3,4,5,6,7 e 8), ora por instabilidade de alma (vigas 1 e 9).

- Constatou-se nos ensaios que as vigas em alma dupla possuem menor possibilidade de torção das mesas, quando próximo da ruptura.

- Foi observada a necessidade de inclusão de enrijecedores principalmente na região dos apoios e nos pontos de aplicação de carga, de forma a reduzir a possibilidade de instabilidades na alma. Sugere-se que mais trabalhos sejam realizados com o objetivo de compreender melhor o comportamento de flambagem local de alma para vigas *I-Joists*.

- A rigidez das vigas *I-Joists* é influenciada pelas deformações por cisalhamento que ocorrem na alma e devem ser consideradas nos cálculos. Para as vigas do trabalho o uso da equação indicada pela (APA-PR310C), foi suficiente para se obter diferenças de apenas 0,7% no cálculo da flecha.

REFERÊNCIAS

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>. Acesso em: 02 Dez. 2012.

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 Testss 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.

ENGINEERED WOOD ASSOCIATION. **A Guide to Engineered Wood Products**. Form N° C800B. 2010. Disponível em: <http://www.apawood.org/pdfs/download_pdf.cfm?PDF_Filename=managed/C800.pdf>. Acesso em: 01/ Abril. de 2013.

ENGINEERED WOOD ASSOCIATION. Engineered Wood System. **APA Performance rated I-Joist**. Form N° EWS Z725B. 2009. Disponível em: http://www.apawood.org/pdfs/download_pdf.cfm?PDFFilename=managed/Z725.pdf. Acesso em: 01/ Abril. de 2013.

FIORELLI, Juliano. **Estudo teórico e experimental de vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro**. 2005. 108 f. Tese (Doutorado em Engenharia de materiais)-Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 2005.

FISSETTE, PAUL. **The evolution of engineered wood I-joists**, 2000. Disponível em: <http://www.umass.edu/bmatwt/publications/articles/i_joist.html>. Acesso em: 02 de fev. de 2013.

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.

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**. 2005. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

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.

LEICHTI, R. J.; FALK, R. H; LAUFENBERG, T. L. Prefabricated wood I-Joist: an industry overview. **Forest Product Journal**, v.40, n.3, pp. 17, 1990.

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.

PEDROSA, A. L. **Desempenho Estrutural de vigas "I" Constituídas por PLP e Compensado de Pinus Taeda L. e EucalyptusDunniiMaiden e OSB de Pinus spp**. 2003. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michéle. **Estruturas de madeira**. 6. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

RANCOURT, Derek. G. **Structural behavior of Wood I-Joist / OSB roof panel assemblies**. Master of Science (in Civil & Environmental Engineering) - University of Maine, Orono, 2008.

RÊGO, R. F. e **Utilização de materiais alternativos à base de madeira na construção civil**. (Monografia em Engenharia Florestal) – Universidade Federal

Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em:
<<http://www.if.ufrj.br/inst/monografia/2007II/Rafael%20Mendes%20Rego.pdf>>.
Acesso em: 04 Março. 2013.

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.

RIBEIRO, Wilson F; SEDOSKI, Maiko. C; GOÉS, Jorge. L. N. **Avaliação teórica e experimental em vigas de madeira compostas em perfil I com análise de diferentes resinas e geometrias de ligações**. Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural. Rio de Janeiro, p. 1-15, Set 2012.

RISSEON, Adriano. V. **Utilização de vigas de madeira em seção “I” para grandes vãos**. 2011. 68 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Engenharia Civil.Faculdade Dinâmica das Cataratas. Foz do Iguaçu, 2011.

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.

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.

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.

STAMATO, G. C.; CALIL, C. J. (2002). Resistência ao embutimento da madeira Compensada. Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, n. 18, p. 49-76.

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

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

APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULO DA VIGA 1

Módulo de elasticidade mesa superior:

$$E_1 = 1181 \text{ kN/cm}^2$$

Módulo de elasticidade da alma:

$$E_2 = 447 \text{ kN/cm}^2$$

Módulo de elasticidade mesa inferior:

$$E_3 = 802 \text{ kN/cm}^2$$

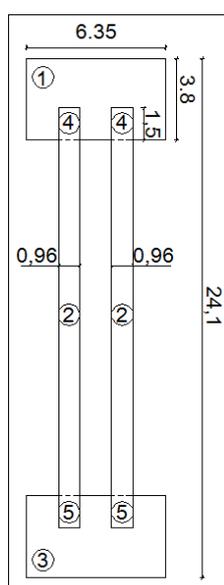
$$E_c = 1000 \text{ kN/cm}^2$$

Os valores E_1 e E_3 foram obtidos através de ensaios experimentais de flexão em quatro pontos e o valor de E_2 foi obtido de DIAS (2004), como descrito no item 6.2.

Cálculo de relações entre módulos de elasticidade:

$$n_1 = \frac{1181}{1000} \quad n_2 = \frac{447}{1000} \quad n_3 = \frac{802}{1000}$$

$$n_1 = 1,181 \quad n_2 = 0,447 \quad n_3 = 0,802$$



Medidas em centímetros*.

Figura A.1– Dimensões da seção transversal utilizada.

$$b_1 = 6,35cm \quad h_1 = 3,80cm \quad b_2 = 0,96cm \quad h_2 = 19,5cm \quad b_3 = 6,35cm$$

$$h_3 = 3,80cm \quad b_4 = 0,96cm \quad h_4 = 1,50cm \quad b_5 = 0,96cm \quad h_5 = 1,50cm$$

Cálculo da área da seção transformada de cada peça.

$$A_1 = n_1 b_1 h_1 \quad A_2 = n_2 b_2 h_2 \quad A_3 = n_3 b_3 h_3 \quad A_4 = n_3 b_3 h_3 \quad A_5 = n_3 b_3 h_3$$

$$A_1 = 28,49cm^2 \quad A_2 = 8,35cm^2 \quad A_3 = 19,34cm^2 \quad A_4 = 1,70cm^2 \quad A_5 = 1,15cm^2$$

De acordo com a Figura a seguir é possível determinar a distância do centro de gravidade de cada peça até o eixo adotado.

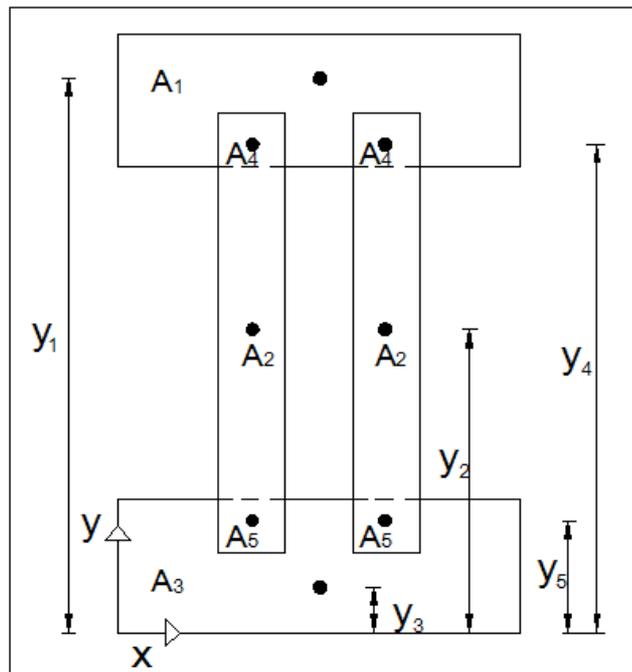


Figura A.2 – Representação gráfica da viga duplo “I” estudada.

$$y_1 = 22,20cm \quad y_2 = 12,05cm \quad y_3 = 1,90cm \quad y_4 = 21,05cm \quad y_5 = 3,05cm$$

Desta forma é possível calcular o centro de gravidade da seção transversal.

$$CG_{y_0} = \frac{y_1 A_1 + 2y_2 A_2 + y_3 A_3 - 2y_4 A_4 - 2y_5 A_5}{A_1 + 2A_2 + A_3 - 2A_4 - 2A_5}$$

$$CG_{y_0} = 13,46cm$$

Com a equação a seguir é possível calcular a inércia efetiva da seção transversal.

$$\begin{aligned}
 I_{ef} &= \frac{n_1 b_1 h_1^3}{12} + n_1 b_1 h_1 (y_1 - y_0)^2 \\
 &+ 2 \left[\frac{n_2 b_2 h_2^3}{12} + n_2 b_2 h_2 (y_2 - y_0)^2 \right] \\
 &+ \frac{n_3 b_3 h_3^3}{12} + n_3 b_3 h_3 (y_3 - y_0)^2 \\
 &- 2 \left[\frac{n_1 b_4 h_4^3}{12} + n_1 b_4 h_4 (y_4 - y_0)^2 \right] \\
 &- 2 \left[\frac{n_3 b_5 h_5^3}{12} + n_3 b_5 h_5 (y_5 - y_0)^2 \right]
 \end{aligned}$$

$$I_{ef} = 4934,718 \text{ cm}^4$$

$[E_n I_{ef}]$ = Rigidez efetiva para a seção transformada.

$$E I_{ef} = 4934718 \text{ kN/cm}^2$$

Resultado da flecha experimental.

P	Relógio 1	Relógio 2 início	Relógio 2 fim	Relógio 3
2kN	-0,309	1,08	2,43	-0,188
6kN	-0,517	1,08	4,94	-0,451

Medidas em milímetro*.

Flecha para 2kN:

$$\delta_2 = (2,43 - 1,08) + \left(\frac{-0,309 - 0,188}{2} \right)$$

$$\delta = 1,1015mm$$

Flecha para 6kN:

$$\delta_6 = (4,94 - 1,08) + \left(\frac{-0,517 - 0,451}{2} \right)$$

$$\delta = 3,380mm$$

$$\delta_{exp} = 3,380mm = 0,338cm$$

Cálculo da flecha teórica:

$$\delta_{rm} = \frac{23PL^3}{1296EI_{teórico}}$$

$$\delta_{cisalhamento} = \frac{8PL}{6K}$$

$$P = 6kN$$

$$L = 228cm$$

$$EI_{teórico} = 4934718kN/cm^2$$

$$K = 23000kN$$

$$\delta_{rm} = 0,255cm$$

$$\delta_{cisalhamento} = 0,079cm$$

$$\delta_{totalteórica} = \delta_{rm} + \delta_{cisalhamento}$$

$$\delta_{totalteórica} = 0,335cm$$

Cálculo da rigidez efetiva experimental.

$$EI_{exp} = \frac{23PL^3}{1296(\delta_6 - \delta_2)}$$

$$EI_{exp} = 3699146kN/cm^2$$

Cálculo da capacidade de carga teórica.

Estado limite de tensão normal no bordo comprimido:

$$\sigma = \frac{M}{I_{ef}}y$$

$$\frac{\sigma I_{ef}}{y} = \frac{PL}{6}$$

$$P = \frac{6\sigma_c I_{ef}}{Ly_c}$$

$$\sigma_c = 2,529kN/cm^2$$

$$I_{ef} = 4934,718cm^4$$

$$L = 228cm$$

$$P = \frac{6 \cdot 2,529 \cdot 4934,718}{228 \cdot (24,1 - 13,46)}$$

$$P = 30,87kN$$

Estado limite de tensão normal no bordo tracionado:

$$I_{ef} = 4934,718cm^4$$

$$\sigma_t = 2,412kN/cm^2$$

$$L = 228cm$$

$$P = \frac{6\sigma_c I_{ef}}{Ly_t}$$

$$P = \frac{6 \cdot 2,412 \cdot 4934,718}{228 \cdot (13,46)}$$

$$P = 23,27kN$$

Estado limite de tensão cisalhante máxima na cota da linha neutra:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{VM_s}{I_{ef} \cdot 2 \cdot b}$$

$$V = \frac{\tau I_{ef} 2b}{M_s}$$

$$M_s = n_1 b_1 h_1 (y_1 - y_0) + 2 \left[n_2 b_2 h_s \left(\frac{h_s}{2} \right) \right] - 2 \left[n_4 h_4 b_4 \left(h_s + \frac{h_4}{2} \right) \right]$$

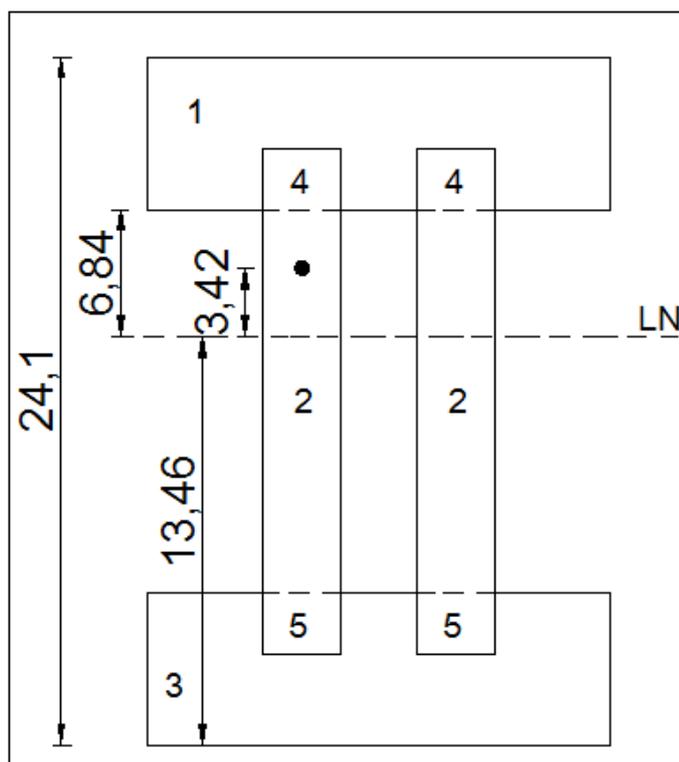


Figura A.3—Representação gráfica para cálculo do momento estático.

Onde:

$$h_s = 6,84cm$$

$$\tau = 0,748kN/cm^2$$

$$M_s = 259,33cm^3$$

$$V = \frac{0,748 \cdot 4934,718 \cdot 1,916}{(259,33)}$$

$$V = 27,27kN$$