

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

FERNANDA MARTIGNAGO DE LIMA

**DESEMPENHO ESTRUTURAL DE VIGAS "I-JOISTS" -
PADRONIZAÇÃO E SUBSÍDIOS PARA O PRÉ DIMENSIONAMENTO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO
2014

FERNANDA MARTIGNAGO DE LIMA

**DESEMPENHO ESTRUTURAL DE VIGAS "I-JOISTS" -
PADRONIZAÇÃO E SUBSÍDIOS PARA O PRÉ DIMENSIONAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação,
apresentado à Disciplina de Trabalho de
Conclusão de Curso 2, do Curso Superior em
Engenharia Civil, Universidade Tecnológica
Federal do Paraná, para aprovação de
viabilidade.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de
Góes

CAMPO MOURÃO
2014



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 42

DESEMPENHO ESTRUTURAL DE VIGAS "I-JOISTS" - PADRONIZAÇÃO E SUBSÍDIOS PARA O PRÉ DIMENSIONAMENTO

por

Fernanda Martignago de Lima

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 15h50min do dia 20 de fevereiro de 2014 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. Ronaldo Rigobello

(UTFPR)

Prof. Dr. Marcelo Rodrigo Carreira

(UTFPR)

Prof. Dr. Jorge Luis Nunes de Goes

(UTFPR)

Orientador

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 Antonio e Sonia,
As minhas irmãs Franciele, Izadora e Izabela,
A minha amiga Leticia Gonçalves.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pela fé, força, coragem e oportunidade. Fé para acreditar que era possível, força para enfrentar os obstáculos e sair de cabeça erguida, coragem para encarar desafios e superação e, oportunidades infinitas de aprendizado, mudanças, relacionamentos e vitórias.

Agradeço aos meus pais Antonio e Sonia por acreditarem em mim e por me mostrarem desde a infância seus princípios que me guiaram e me fizeram quem eu sou. Sou grata a vocês por cada palavra, conselho, ajuda, força e apoio e por estarem ao meu lado em minhas decisões.

As minhas irmãs Franciele, Izadora e Izabela. Minhas joias preciosas que me ensinaram o verdadeiro sentido de amizade. Apesar da distancia durante a graduação, vocês sempre se mantiveram presentes e ao meu lado quando precisei. Muito obrigada, Amo Vocês.

Ao meu orientador Prof. Dr. Jorge Luis Nunes de Goes pela oportunidade de receber seus conselhos, aprender coisas valiosas mesmo em uma simples conversa e por toda a ajuda e orientação prestada. Sempre vou admirar esse mentor.

Aos queridos Letícia, Marcos, Luana, Raí e Viviane. Vocês foram essenciais durante esses anos e sou grata por todo apoio, compreensão, ajuda, força e amizade. Cada um tem seu significado especial em minha vida.

Aos meus parceiros da Pórticos Empresa Júnior de Engenharia Civil e do Centro Acadêmico. Estas foram a oportunidade de me desenvolver pessoalmente, profissionalmente e fazer amigos que marcaram minha vida.

Aos meus amigos e familiares por acreditarem e apostarem em mim e por estarem comigo.

Ao técnico do Laboratório de Estruturas, Maiko Cristian Sedoski, e a equipe colaborativa dos alunos do PET Civil pela disposição na realização deste trabalho.

A todos os professores da COECI – Coordenação de Engenharia Civil da UTFPR que foram essenciais no aprendizado obtido.

RESUMO

LIMA, Fernanda. M. **DESEMPENHO ESTRUTURAL DE VIGAS "I-JOISTS" - PADRONIZAÇÃO E SUBSÍDIOS PARA O PRÉ DIMENSIONAMENTO** 2014. 86 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2014.

A importância dos compostos de madeira na construção civil obteve um grande crescimento ganhando destaque na utilização para fins estruturais e de sustentação de construções. As vigas de madeira de seção transversal "I", também conhecidas como "I - Joist" são produzidas através da combinação de vários componentes em um elemento estrutural. Apesar de sua difusão pelo mundo, no Brasil, pode-se citar a falta de uma norma específica para este elemento e de informações tecnológicas e de operacionalização. O objetivo do trabalho foi avaliar o desempenho de "I-Joists" e produzir um documento com os principais critérios de padronização desses elementos. Foi confeccionada uma viga com alma de "OSB" (Painel de tiras de madeira orientadas) e mesas de madeira serrada proveniente da espécie *Pinus Taeda*, tendo como critério a padronização "*Performance Rated I-Joists*" (PRI), desenvolvida pela APA (*Engineered Wood Association*). Nas mesas foram utilizadas emendas dentadas ao longo do comprimento. 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 da viga de madeira de seção transversal "I". Realizou-se a criação de um documento com os critérios de padronização de "I-Joists".

Palavras-chave: I - Joist. Padronização. Emendas Dentadas.

ABSTRACT

LIMA, Fernanda. M. **I-JOISTS STRUCTURAL PERFORMANCE - STANDARDIZATION AND SUPPORT FOR PRELIMINARY DESIGN** 2014. 86 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2014.

The importance of wood composites in construction had a great growth and by their use for building structural and support purposes being highlighted. The wooden beams cross-section "I", also known as "I-Joist" , are produced by combining various components in a structural element. Despite its dissemination throughout the world, in Brazil, one can cite the lack of a specific standard for this element and technological information and operationalization. The objective of this study was to evaluate the performance of "I-Joists" and produce a document with the main criteria for standardization of these elements. The web consisted of " OSB " (Oriented Strand Board) and the two flanges of lumber from "*Pinus taeda*" , with the standardization criteria "*Performance Rated I-Joists* ", developed by the APA (*Engineered Wood Association*) . The connections between the components of the flanges were made through finger joint, considered having good resistance and adaptation to industrial process. In this work the characterization of the material used on the flanges was performed as well as the structural theoretical and experimental analysis using the criteria of effective stiffness and breaking the wooden beam cross-section "I". It Was held to create a document with the criteria for standardization of " I-Joists " .

Key-Words: I-Joist. Standardization. Finger Joint.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - VIGA COM SEÇÃO TRANSVERSAL "I" EM COMPARADAS À SEÇÃO RETANGULAR.....	18
FIGURA 2 – "I-JOISTS"	19
FIGURA 3 - COMPONENTES DA I-JOIST: ALMA (WEB) E MESAS (FLANGES).....	20
FIGURA 4 - PAINEL ESTRUTURAL OSB	21
FIGURA 5 - ORIENTAÇÃO DE PAINÉIS DE "OSB" (ORIENTED STRAND BOARD). (A) "OSB" COM SUPERFÍCIE ALINHADA E O NÚCLEO ALEATÓRIO. (B) "OSB" COM A SUPERFÍCIE ALINHADA E O NÚCLEO ORIENTADO...	22
FIGURA 6 - GEOMETRIAS PRODUZIDAS EM LABORATÓRIO	24
FIGURA 7 - TIPOS DE EMENDAS ENTRE ELEMENTOS	25
FIGURA 8 - PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE VIGAS EM "I"	26
FIGURA 9 - PRINCIPAIS MODOS DE FALHAS DAS VIGAS "I" EM TESTES FEITOS EM ESCALA REAL	29
FIGURA 10 - POSIÇÃO DA MARCA NA "I-JOIST"	31
FIGURA 11 - ENRIJECEDOR DE ALMA.....	36
FIGURA 12 - DISTRIBUIÇÃO DA DEFORMAÇÃO, TENSÃO E FORÇA DE VIGAS "I" SUBMETIDAS A MOMENTO.....	38
FIGURA 13 - DISTRIBUIÇÃO DA DEFORMAÇÃO, TENSÃO E FORÇA DE VIGAS "I" SUBMETIDAS AO CISALHAMENTO	38
FIGURA 14 - SEÇÃO TRANSFORMADA PARA VIGA "I" COM TRÊS ELEMENTOS.	40
FIGURA 15 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA VIGA COM SEÇÃO TRANSVERSAL "I".	42
FIGURA 16 - CÁLCULO DE FLECHA PARA "I-JOISTS" CONSIDERANDO A DEFORMAÇÃO POR CISALHAMENTO. ...	43
FIGURA 17 – FINGER JOINT	46
FIGURA 18 - GEOMETRIA DA EMENDA FINGER JOINT.....	47
FIGURA 19 - CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS.	48
FIGURA 20 - ARRANJO PARA O ENSAIO DE COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS.....	49
FIGURA 21 - CONFECÇÃO DAS MESAS.....	50
FIGURA 22 - ARRANJO PARA O ENSAIO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS MESAS.....	50
FIGURA 23 - COLAGEM DAS VIGAS.	52
FIGURA 24 - SEÇÃO DAS VIGAS "I- JOIST"	53
FIGURA 25 - COMPRIMENTO DA VIGA "I-JOIST"	53
FIGURA 26 - EQUIPAMENTOS E TRANSDUTORES UTILIZADOS NO ENSAIO.	54
FIGURA 27 - PÓRTICO DE REAÇÃO.	55
FIGURA 28 - VIGA "I" COM ENRIJECEDORES.	55
FIGURA 29 - RUPTURA DA VIGA "I".	61
FIGURA 30- COMPARATIVO DA FALHA OBSERVADA COM A DA FIGURA 9.....	61
FIGURA 31 - ALTURA "I-JOIST"	75
FIGURA 32 - SISTEMA ESTRUTURAL PARA LAJES RESIDENCIAIS.....	77
FIGURA 33 - PRI – 20.....	80
FIGURA 34 - PRI – 30.....	80
FIGURA 35 - PRI – 40.....	81
FIGURA 36 - PRI – 50.....	81

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - VÃOS PERMITIDOS POR APA EWS PERFORMANCE RATED I-JOISTS – VÃO SIMPLES (A,B,C,D)...	32
TABELA 2 - VÃOS PERMITIDOS POR APA EWS PERFORMANCE RATED I-JOISTS – MÚLTIPLOS VÃOS (A,B,C,D)	33
TABELA 3 - PROPRIEDADES DE PROJETO PARA APA EWS PERFORMANCE RATED I - JOISTS	37
TABELA 3 - COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS	57
TABELA 4 - COMPARATIVO ENTRE OS VALORES DE RIGIDEZ EFETIVA TEÓRICA E EXPERIMENTAL.....	58
TABELA 5 - FLECHA EXPERIMENTAL	59
TABELA 6 - FLECHA EXPERIMENTAL PARA CARREGAMENTO MÉDIO.....	59
TABELA 7 - COMPARATIVO ENTRE A FLECHA TEÓRICA E EXPERIMENTAL	60
TABELA 8 - COMPARATIVO ENTRE A FLECHA TEÓRICA E EXPERIMENTAL	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
TABELA 9 - CARREGAMENTOS COMBINADOS DE ACORDO COM NBR 7190/97	76
TABELA 10 - VÃOS ADMISSÍVEIS PARA VIGA DE MADEIRA EM “I” – VÃO SIMPLES ^(A,B,C)	78
TABELA 11 - – PROPRIEDADES DE PROJETO DA VIGA DE MADEIRA EM “I”	79

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVO GERAL	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3 JUSTIFICATIVAS	16
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
4.1 I-JOISTS.....	17
4.1.1 Materiais Constituintes	18
4.1.2 Fabricação das Vigas de Madeira em “I”	23
4.1.3 Instabilidade Lateral da Alma	26
4.2 NORMATIZAÇÃO	27
4.2.1 NBR 7190 - Projeto de Estruturas de Madeira.....	27
4.2.2 ASTM D 198 – Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes.....	28
4.2.3 ASTM D 5055 – Standard Specification for Establishing and Monitoring Structural Capacities of Prefabricated Wood I-Joists	28
4.2.4 PRI – Performance Rated I-Joists.....	30
4.3 HIPÓTESES DE CÁLCULO.....	37
4.3.1 Método da seção transformada para seção “I” formada com três peças de materiais diferentes.....	39
4.3.2 Cálculo das tensões normais e de cisalhamento.....	41
4.3.3 Estimativa de rigidez considerando a deformação por cisalhamento.....	42
5 METODOLOGIA	45
5.1 MATERIAIS	45
5.2 MÉTODOS	47
5.3. MONTAGEM DAS VIGAS.....	49
5.4. ENSAIO DAS VIGAS	53
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
6.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MESAS	57
6.1.1 Compressão paralela às fibras	57
6.2 CARACTERÍSTICAS DO OSB.....	58
6.3 ANÁLISE DA VIGA.....	58
6.4 CRIAÇÃO DO DOCUMENTO DE PADRONIZAÇÃO DA VIGA “I – JOIST”	62
6.4.1 Dados Gerais	62
6.4.3 Ações.....	63
6.4.4 Propriedades Mecânicas.....	63
6.4.5 Deformações	64
6.4.6 Verificações	64
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	65

REFERÊNCIAS.....	66
APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULO DA VIGA.....	69
APENDICE B - Padronização “I – joist”	74

1 INTRODUÇÃO

Dentre os diversos materiais utilizados na construção civil, a madeira se destaca com suas características únicas e apresenta-se como um recurso de fonte renovável. É caracterizada por ser um material resistente e relativamente leve, sendo assim utilizada para fins estruturais e de cimbramento.

Com o objetivo de maior qualidade e eficiência nas estruturas e buscando alternativas para a produção de elementos com dimensões maiores, as indústrias de madeira desenvolveram o que se denomina Produtos Engenheirados de Madeira (PEM). Produzidos através da combinação de vários componentes em um elemento estrutural de madeira, esses produtos se caracterizam pela utilização da melhor propriedade de cada elemento. Além de possuir uma relação peso/resistência menor que os produtos convencionais, apresentam como características principais a sustentabilidade, controle de qualidade, segurança, estética além de usos diversos.

São classificadas como PEM, as vigas de madeira de seção transversal “I”, também conhecidas como I-Joists. Em sua construção objetivam fornecer rigidez, flexibilidade, resistência ao momento fletor e ao cisalhamento, sendo que as bordas, conhecidas como mesas, resistem em maior parte ao momento fletor e a alma resiste em maior parte ao esforço cortante.

As vigas de seção transversal “I” tem sua utilização bastante difundida em países como EUA, Canadá e Japão, se destacando por apresentar economia de material além de ser um produto de boa qualidade. A primeira empresa americana a desenvolvê-las foi a *Trus Joist Corporation (TJ)*.

Apesar de sua difusão pelo mundo, as “I-Joists” que possuem sua utilização em pisos residenciais não são produzidas industrialmente no Brasil. Dentre os diversos motivos, pode-se citar a falta de uma norma específica e informações tecnológicas e de operacionalização.

O processo de normatização deu-se início em 1981 sendo transferido, em 1985, para a *American Society for Testing and Materials (ASTM)* Comitê D-7 de madeira. A primeira norma universal para vigas em “I” pré fabricadas de madeira ASTM D5055 (*Standard Specification for Establishing and Monitoring Structural Capacities of Prefabricated Wood I-Joist*) foi elaborada em 1997, após, devido a necessidade de se estabelecer um padrão para o desempenho de vigas “I”, a Associação de Madeira Engenheirada (APA) desenvolveu um programa de

padronização denominado “*Performance Rated I-Joists*” (PRI), ou seja, vigas em “I” com performance controlada, apresentando uma alternativa de alto desempenho para o dimensionamento de vigas de madeira.

Este trabalho objetiva avaliar o desempenho da viga de madeira “I-Joists” com alma de OSB e mesas de madeira serrada de *pinus taeda* produzida na UTFPR-CM, tendo como critério a padronização “*Performance Rated I-Joists*” (PRI), desenvolvida pela APA (*Engineered Wood Association*), e por fim, desenvolver um documento com os principais critérios de classificação desses elementos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho da viga de madeira com seção transversal “I” com alma de OSB e mesas de madeira serrada de *pinus taeda* produzida na UTFPR-CM, tendo como critério a padronização “*Performance Rated I-Joists*” (PRI), desenvolvida pela APA.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o desempenho das vigas de madeira com seção transversal “I” produzidas na UTFPR-CM.
- Desenvolver tabelas de referencia em atendimento as normas brasileiras com as principais características das vigas “I-Joists” com vistas a apoiar projetistas de estruturas de madeira, servindo de subsídios para o pré dimensionamento.

3 JUSTIFICATIVAS

Nos últimos anos, os compostos de madeira tem assumido um papel importante nas indústrias, apresentando assim, grande crescimento. Com o surgimento dos Produtos Engenheirados de Madeira (PEM), foram introduzidas no mercado, as vigas “I-Joist”, utilizadas especialmente em estruturas de pisos. Esse produto surgiu para atender demandas de maiores vãos, necessários em alguns ambientes.

Pode-se considerar ainda, que a seção em forma de “I” proporciona uma economia do material, haja vista a pequena espessura da alma. Apresenta-se como característica das vigas “I-Joist” a baixa relação peso/resistência, ou seja, elementos estruturais com baixo peso próprio e grande capacidade de carga. Geralmente, nas mesas são utilizadas peças de madeira serrada, e na alma, chapa de OSB (Oriented Strand Board).

A Associação da Madeira Engenheirada, *Engineered Wood Association* (APA) criou um padrão comercial para desempenho dos PEM denominado “*Performance Rated I-joist (PRI)*”, ou seja, vigas em “I” com performance controlada. De acordo com estes padrões americanos, as vigas são classificadas estabelecendo-se um limite de flecha conforme o vão e em função dos padrões rigorosos de atendimento às normas da *American Society for Testing and Materials* ASTM.

No Brasil, não há indústrias de vigas “I-Joist” para utilização em pisos residenciais, mas estudos vêm sendo realizados com o objetivo de avaliar suas características estruturais. Recentemente foram realizados trabalhos sobre a geometria da ligação mesa-alma com resultados satisfatórios, entretanto, não há no país trabalho sobre a classificação de vigas em tamanho real, ou seja, com grandes vãos, segundo as normas internacionais APA. Os projetistas brasileiros necessitam de indicações, como capacidade de carga e rigidez, para o dimensionamento das estruturas de madeira. Assim, são necessários estudos experimentais para a composição de tabelas de referência, considerando-se a padronização das vigas.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Sendo um produto de importante utilização na construção civil, a madeira apresenta destaque por possuir características únicas além de ser um recurso de fonte renovável. Seu uso como material estrutural apresentou crescimento nas últimas décadas possibilitando o surgimento de novos produtos a base de madeira e o estudo de suas propriedades mecânicas, dentre elas: a compressão paralela às fibras, compressão normal às fibras, tração paralela às fibras, flexão estática, cisalhamento paralelo às fibras, dureza, fendilhamento e tenacidade.

Com o objetivo de maior qualidade e eficiência nas estruturas, algumas indústrias de madeira desenvolveram o que se denomina Produtos Engenheirados de Madeira (PEM), ou *Engineered Wood Products* (EWPs). Produzidos através da combinação de vários componentes em um elemento estrutural de madeira. Além de possuir uma relação peso/resistência menor que os produtos convencionais, apresentam como características principais a sustentabilidade, controle de qualidade, segurança e estética.

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, (ENGINEERED WOOD ASSOCIATION, 2010).

A madeira maciça apresenta limitação em suas dimensões. Esse fato vem fazendo com que as construtoras busquem alternativas para a produção de elementos com dimensões maiores, característica a qual é possibilitada pelos componentes engenheirados.

4.1 "I-JOISTS"

A utilização dos PEM objetiva eliminar alguns defeitos como nós, fendas, fibra torcida e inclinação excessiva das fibras que normalmente a madeira apresenta, possibilitando sua utilização de forma mais abrangente (SILVA, 2010).

Como uma boa alternativa para projetos de grandes vãos e a vantagem de ser um elemento com perfil esbelto e alta resistência estrutural, são classificadas como Produtos Engenheirados de Madeira, as vigas de madeira de seção transversal “I”.

Segundo Williamson (2002 apud Santos; Menezzi; Junior, 2009, p. 132), sendo considerada a segunda geração dos PEM, sua utilização é bastante difundida nos EUA, Canadá e Japão. Conhecidas internacionalmente como “I-Joist” ou “I-Beam”, as vigas “I” de madeira são produzidas a partir da união entre painéis estruturais na alma e madeira sólida ou mesmo outro painel estrutural nas bordas. Sendo considerado um produto novo entre os PEM, se destaca pois apresenta qualidade e vantagens em relação à questões ambientais.

Apresentam características como leveza, elevada rigidez e resistência, confiabilidade, baixo consumo energético para sua produção e, custo acessível quando comparado com vigas de madeira maciça. A figura 1 ilustra a economia de material de vigas “I” quando comparadas com vigas de seção retangular.

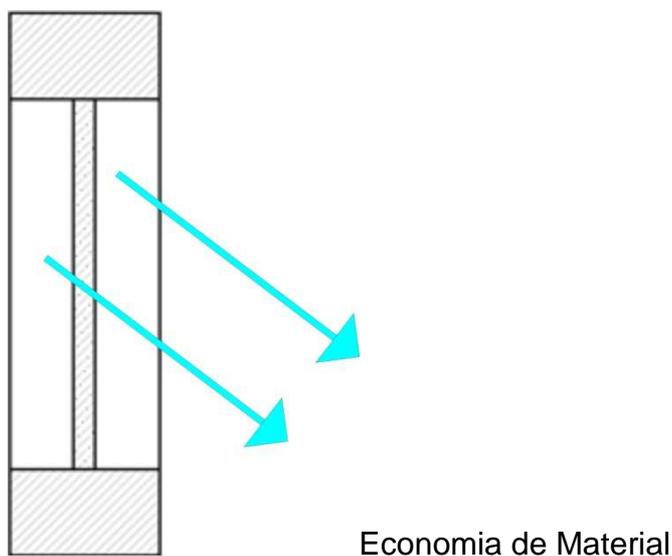


Figura 1 - Viga com seção transversal “I” em comparadas à seção retangular

4.1.1 Materiais Constituintes

As vigas “I” pré-fabricadas tem proporcionado economias nos materiais e boa distribuição das forças. Utilizam o compensado ou “OSB” (*Oriented Strand Board*) como material para a alma da viga e a madeira serrada de pequena dimensão ou

compostos estruturais de madeira para as mesas. A Figura 2 ilustra as Vigas “I-Joists”.



Figura 2 – “I-Joists”
Fonte: ALLJOIST (2013).

Sua concepção construtiva leva em consideração a maior necessidade de material nas regiões de maior tensão normal, também conhecida como mesas, além de possuir grande altura, conferindo-lhe maior inércia e rigidez em torno do eixo estrutural em que é solicitada. Podem fornecer rigidez, elevada resistência ao momento fletor e ao cisalhamento, sendo que as bordas resistem em maior parte ao momento fletor e a alma resiste em maior parte ao esforço cisalhante (USDA, 1999). A Figura 3 ilustra os componentes da viga de seção transversal “I”, onde as flanges são as mesas e a web, a alma.

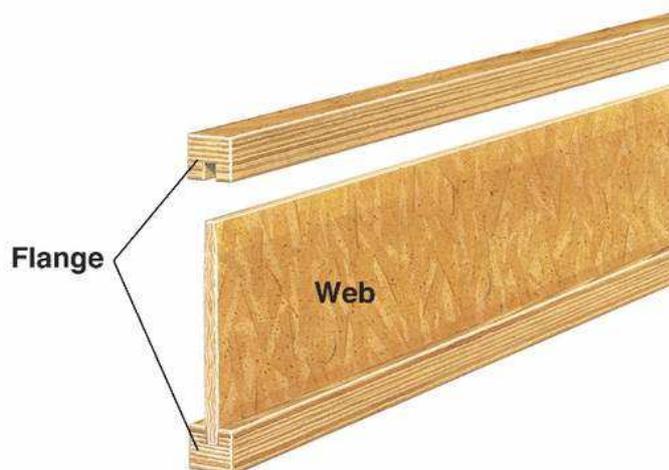


Figura 3 - Componentes da “I-Joist”: Alma (Web) e Mesas (Flanges)
Fonte: WOOD AWARE (2013).

A mesa da viga em “I” pode ser constituída de diversas maneiras. Dentre os materiais mais utilizados estão o de madeiras serradas e os compostos estruturais de madeira, como o LVL. De acordo com Fissette (2000), LVL se diferencia da madeira compensada. A principal diferença está no que se refere a direção das laminas de madeira, que no compensado são dispostas em camadas com direção cruzada e no LVL as camadas são dispostas em uma direção principal.

Na produção das mesas, a espécie de madeira que apresenta uma utilização frequente no caso da madeira serrada, é a Pinus.

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). Assim, a mesa da viga passou a ser constituída de LVL.

As mudanças ocorreram não só no que se refere à mesa mas também em outra parte das vigas em “I”. Em 1990, considerada como uma grande evolução na história das vigas em “I” aconteceu a substituição da alma em compensado por alma em OSB (*Oriented Strand Board*). A Figura 4 ilustra o painel estrutural de “OSB”.

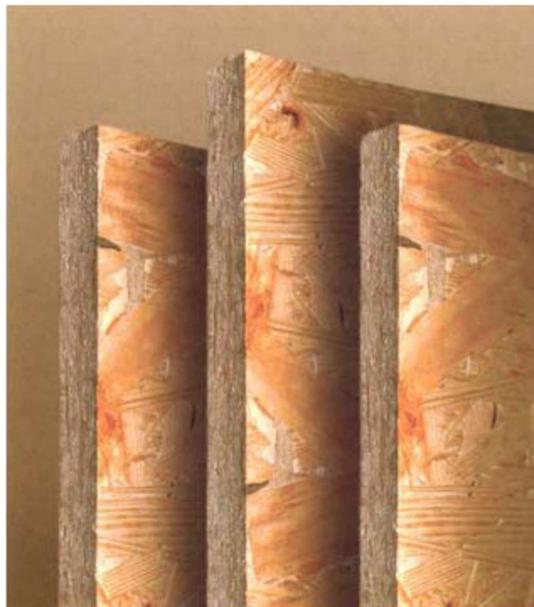


Figura 4 - Painele estrutural OSB
Fonte: MASISA (2000).

Este produto é formado por tiras finas e compridas, orientadas paralelamente, e dispostas em camadas perpendiculares entre si na espessura do painel. Esse painel pode ser formado por três ou mais camadas, dependendo do uso final. (PEDROSA, 2003). É necessário ressaltar que quando utilizado para aplicações estruturais o adesivo usado na fabricação das chapas de “OSB” devem ser resistentes a umidade e vapor d’água. Esses painéis apresentam a característica de alta resistência à flexão estática, podendo substituir os compensados, como citado. Apresentam um baixo custo e melhor aproveitamento de madeira na produção das placas além de ser ecologicamente eficiente (REVISTA DA MADEIRA, 2007).

Quanto à sua utilização, o “OSB” apresenta-se como um material frequente em construções e também, aplicações industriais. É reconhecido, pelo desempenho baseado no uso de painéis estruturais, por todos os principais modelos de normas dos EUA, os quais estabelecem as exigências de durabilidade medindo as tensões de flexão retidas sob as condições cíclicas de exposição ao tempo seco e úmido além de, ser um produto reconhecido pela Norma Nacional de Construção do Canadá. A Qualidade do “OSB” é responsabilidade da indústria que o produziu. Cada fábrica tem um programa de Controle da Qualidade para garantir que o produto final cumpra os valores exigidos nas Normas e às próprias especificações da fábrica. (STRUCTURAL BOARD ASSOCIATION, 2005).

Dentre os parâmetros considerados na manufatura do “OSB” estão a densidade da madeira e a geometria e orientação das tiras, como ilustrado na Figura 5. Além disso, é levada em conta, a quantidade de material em suas camadas e seu teor de umidade.

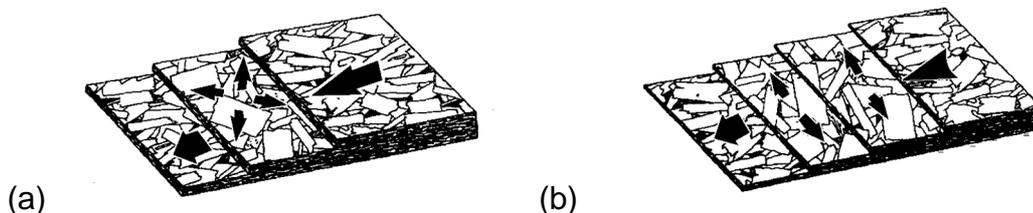


Figura 5 - Orientação de painéis de “OSB” (Oriented Strand Board). (a) “OSB” com superfície alinhada e o núcleo aleatório. (b) “OSB” com a superfície alinhada e o núcleo orientado
Fonte: STRUCTURAL BOARD ASSOCIATION (2005).

Nos Estados Unidos e Canadá, uma das principais utilizações de “OSB” está na fabricação de Vigas “I”, no entanto, também pode ser utilizado em: produção de divisórias de ambientes; utilização nas formas para concreto armado; utilização no fechamento de paredes, nos contrapisos e nos forros de coberturas e fabricação de móveis. Definir a orientação das lascas de madeira que são obtidas na manufatura do produto é o que garante propriedades estruturais às chapas ao utiliza-las em obras de edificações para sustentação estrutural e fechamento de paredes. (LIMA, 2005)

LIMA (2005) realizou ensaios para a determinação de algumas propriedades mecânicas de OSB, dentre elas está a resistência e rigidez na flexão, nas direções longitudinal, transversal e vertical e resistência e rigidez ao cisalhamento ao longo da espessura, utilizando chapas de diferentes regiões observando assim, que os coeficientes de variação das chapas de OSB, tanto para os valores de resistência bem como para os de rigidez, são significativamente inferiores àqueles normalmente apresentados pela madeira maciça. Sendo esta uma característica típica das chapas de madeira reconstituída em geral, apresenta-se como motivo o processo industrial que tende a homogeneizar as propriedades do material. Para o ensaio de cisalhamento, fez-se uso de duas chapas para evitar problemas de flambagem durante o carregamento, assim, não foi possível atingir a ruptura do material. Os resultados aliados as formas coerentes de ruptura das chapas, comprovam a viabilidade dos procedimentos nas normas ASTM adotadas.

O “OSB” tem destaque na homogeneidade das chapas e na resistência ao cisalhamento, superando o compensado em seus valores através da espessura, sendo cerca de duas vezes maiores. Sendo este, o fator mais decisivo na escolha desse material para a confecção das almas de vigas I (FISSETTE, 2005).

4.1.2 Fabricação das Vigas de Madeira em “I”

Alguns fatores influenciam na resistência das vigas “I”, sendo necessários alguns estudos e ensaios para que o fabricante esteja atento. Dentre eles estão as ligações entre as peças estruturais das vigas I, a geometria para as ligações, as emendas no sentido do comprimento da mesa e alma e os métodos construtivos das vigas I. Sendo a “I-Joist”, uma viga composta por três peças, é necessário que se faça uma ligação entre estas.

Para realização da união entre as peças ou derivados de madeira, há vários tipos de ligação. Essas podem ser divididas em dois grandes grupos: uniões mecânicas e uniões adesivas. As uniões adesivas são as consideradas “rígidas” ao passo que as mecânicas são naturalmente deformáveis, sendo consideradas as deformações (GOES, 2002).

Um estudo realizado por LIMA (2005) considerou três tipos de ligações entre a mesa e a alma das vigas em “I”: pregada, colada e pregada e colada. Foi analisado o desempenho das vigas quando submetidas à flexão por meio do rompimento das vigas, constatando diferenças de acordo com o tipo de ligação empregada. De acordo com a análise experimental do autor, nas vigas coladas e pregadas ocorreram algumas rupturas devido ao efeito de instabilidade e observou-se que em algumas situações a pressão exercida pelos pregos sobre a colagem foi insuficiente ao longo de toda a viga. Nas ligações pregadas observa-se, de forma geral, a ocorrência da ruptura em dois estágios, que ocorreram no “OSB” nas regiões abaixo dos aplicadores de carga. Nas vigas coladas, a ruptura ocorre uma única vez e de forma brusca. Observou-se que há um deslocamento relativo entre a alma em “OSB” e a mesa inferior em Pinus nas vigas pregadas, já nas vigas coladas isso não ocorreu, pois a alma e as mesas trabalham juntas, como se formassem uma única peça. Por isso, se torna viável a utilização de adesivos para a ligação nas vigas em “I”, no caso, se dará com a utilização da resina fenol-formaldeído (FF).

Na construção civil, são considerados estruturais adesivos que contribuem com aderência e rigidez durante a vida da estrutura. Esses adesivos geralmente são mais resistentes e mais rígidos do que a madeira em que estão ligados. Ligações estruturais são críticas, porque a falha na linha de cola poderia resultar em danos sérios à estrutura ou de seus ocupantes. Alguns exemplos de aplicações estruturais incluem as vigas em “I”.

Os adesivos podem ser classificados em adesivos de uso exterior e adesivos de uso interno. Os adesivos de uso exterior, também conhecidos como adesivos estruturais ou navais, possuem o diferencial de permanecerem eficientes mesmo sob condições climáticas adversas, ou seja, na presença de umidade. Já os adesivos de uso interno não possuem durabilidade quando expostos a umidade e não podem ser utilizados em aplicações estruturais (USDA, 2010).

Além das ligações adesivas utilizadas nas vigas em I pré-fabricadas de madeira, outro fator de importância são as várias geometrias para a ligação alma/mesa.

As geometrias da ligação alma/mesa e a ligação alma/alma são designadas por cada fabricante, com a intenção de providenciar uma pressão de fixação adequada para a cura do adesivo. Os adesivos usados devem ser de uso externo e tem que atender os requisitos da norma ASTM D 2559 (YEH, 2003). Há vários tipos de geometrias para o encaixe alma-mesa, podendo ser em “V”, retangular, com dois sulcos e com dois sulcos ligeiramente inclinados, conforme ilustra a Figura 6.



Figura 6 - Geometrias produzidas em laboratório
Fonte: Ribeiro; Sedoski; Góes (2012).

Alguns elementos de dimensões consideráveis precisam de lâminas de comprimento suficientemente grande. Isso pode ser obtido através da união longitudinal de peças de madeira de dimensões menores que a dimensão final desejada. Para esse objetivo, são utilizadas as emendas longitudinais das mesas. Dentre elas estão as emendas de topo (*butt joints*), as emendas biseladas (*scarf joints*) e as emendas dentadas (*finger joints*), conforme ilustra a Figura 7.

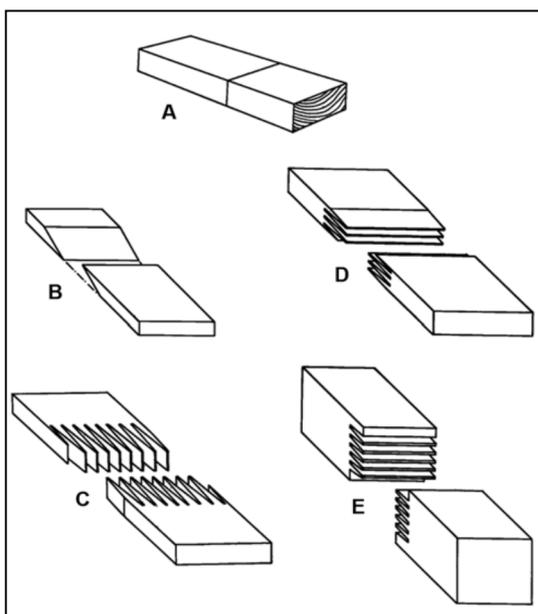


Figura 7 - Tipos de emendas entre elementos. (a) Emenda de topo. (b) Emenda biselada. (c), (d), (e) Emendas dentadas. Fonte: USDA (2010).

**Figura 8 - Orientação de painéis de “OSB” (Oriented Strand Board). (a) “OSB” com superfície alinhada e o núcleo aleatório. (b) “OSB” com a superfície alinhada e o núcleo orientado
Fonte: STRUCTURAL BOARD ASSOCIATION (2005).**

As emendas consideradas mais simples são as de topo e, apesar de não haver o desperdício de madeira, esse tipo de emenda apresenta uma baixa resistência mecânica e, de acordo com alguns autores, praticamente não transmite esforços, sendo assim, não são recomendadas. As biseladas são consideradas mais resistentes, mas, do ponto de vista de produção, não é muito viável, pois o processo requer um consumo excessivo de madeira e adesivo, além das dificuldades inerentes ao corte do bisel e montagem das lâminas. De acordo com o apresentado, os pesquisadores passaram a buscar uma nova alternativa de emenda longitudinal, as emendas dentadas. Surgindo como uma alternativa de substituir as emendas

biseladas, este tipo de emenda é considerado de boa resistência e o motivo de sua aceitação se dá pela sua adaptação ao processo industrial, facilidade de retirada de defeitos da madeira, aplicação do adesivo e pressão de colagem (MACÊDO, 1996).

Para a fabricação das vigas “I-Joist”, são necessários todos os procedimentos vistos anteriormente sendo que, estes parâmetros variam de acordo com o fabricante, podendo-se fazer uso de diferentes geometrias para ligação, materiais, dimensões e processos. A Figura 8 ilustra o processo de fabricação das vigas em “I”.

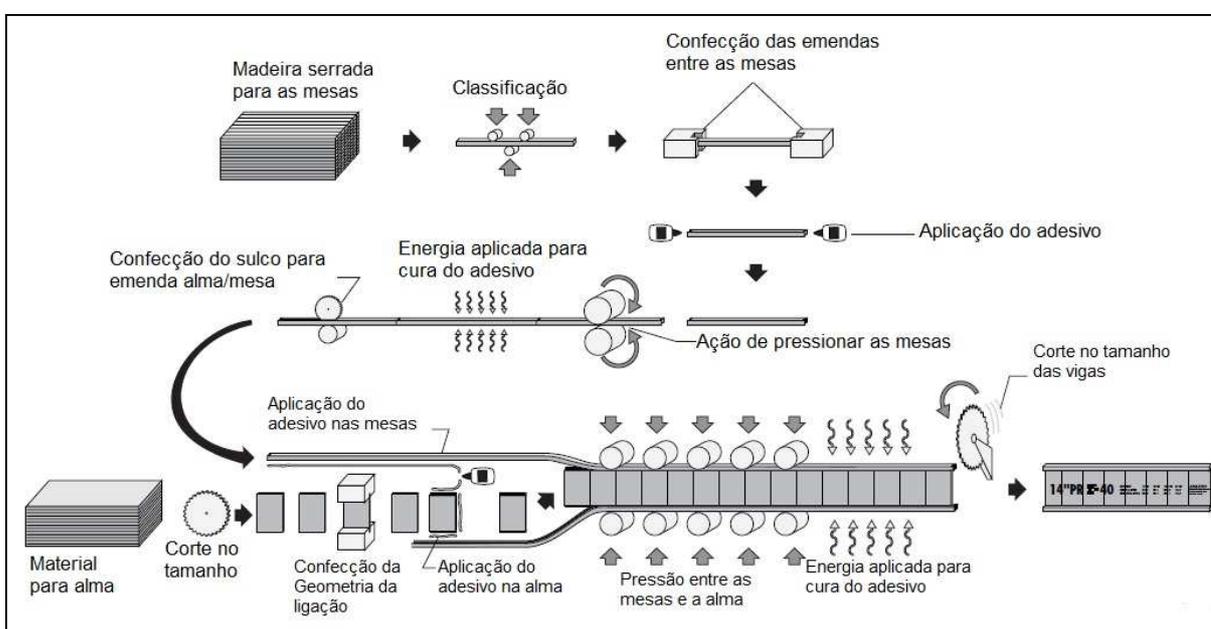


Figura 9 - Processo de fabricação de vigas em “I”
Fonte: AMERICAN WOOD COUNCIL (2006).

4.1.3 Instabilidade Lateral da Alma

Normalmente, observam-se nas vigas efeitos súbitos de perda de estabilidade. Essa instabilidade pode ocorrer de três modos: local (flambagem de chapa), global (da barra como um todo), e distorcional (CHODRAUI E MALITE, 2007). Geralmente, na flambagem global, considera-se predominante o caso particular da flambagem por flexão. A instabilidade devido a flambagem lateral por flexo-torção ocorre nas vigas sem contenções laterais ou com contenções laterais

muito espaçadas quando sujeitas à flexão em torno do eixo de maior inércia (ABRANTES, 2012).

No que se diz respeito às falhas típicas na região do apoio, pode ocorrer a presença de flambagem da alma na reação de apoio. Geralmente, há a ocorrência deste tipo de falha devido a ausência de enrijecedores que garantem maior rigidez a peça.

4.2 NORMATIZAÇÃO

As “I-Joists” não são produzidas no Brasil por uma série de razões como a falta de uma norma específica e informações tecnológicas, além da falta de tradição no uso de compostos de madeira para fins estruturais (MENEZZI, 2004).

De acordo com Williamson (2002 apud SANTOS, 2008, p. 14) em 1981, deu-se início nos EUA o processo de normatização das vigas em “I” por um grupo de produtores interessados em estabelecer critérios de desempenho para essas vigas. Ao fim, podem-se determinar as capacidades de carga resultando em um desempenho mais uniforme do produto. Em 1985, o processo da normatização transferiu-se para a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) Comitê D-7 de madeira. Em 1997 elaborou-se a primeira norma universal para vigas em “I” pré fabricadas de madeira a ASTM D5055 (*Standard Specification for Establishing and Monitoring Structural Capacities of Prefabricated Wood I-Joist*), uma especificação padrão para estabelecer e monitorar capacidades estruturais das vigas em “I” pré-fabricadas de madeira.

4.2.1 NBR 7190 - Projeto de Estruturas de Madeira

A NBR 7190 fixa as condições gerais que devem ser seguidas nos projetos, na execução e no controle das estruturas correntes de madeira, tais como pontes, passarelas, coberturas, pisos, fôrmas e cimbramentos (NBR 7190, 1997). No entanto, no que se refere ao dimensionamento de vigas “I” com almas coladas ou pregadas, existe apenas uma recomendação para que seja realizado considerando que as mesas suportam todos os esforços de tensões normais devido a flexão e que a alma suporta todo o cisalhamento.

4.2.2 ASTM D 198 – Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes

Inúmeras avaliações de peças estruturais de madeira sólida têm sido conduzidas de acordo com os métodos de teste da ASTM D198 – 27. Embora a importância de sua utilização tenha um nível satisfatório, não deve ser subestimado o padrão original de 1927, que foi projetado principalmente para o material serrado, como longarinas para pontes de madeira e vigas. (ASTM, 2002).

A ASTM D198 oferece métodos de testes padrão para testes estáticos de peças de madeira em tamanhos estruturais, como as “I-Joists”, que são objetos de estudo deste trabalho, fornecendo o método de ensaio de flexão em quatro pontos para as vigas.

4.2.3 ASTM D 5055 – Standard Specification for Establishing and Monitoring Structural Capacities of Prefabricated Wood I-Joists

A ASTM D 5055 oferece especificações padrão para estabelecer e monitorar o comportamento estrutural de vigas pré-fabricadas de madeira, “I-Joists”, ou seja, é de suma importância para a verificação do desempenho dessas vigas. Descreve também os procedimentos, empíricos e analíticos, para a qualificação inicial das vigas, sendo esta, necessária para detalhes que muitas vezes influenciam as capacidades estruturais. Traz também, uma codificação para as principais formas de rupturas que possam vir a ocorrer nas vigas em “I”, mas não descarta a possibilidade de ocorrer outras formas ainda não descritas na norma. Essa codificação tem por finalidade fazer o controle de qualidade dessas peças e criar um padrão das principais rupturas (ASTM, 2004). A Figura 9 apresenta os principais modos de falhas das vigas “I” em testes feitos em escala real de utilização.

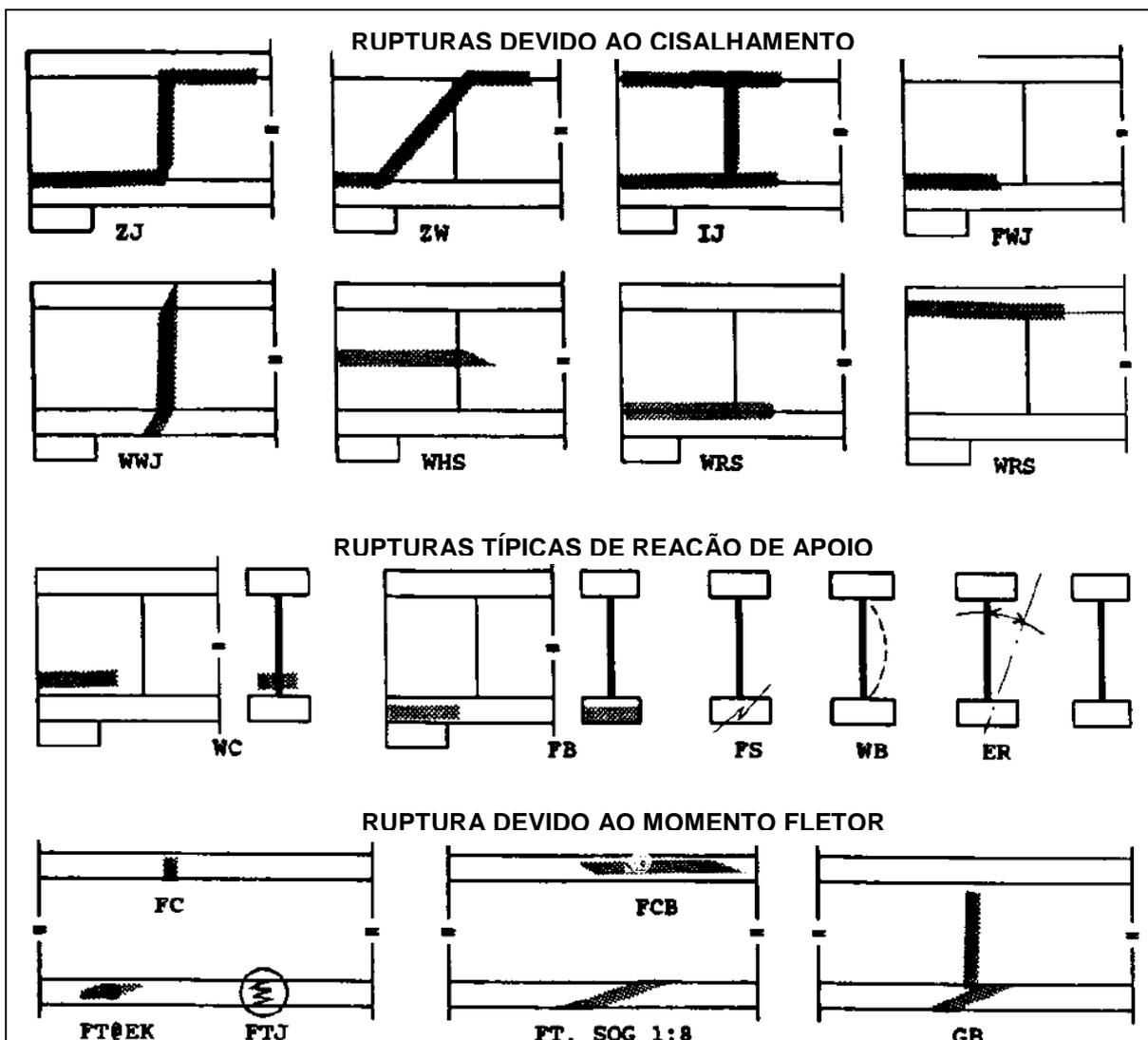


Figura 10 - Principais rupturas das vigas "I" em testes feitos em escala real
Fonte: ASTM (2004).

Sendo:

ZJ: A linha de ruptura 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, porem as falhas da ligação mesa-alma se estendem pros dois lados da ligação alma-alma.

PWJ: Ruptura na ligação mesa-alma superior ou inferior.

WWJ: Ruptura na ligação alma-alma.

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

WRS: Laminação deficiente 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: Ruptura na mesa devido à tração.

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

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

FCB: Ruptura na mesa devido à flambagem.

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

GB: Ruptura na mesa inferior sem deslocamento da emenda.

Visto a necessidade de se estabelecer um padrão para o desempenho de vigas “I”, a Associação de Madeira Engenheirada (APA) desenvolveu um programa de padronização denominado “*Performance Rated I-Joists*” (PRI), ou seja, vigas em “I” com desempenho controlado. Dentro dessa classificação, as vigas “I” têm um limite de flecha para um determinado vão, dentre outros, e precisam seguir padrões de produção rigorosos, atendendo às normas da ASTM (PEDROSA, 2003).

4.2.4 "PRI – Performance Rated I-Joists"

A marca APA EWS significa que a “I-Joist” está comprometida com os rigorosos padrões de qualidade APA e que *PRIs* são fabricadas de acordo com a *PRI-400*. Esse rigoroso programa foi criado para garantir o desempenho dos produtos com simplicidade na especificação e apresenta métodos de fácil instalação (Performance Rated I-Joists, 2012). A Figura 10 mostra os significados em cada posição da Marca APA EWS, sendo que, pode variar de acordo com o fabricante. O

Programa de Padronização PRI apresenta várias formas devido atualizações e revisões, dentre elas a APA *Performance Rated I-Joist Form X720* e a APA *Performance Rated I-Joist Form Z725*.

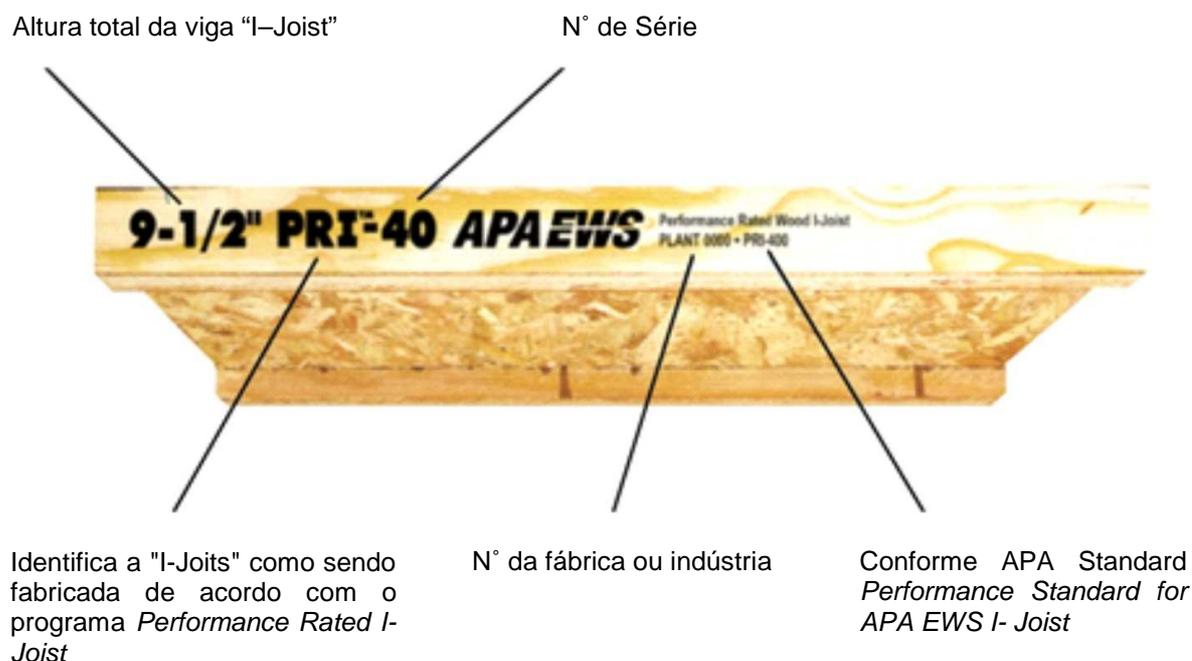


Figura 11 - Posição da marca na "I-Joist"

Fonte: Adaptado de APA *Performance Rated I-Joist* (2012).

De acordo com APA *Performance Rated I-Joist Form X720* (2012), as vigas são especificadas para uso em pisos residenciais e, em condições de uso interno.

A norma APA *Performance Rated I-Joist Form Z725* (2012) apresenta tabelas de referência de uso das vigas "I-Joists" com base em documentos normativos norte americanos e tomando como fator limitante a flecha $L/480$ considerando apenas o carregamento variável combinado.

As Tabelas 1 e 2 apresentam o vão máximo permitido para vigas com apenas um vão, ou seja, bi-apoiada e para vigas contínuas. A utilização das tabelas ocorre, basicamente, de acordo com quatro parâmetros: a altura da "I-Joist" (figura 31), a classificação da série da "I-Joist" (figuras 33 a 37), o espaçamento entre o centro vigas e, o vão da "I-Joist".

Tabela 1 - Vãos Permitidos por APA EWS Performance Rated I-Joists – Vão Simples (a,b,c,d)

		Vão Simples (m)			
Altura (mm)	Série da Viga	Espaçamento entre Vigas (cm)			
		30	40	50	60
241	PRI - 20	4,9	4,5	4,3	4,0
	PRI - 30	5,2	4,7	4,5	4,2
	PRI - 40	5,4	5,0	4,7	4,4
	PRI - 50	5,4	5,0	4,7	4,4
	PRI - 60	5,7	5,2	4,9	4,6
302	PRI - 20	5,9	5,4	5,1	4,7
	PRI - 30	6,2	5,7	5,4	5,0
	PRI - 40	6,5	5,9	5,6	5,1
	PRI - 50	6,5	5,9	5,6	5,2
	PRI - 60	6,8	6,2	5,8	5,4
	PRI - 70	7,0	6,4	6,0	5,6
	PRI - 80	7,5	6,8	6,4	6,0
PRI - 90	7,7	7,0	6,6	6,1	
356	PRI - 40	7,3	6,7	6,2	5,6
	PRI - 50	7,3	6,7	6,3	5,9
	PRI - 60	7,7	7,0	6,6	6,2
	PRI - 70	8,0	7,2	6,8	6,4
	PRI - 80	8,5	7,7	7,3	6,8
	PRI - 90	8,7	7,9	7,5	7,0
406	PRI - 40	8,1	7,4	6,7	6,0
	PRI - 50	8,1	7,4	7,0	6,1
	PRI - 60	8,5	7,8	7,3	6,8
	PRI - 70	8,8	8,0	7,6	7,0
	PRI - 80	9,4	8,5	8,1	7,5
	PRI - 90	9,6	8,8	8,3	7,7

Fonte: Adaptado de APA *Performance Rated I-Joists* (2012).

Tabela 2 - Vãos Permitidos por APA EWS Performance Rated I-Joists – Múltiplos vãos (a,b,c,d)

Altura (mm)	Série da Viga	Múltiplos vãos (m)			
		Espaçamento entre Vigas (cm)			
		30	40	50	60
241	PRI - 20	5,4	4,9	4,6	4,1
	PRI - 30	5,7	5,2	4,9	4,6
	PRI - 40	5,9	5,4	5,0	4,4
	PRI - 50	5,9	5,4	5,1	4,7
	PRI - 60	6,2	5,7	5,3	5,0
302	PRI - 20	6,4	5,8	5,1	4,1
	PRI - 30	6,7	6,2	5,7	4,6
	PRI - 40	7,0	6,2	5,7	5,1
	PRI - 50	7,0	6,4	6,1	4,9
	PRI - 60	7,4	6,7	6,4	5,9
	PRI - 70	7,6	7,0	6,6	5,6
	PRI - 80	8,1	7,4	7,0	6,5
PRI - 90	8,4	7,6	7,2	6,7	
356	PRI - 40	7,9	6,8	6,2	5,6
	PRI - 50	8,0	7,3	6,1	4,9
	PRI - 60	8,4	7,6	7,2	6,0
	PRI - 70	8,7	7,9	7,1	5,6
	PRI - 80	9,2	8,4	7,9	7,3
	PRI - 90	9,5	8,6	8,1	7,6
406	PRI - 40	8,5	7,4	6,7	6,0
	PRI - 50	8,8	7,4	6,1	4,9
	PRI - 60	9,3	8,5	7,5	6,0
	PRI - 70	9,6	8,5	7,1	5,6
	PRI - 80	10,2	9,3	8,8	7,3
	PRI - 90	10,5	9,6	9,0	8,1

Fonte: Adaptado de APA *Performance Rated I-Joists* (2012).

- Vão máximo permitido para pisos residenciais considerando valor de projeto para carga permanente 0,48kN/m² e carga acidental 1,91kN/m². Para o caso de viga contínua, o vão final deverá ser 40% ou mais do vão adjacente. Sendo a flecha limite L/480, considerando apenas o carregamento acidental.
- Vãos são baseados na composição do piso com revestimento "wood frame" conforme as exigências do APA *Rated Sheathing* ou APA *Rated Sturd I Floor*, para espaçamento 50 cm ou menos (Categoria de Desempenho

19/32) e 60 cm (Categoria de Desempenho 23/32). Os adesivos devem atender a ASTM D3498.

- c) O comprimento do último apoio deve ser pelo menos 4,5 cm. Para viga contínua, o comprimento do apoio intermediário deve ser pelo menos 8,9 cm.
- d) Enrijecedores não são necessários quando “I-Joists” apresentam vãos e espaçamentos contidos na tabela, exceto quando necessários suportes fabricados.

Apesar de APA PRI (2012) indicar não serem necessários enrijecedores de alma entre vãos, de acordo com a APA PR310C é necessário um enrijecedor de alma intermediário a cada aproximadamente 60 cm no comprimento da “I-Joist” para evitar a instabilidade local de alma (flambagem).

As vigas devem ser produzidas atendendo as seguintes especificações: as mesas devem ser constituídas do mesmo material, ou seja, mesma espécie de madeira com mesmas características. As dimensões das mesas estão relacionadas com a série da viga “I”, ou seja, depende do material, espécie e demais fatores. A alma consiste de painéis estruturais de madeira, podendo ser de “plywood”- madeira compensada- ou “OSB”. Estes painéis devem ser classificados como de Exposição 1 ou Exterior, obedecendo uma categoria de eficiência onde a espessura deve ser igual ou superior a 9,5mm. A montagem dessas vigas é feita com a utilização de adesivos de uso exterior, em conformidade com as normas ASTM D2559 e D7247 (APA *Performance Rated I-Joists*, 2012). No Brasil, os adesivos de uso exterior são conhecidos como adesivos navais e apresentam a característica de ser resistente a umidade.

São quatro as alturas totais avaliadas: 241mm, 302mm, 356mm, 406mm. Vigas de mesma altura são fabricadas com diferentes geometrias de mesa. A largura da mesa deve ser levada em consideração ao projetar os tipos de apoio utilizados nas ligações de extremidade. A maioria das fábricas fornecem “I-Joists” para distribuidores com comprimentos até 18,3 m. Em seguida, estas são cortadas para comprimentos usados frequentemente, assim como 4,9 a 11 m em incrementos de 0,6 m para entrega na obra (APA *Performance Rated I-Joists*, 2012).

O Programa de Padronização APA, apresenta ainda, alguns detalhes construtivos das “I-Joists” especificando sua forma de instalação em pisos residenciais.

Em relação a mesa da viga, é especificado que não deve, com exceção do corte em comprimento, ser cortada, perfurada ou entalhada, sendo que, a mesa superior e inferior devem estar, em seu interior, alinhadas verticalmente. As cargas concentradas devem ser aplicadas na superfície da mesa superior e não devem ser suspensas nas mesas inferiores com exceção de cargas leves, tal como ventiladores de teto ou luminárias. É preciso proteger as “I-Joists” antes da instalação não fazendo uso destas nas aplicações em que há exposição permanentemente ao tempo ou quando atingirem um teor de umidade maior ou igual a 16% (valor padrão norte americano – madeira seca) e quando forem permanecer em contato direto com concreto ou alvenaria. É possível utilizar as vigas “I-Joists” para suporte de paredes, logo acima delas, entretanto não admitindo peso distribuído maior que 2000 plf e, no caso de duas vigas, 4000 plf (APA *Performance Rated I-Joists*, 2012).

Em alguns casos pode ser necessária a instalação de enrijecedores de alma. De acordo com *PRI* (2012), há dois tipos de enrijecedores de alma”, aqueles localizados na região dos apoios intermediários ou das extremidades e os localizados no vão, quando existir carga concentrada aplicada na mesa superior da viga. Sugere –se que a altura dos enrijecedores de alma seja igual a distancia entre as mesas da viga menos 3,18mm até 6,35mm. Nos enrijecedores de alma localizados no vão, a abertura é localizada na base dos enrijecedores de alma. Já nos enrijecedores de alma do apoio, essa abertura é compreendida entre o topo do enrijecedores de alma e a base da mesa superior, assim como ilustrado na Figura 11.

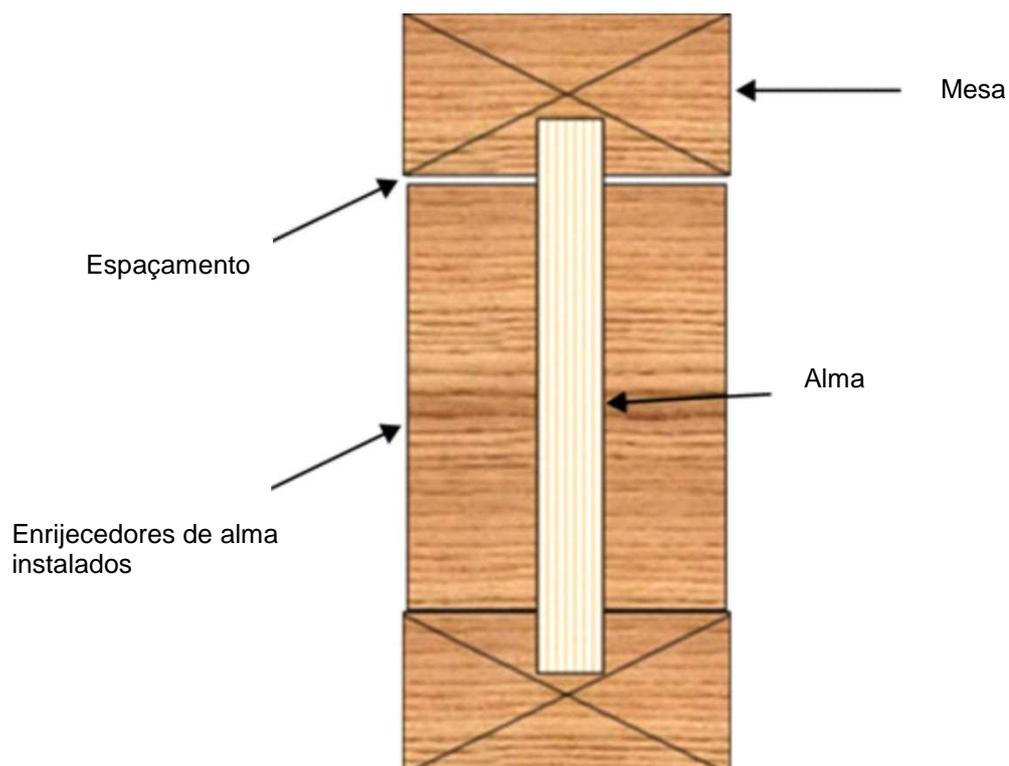


Figura 12 - Enrijecedor de alma
Fonte: Adaptado de Renovation Headquarters.

De acordo com os padrões das “I-Joists” apresentados na APA PRI (2012), várias propriedades de projeto são avaliadas. A Tabela 3 apresenta tais propriedades, de acordo com a padronização da APA para as quatro alturas da viga “I-Joist”.

Tabela 3 - Propriedades de Projeto para APA EWS Performance Rated I - JOISTS

Altura (mm)	Série da Viga	EI (kN.m ²)	M (kN.m)	V (kN)	K (kN)
241	PRI - 20	378,84	3,42	4,98	21974
	PRI - 30	456,33	4,37	4,98	21974
	PRI - 40	528,08	3,71	4,98	21974
	PRI - 50	533,82	5,15	4,98	21974
	PRI - 60	628,53	5,13	4,98	21974
302	PRI 20	645,75	4,43	6,32	27490
	PRI 30	777,77	5,65	6,32	27490
	PRI 40	898,31	4,81	6,32	27490
	PRI 50	906,92	6,66	6,32	27490
	PRI 60	1064,77	6,64	6,32	27490
	PRI 70	1193,92	8,94	6,32	27490
	PRI 80	1486,66	9,41	6,32	27490
	PRI 90	1638,77	11,89	8,56	27490
356	PRI 40	1317,33	5,79	7,61	32383
	PRI 50	1328,81	7,95	7,61	32383
	PRI 60	1561,28	7,99	7,61	32383
	PRI 70	1747,83	10,66	7,61	32383
	PRI 80	2169,72	11,34	7,61	32383
	PRI 90	2387,84	14,18	9,45	32383
402	PRI 40	1793,75	6,71	8,76	37009
	PRI 50	1808,10	9,11	8,76	37009
	PRI 60	2120,93	9,27	8,76	37009
	PRI 70	2370,62	12,22	8,76	37009
	PRI 80	2938,88	13,14	8,76	37009
	PRI 90	3231,62	16,25	10,36	37009

Fonte: Adaptado de APA Performance Rated I-Joists (2012).

Rigidez a flexão (EI) da Viga.

Momento Fletor (M) da Viga.

Força Cortante (V) da Viga.

Fator de cisalhamento (K).

4.3 HIPÓTESES DE CÁLCULO

Sendo que, a concepção de peças compostas de madeira permite o posicionamento dos materiais para que se aproveite a melhor característica de cada um, as mesas são produzidas para suportar a maior parte do momento oferecendo

elevada rigidez à flexão, e a alma, o esforço referente ao cisalhamento. Vários autores estudaram os métodos de cálculo das seções transversais. Proporcionando simplificação no cálculo, as vigas encontradas no mercado são produzidas utilizando adesivos rígidos ligação alma/mesa, onde elimina-se o deslizamento pelo cisalhamento. Como a alma possui um módulo de elasticidade menor, as tensões de tração e compressão são amplificadas nas mesas (LEICHTI; FALK; LAUFENBERG, 1990). As Figuras 12 e 13 ilustram as tensões que atuam na viga devido ao momento fletor e ao esforço cisalhante, respectivamente.

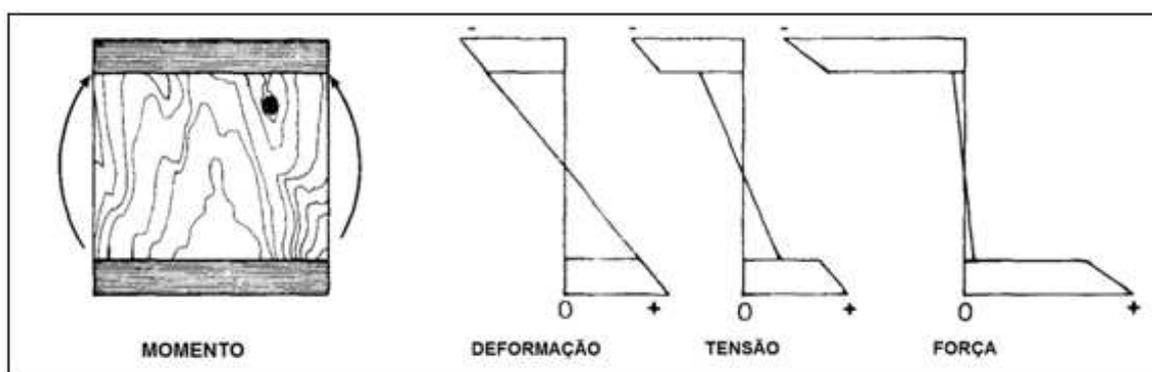


Figura 13 - Distribuição da deformação, tensão e força de vigas “I” submetidas a momento fletor positivo

Fonte: Leichti; Falk; Laufenberg (1990).

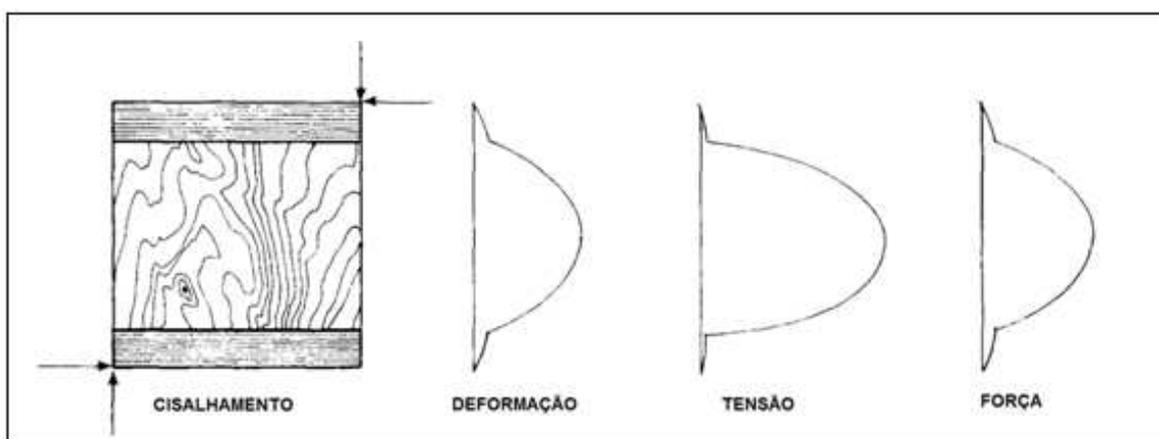


Figura 14 - Distribuição da deformação, tensão e força de vigas “I” submetidas ao cisalhamento

Fonte: Leichti; Falk; Laufenberg (1990).

4.3.1 Método da seção transformada para seção “I” formada com três peças de materiais diferentes

Frequentemente, se utiliza o método da seção transformada quando se deseja considerar a diferença de material entre os elementos de uma viga composta. Este método tem como princípio transformar a seção em outra equivalente que seja constituída por apenas um material, de forma que apresentem a mesma rigidez a flexão. Tomando-se o caso da flexão reta em torno do eixo principal horizontal, na seção transformada os elementos terão sua área e sua largura modificadas, mas não a altura. Para utilizar esse método é necessária a escolha de um material de referencia, assim, a seção transformada será composta apenas desse material, podendo-se calcular a razão modular para cada material, onde a largura de cada elemento da viga composta é multiplicada pela razão modular do material de que é constituído, assim como as tensões nos elementos transformados. É importante lembrar que essa descrição vale apenas em cálculos relacionados a flexão, pois seus fundamentos são as hipóteses básicas da Teoria da Flexão (SANTANA, 1997).

Com a Equação (1) é possível determinar relações entre módulos de elasticidade:

$$n_i = \frac{E_i}{E_C} \quad (1)$$

Onde:

E_i = módulo de elasticidade de cada elemento.

E_C = módulo de elasticidade comparativo.

n_i = relação entre o módulo de elasticidade do material de cada um dos elementos e o módulo de elasticidade comparativo. (razão modular)

A Figura 14 apresenta a seção transversal para cálculo de viga “I” com três elementos.

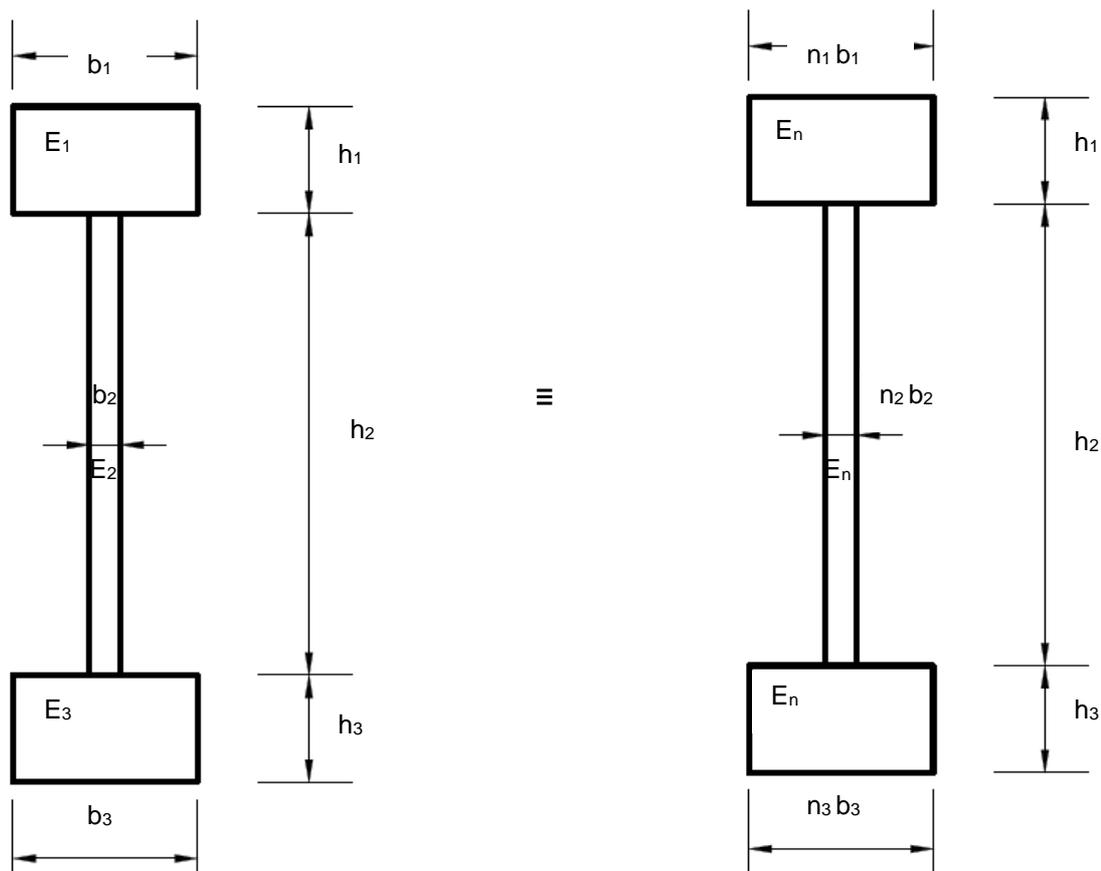


Figura 15 - Seção transformada para viga “I” com três elementos.

Com a equação (2) é possível determinar a área da seção transformada de cada peça.

$$A_i = n_i b_i h_i \quad (2)$$

Onde:

b_i = largura de cada elemento.

h_i = altura de cada elemento.

Após, determinar-se o centroide da seção transformada, com a equação (3) é possível determinar a inércia efetiva da seção transversal. A equação adaptada para o caso em estudo encontra-se no apêndice A.

$$\begin{aligned}
 I_{ef} = & \frac{n_1 b_1 h_1^3}{12} + n_1 b_1 h_1 (y_1 - y_0)^2 \\
 & + \frac{n_2 b_2 h_2^3}{12} + n_2 b_2 h_2 (y_2 - y_0)^2 \\
 & + \frac{n_3 b_3 h_3^3}{12} + n_3 b_3 h_3 (y_3 - y_0)^2
 \end{aligned} \tag{3}$$

Onde:

I_{ef} = Inércia efetiva da seção transversal.

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

4.3.2 Cálculo das tensões normais e de cisalhamento

De acordo com as hipóteses de Euler-Bernoulli para vigas as tensões normais e tensão de cisalhamento são dadas por:

$$\sigma = n_i \frac{M}{I_{ef}} y \tag{4}$$

$$\tau_{m\acute{a}x} = n_i \frac{VM_s}{I_{ef} b_2}$$

A Figura 15 apresenta a seção transversal para cálculo do momento estático que deve ser determinado considerando a seção transformada.

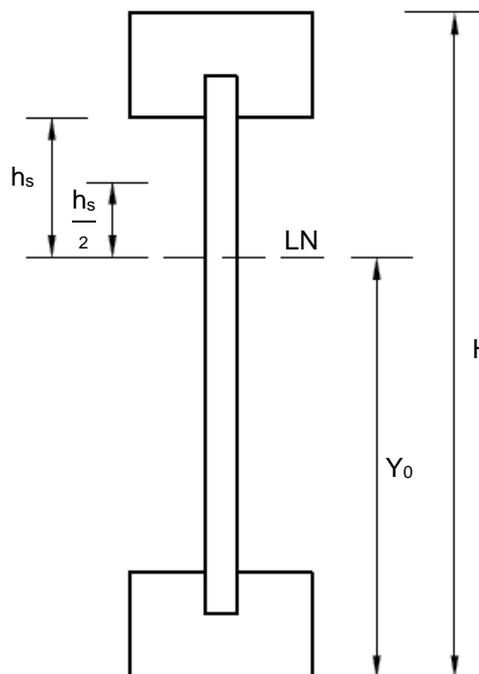


Figura 16 - Representação gráfica da viga com seção transversal “I”.

Com a Equação (5) é possível determinar o cálculo do momento estático.

$$M_s = n_1 b_1 h_1 (y_1 - y_0) + 2 \left[n_2 b_2 h_s \left(\frac{h_s}{2} \right) \right] - 2 \left[n_4 h_4 b_4 \left(h_s + \frac{h_4}{2} \right) \right] \quad (5)$$

4.3.3 Estimativa de rigidez considerando a deformação por cisalhamento

De acordo com estudos realizados por Garbin (2012), quanto ao critério de rigidez a flexão, as vigas apresentaram uma diferença considerável variando de 19% a 31%. Tal fato pode ter origem pela deformação por cisalhamento que não foi considerada no método de cálculo. Garbin (2012) cita que de acordo com o American Wood Council (1999) as vigas de madeira I, devido ao material otimizado da alma, são suscetíveis aos efeitos de deformação por cisalhamento podendo ser responsável por 15% até 30% do total da flecha da viga. Portanto, ao se estudar o desempenho das “I-Joists” é necessário considerar a deformação por cisalhamento.

A APA-PR310C recomenda que sejam utilizadas as seguintes equações para o cálculo de flecha para vigas “I”:

$$\delta_{\text{total}} = \delta_{\text{tensão normal}} + \delta_{\text{cisalhamento}} \quad (6)$$

Onde, a deformação devido às tensões normais é calculada considerando as teorias de resistência dos materiais e a deformação por cisalhamento segundo Rancourt (2008) pode ser considerada como sendo:

$$\delta = \frac{8M}{K} \quad (7)$$

A Figura 16 apresenta métodos de cálculo de flecha para vigas “I-Joists” considerando a deformação por cisalhamento para alguns casos de carregamentos comuns.

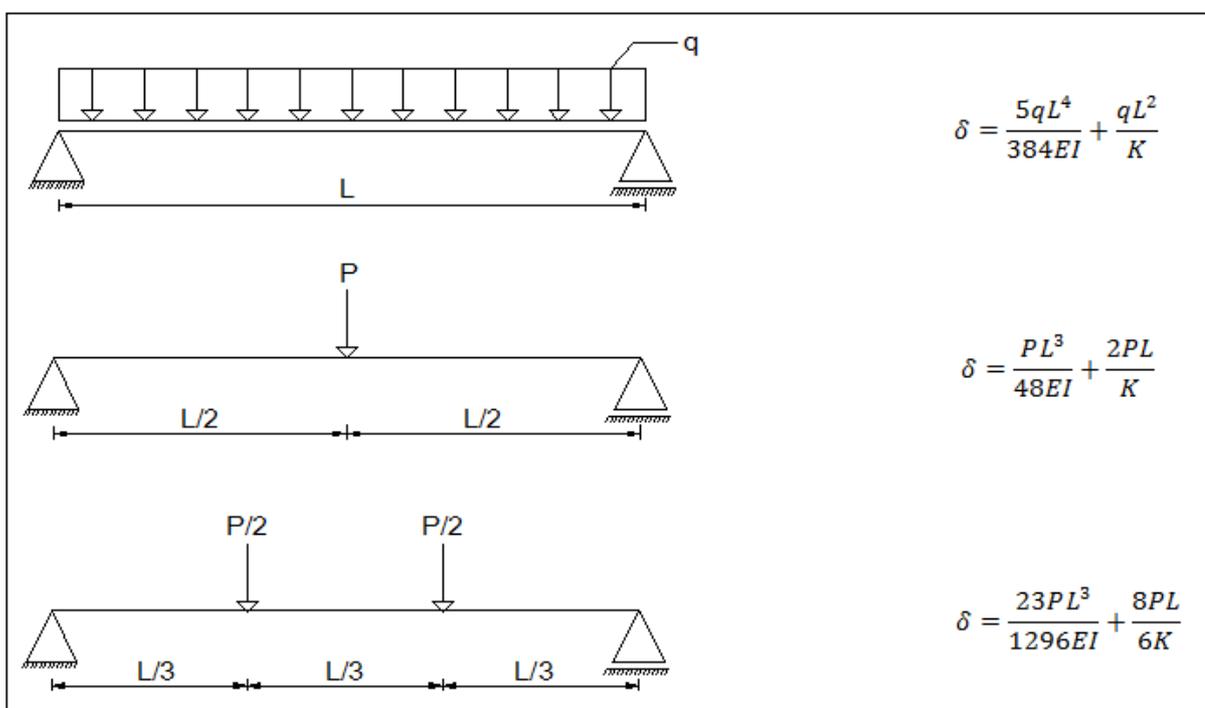


Figura 17 - Cálculo de flecha para “I-Joists” considerando a deformação por cisalhamento
Fonte: Rancourt (2008).

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.

5 METODOLOGIA

Na avaliação do desempenho estrutural da “I-Joist” foram estudados modelo teóricos e experimental. Os critérios para fabricação e verificação de desempenho foram baseados nas normas internacionais e os testes laboratoriais de acordo com as normas brasileiras e internacionais.

Realizou-se a fabricação de uma viga em escala real para os testes laboratoriais para comparar os resultados experimentais com os resultados teóricos. Ao fim do estudo da “I-Joist” foi produzido um documento onde constam os critérios para a padronização de “I-Joists” no Brasil para sua posterior fabricação, atendendo os modelos de normas internacionais.

Os ensaios foram desenvolvidos no Laboratório de Sistemas Estruturais da (UTFPR) Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Campo Mourão.

5.1 MATERIAIS

Foram doadas pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Campo Mourão, madeiras serradas da espécie de *Pinus Taeda*, as quais foram utilizadas nas mesas. Para a alma, foi utilizado o painel de OSB estrutural (*Home Plus*) do fabricante MASISA de Ponta Grossa - Paraná, com dimensões 1220 mm x 2440 mm x 9,5 mm.

As vigas de madeira da espécie *Pinus Taeda* foram selecionadas para padronização e, então colocada em tabiques até atingir à umidade recomendada pela NBR 7190 (2011) que é de 12%. Para a separação de peças isenta de defeitos, a madeira foi classificada por um processo visual na condição de seca e o teor de umidade se deu através do medidor elétrico de umidade.

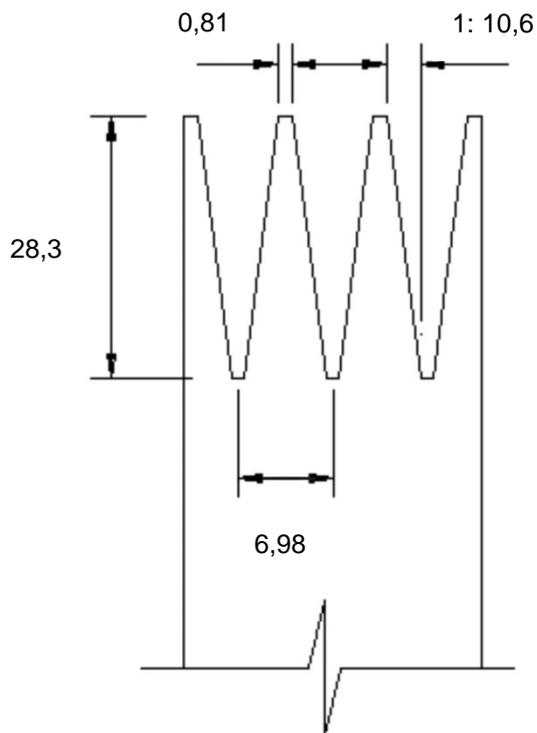
O adesivo utilizado foi o fenol-resorcinol-formaldeído (PRF), o qual é encontrado no mercado com o nome comercial de CASCOPHEN – RS 216M, produzido pela Hexion Specialty Chemicals, usada em conjunto com o preparado Endurecedor FM-60-M (em pó) na proporção por peso de 20%. Ele foi utilizado para colagem das ligações mesa – mesa e mesa – alma. Na ligação alma – alma foi realizada a emenda de topo.

Para a união longitudinal das mesas foram utilizadas as emendas dentadas (*finger joints*), onde, a região da emenda foi isenta de defeito afim de não

influenciarão na resistência. Os dados sobre a geometria da emenda estão ilustrados na figura 18. No momento de colagem destas emendas, foi necessário um teor de umidade da madeira entre 8% e 18% e a diferença de umidade entre as duas partes da emenda não exceder 5% salvo as especificações do fabricante do adesivo.



Figura 18 – Finger Joint



*Medidas em mm

Figura 19 - Geometria da emenda finger joint

5.2 MÉTODOS

No Brasil, os ensaios padronizados para a madeira, são descritos no Anexo B da norma brasileira NBR 7190 (1997), Projeto de Estruturas de Madeira. Dentre as propriedades que devem ser determinadas para caracterização da madeira para uso em estruturas, está a compressão paralela às fibras, que determinará a resistência e rigidez paralela às fibras da madeira.

Após o ensaio de resistência e rigidez à flexão da viga, foram retiradas amostras de corpos de prova de madeira das mesas superior e inferior justamente próximo da região de ruptura da viga. A Figura 19 ilustra os corpos de prova.

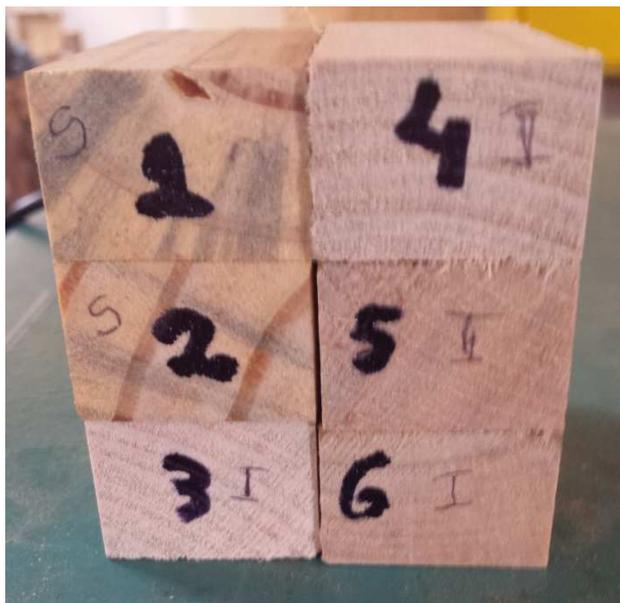


Figura 20 - Corpos de prova para ensaio de compressão paralela às fibras.

As medições dos corpos de prova foram feitas com exatidão de 0,01 mm. O ensaio foi realizado na máquina universal de ensaio DL-30000 da Emic. Para determinar a resistência um carregamento monotônico crescente, com uma taxa em torno de 10 MPa/min foi aplicado (NBR 7190,1997). Na Figura 20 apresenta-se o arranjo para o ensaio de compressão paralela às fibras.

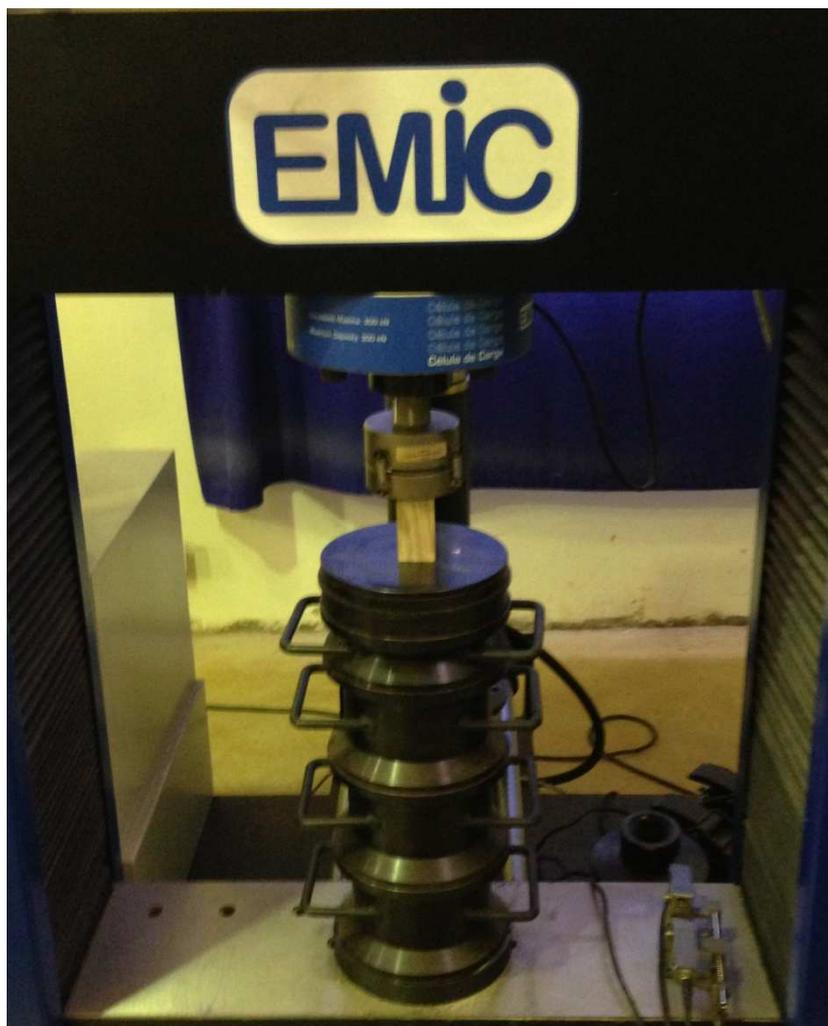


Figura 21 - Arranjo para o ensaio de compressão paralela às fibras.

5.3 MONTAGEM DAS VIGAS

Após a caracterização da madeira, procedimento realizado afim de obter valores semelhantes nas mesas da viga, 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 desengrossadeira e plaina chegando às dimensões corretas; 3) foram retirados os nós das peças; 4) foram realizadas as emendas dentadas (*finger joints*); 5) com o auxílio da tupa foi feito os sulcos para o encaixe da alma. A Figura 21 mostra o processo de confecção das mesas.



Figura 22 - Confeção 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), sendo o arranjo ilustrado na Figura 22.



Figura 23 - Arranjo para o ensaio do módulo de elasticidade das mesas.

O ensaio foi realizado no pórtico de reação com carregamento aplicado no centro do vão, a NBR 7190 (1997) indica uma taxa de 10 MPa/min para os ensaios de flexão. Os deslocamentos foram medidos por transdutores de deslocamento, conhecidos como relógios comparadores.

O módulo de elasticidade experimental das mesas foi calculado conforme a equação (8):

$$E_m = \frac{PL^3}{48I\delta} \quad (8)$$

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.

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 23 mostra a colagem da viga.



Figura 24 - Colagem das vigas.

Foi produzida uma viga de 24 cm de altura e com 6 m de comprimento. A viga é constituída de duas mesas de madeira serrada da espécie *Pinus Taeda* e uma alma de OSB. As Figuras 24 e 25 ilustram as dimensões da seção transversal e o comprimento da viga, respectivamente.

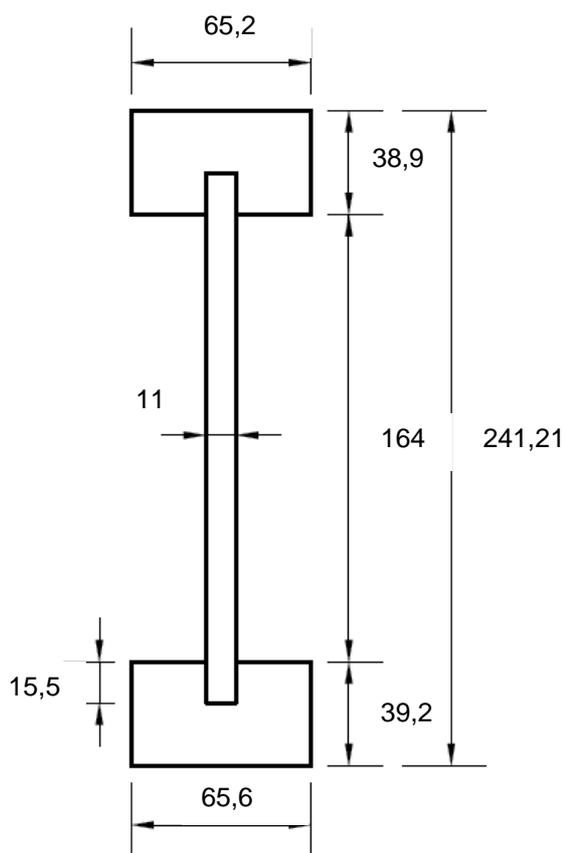


Figura 25 - Seção das Vigas "I-Joist"

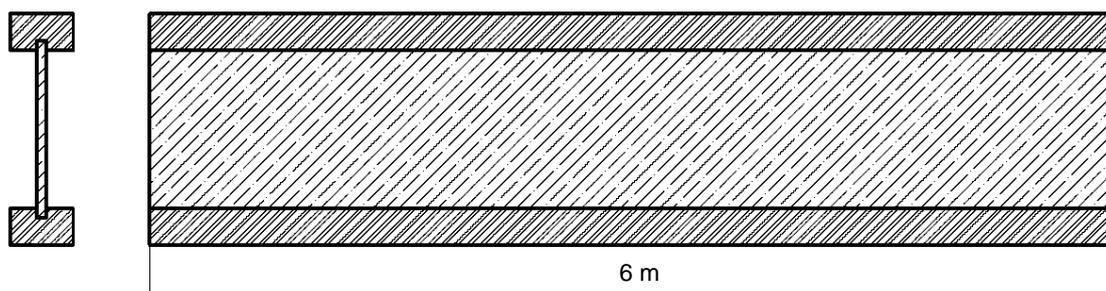


Figura 26 - Comprimento da Viga "I-Joist"

5.4. ENSAIO DA VIGA

A viga foi testada de forma a mensurar experimentalmente a rigidez à flexão e a capacidade de carga. O ensaio foi realizado no pórtico de reação, conforme Figura 27, 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 ao longo do comprimento.

Os deslocamentos foram medidos com o auxílio de transdutores de deslocamento modelo “Mitutoyo DT-100A” localizados na região central e relógios comparadores nas extremidades. O equipamento de aquisição de dados utilizado foi LYNX 2161. Os softwares utilizados foram: AqDados e AqAnalysis. A Figura 26 mostra os transdutores e o equipamento para o ensaio.

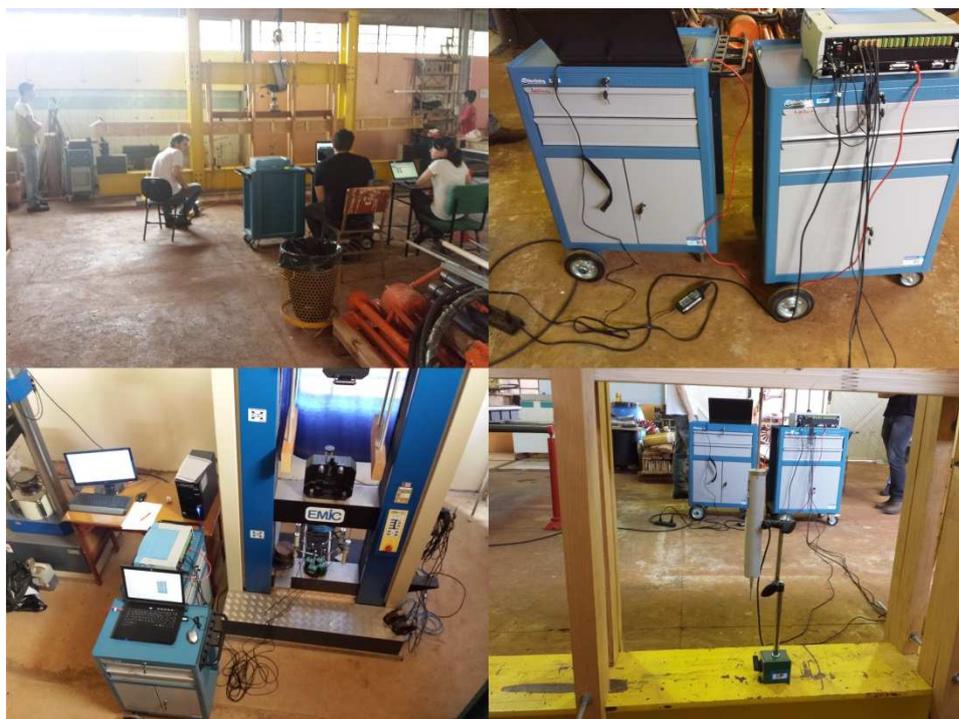


Figura 27 - Equipamentos e Transdutores utilizados no ensaio de Flexão Estática da viga.



Figura 28 - Pórtico de reação.

De modo a evitar uma possível instabilidade lateral durante o ensaio, foram colocados enrijecedores nos pontos de aplicação da carga e nos apoios (e a cada 60 cm com especificação da APA-PR310C e na união da alma). A Figura 28 mostra a viga “I” com enrijecedores.



Figura 29 - Viga “I” com enrijecedores.

Após obtido o valor dos deslocamentos, 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. Os experimentos foram conduzidos conforme especificações apresentadas no Capítulo 5. Alguns resultados serão apresentados em forma de tabela e/ou gráficos e o memorial de cálculo consta no apêndice ao fim deste trabalho.

6.1 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 4 indicando os resultados para cada corpo de prova com os respectivos valores de resistência a compressão paralela às fibras. As dimensões nominais dos corpos são de 5x5x15 cm (NBR 7190/97).

Tabela 4 - Compressão paralela às fibras

Corpo de Prova	Tensão Máxima (MPa)
CP 1	33,06
CP 2	34,06
CP 3	41,76
CP 4	39,77
CP 5	42,64
CP 6	40,86
CP 7	33,10
CP 8	31,50
CP 9	42,70
CP 10	42,60

O valor médio correspondente a resistência a compressão paralela às fibras foi de 40 MPa.

6.2 CARACTERÍSTICAS DO OSB

A determinação das características das chapas de OSB utilizadas na produção da alma foi realizada em trabalho anterior. Para este trabalho foram utilizados os valores obtidos por Dias (2004), sendo que o módulo de elasticidade à flexão vertical médio é 4470,9 MPa, o módulos de elasticidade transversal é de 1730,3 MPa e a resistência média é 74,8 MPa.

6.3 ANÁLISE DA VIGA

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 viga produzida tem seção transversal indicada na Figura 24 e vão de 6 m.

A Tabela 5 apresenta um comparativo entre a rigidez teórica e a experimental. A rigidez teórica foi calculada utilizando a equação (3), e a rigidez experimental foi obtida utilizando a equação (9) a seguir:

$$EI_{\text{exp}} = \frac{23PL^3}{1296\delta_{\text{exp}}} \quad (9)$$

Tabela 5 - Comparativo entre os valores de rigidez efetiva teórica e experimental

$EI_{(\text{ef}) \text{ teórica}}$ (kN.cm ²)	$EI_{(\text{ef}) \text{ exp}}$ (kN.cm ²)	Diferença (%)
5680889	5282767	7,0

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

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

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

A Tabela 6 apresenta os resultados de flecha experimental obtidos no ensaio de flexão estática a quatro pontos da viga para os cinco transdutores utilizados.

Tabela 6 - Flecha experimental

P (kN)	Posição dos Transdutores (m)	Flecha Exp (mm)
2,090	0,00	0,00
	1,93	18,39
	2,90	18,26
	3,87	17,43
	5,80	0,00
4,499	0,00	0,00
	1,93	31,91
	2,90	33,92
	3,87	31,23
	5,80	0,00

Os valores obtidos no segundo carregamento apresentaram um aumento de aproximadamente 46% em relação ao primeiro carregamento. A Tabela 7 apresenta os valores de flecha experimental obtidos para o carregamento médio de 2,409 kN.

Tabela 7 - Flecha experimental para carregamento médio

P (kN)	Posição dos Transdutores (m)	Flecha Exp (mm)
2,409	0,00	0,00
	1,93	13,52
	2,90	15,66
	3,87	13,80
	5,80	0,00

A flecha máxima experimental no meio do vão foi de:

$$\delta_{\text{experimental}} = 15,66 \text{ mm}$$

De acordo com a equação (11) no apêndice A foi obtida a flecha teórica devido a flexão com o valor de:

$$\delta_{\text{flexão}} = 14,68 \text{ mm}$$

Para considerar a influência do cisalhamento, utilizou-se a equação (7), obtendo o valor de:

$$\delta_{\text{cisalhamento}} = 0,81 \text{ mm}$$

Assim, a flecha total teórica é igual a:

$$\delta_{\text{teórica}} = 15,49 \text{ mm}$$

A Tabela 8 apresenta um comparativo entre a flecha teórica e experimental na região central do vão, mostrando a diferença quando não se considera o efeito do cisalhamento e quando há a influência do mesmo.

Tabela 8 - Comparativo entre a Flecha Teórica e Experimental

	Flecha (mm)	Diferença em %
Flecha Máxima Exp	15,66	
Flecha Teórica s/ cisalhamento	14,68	6,3
Flecha Teórica c/ cisalhamento	15,49	1,08

Observando os resultados da Tabela 8 pode-se notar que a flecha teórica calculada considerando-se a deformação por cisalhamento fica mais próxima da flecha experimental do que se não considerar a deformação por cisalhamento. O resultado alcançado corrobora com os obtidos por estudos anteriores, indicando que a deformação por cisalhamento deve ser considerada nas vigas “I-Joists”. Como a viga testada possui relação L/h igual a 24, mais estudos devem ser conduzidos no sentido de verificar numericamente e experimentalmente a influencia da deformação por cisalhamento no deslocamento das vigas “I-Joists”.

Foram realizados os cálculos para a capacidade de carga teórica conforme metodologia descrita no apêndice A e obtida a carga experimental no ensaio. As comparações foram realizadas considerando os estados limites últimos de tensão normal máxima de compressão na mesa superior. O valor obtido para a capacidade de carga teórica foi de 16,4 kN, com diferença de 46% do valor obtido para a

capacidade de carga experimental que foi de 8,82kN. A Figura 29 apresenta a ruptura da viga produzida.



Figura 30 - Ruptura da viga "I".

Pode-se notar que a ruptura ocorreu, conforme esperado, na região mais solicitada da viga "I" próximo ao centro do vão, perto de uma emenda, sem o descolamento da mesma. É importante ressaltar que não ocorreram problemas de instabilidade local constatando que os enrijecedores utilizados foram suficientes ao comprimento da viga. A figura 30 apresenta a ruptura ocorrida na viga.

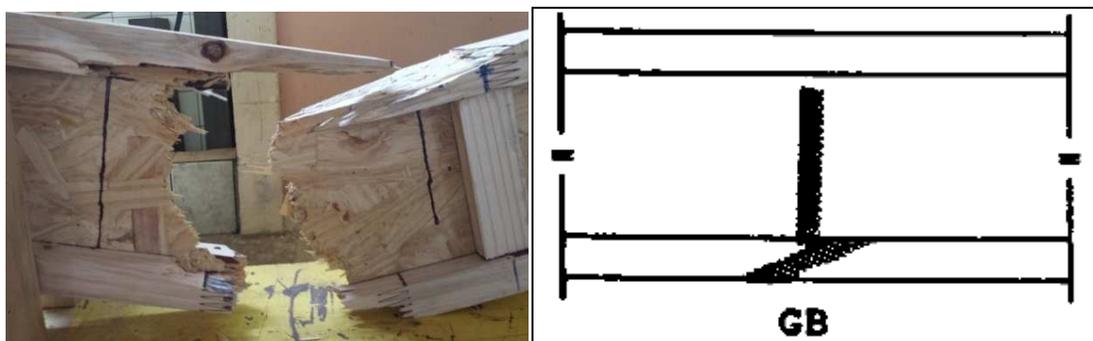


Figura 31- Comparativo da ruptura observada com a da Figura 9

6.4 CRIAÇÃO DO DOCUMENTO DE PADRONIZAÇÃO DE VIGA “I – JOIST”

Neste item será apresentada a criação do documento que contem critérios de desempenho em algumas séries da viga de madeira de seção transversal “I”. O documento se encontra no apêndice B.

A criação deste documento levou em consideração valores teóricos, não tendo relação com a parte experimental deste trabalho. Os parâmetros obtidos visam contribuir para o pré-dimensionamento de algumas estruturas de madeira, sendo necessária atenção quanto às condições apresentadas para os cálculos.

6.4.1 Dados Gerais

Para o dimensionamento da viga “I-Joist”, foi considerada a classe de resistência das coníferas C25 (NBR 7190/97).

O vão máximo permitido apresentado nas tabelas de referência do documento foi inserido nos cálculos de acordo com o atendimento as verificações de flecha e tensões normal e de cisalhamento.

A seção transversal da viga varia de acordo com a série da viga. Sendo o memorial de cálculo para as propriedades geométricas apresentado no Apêndice A.

Os espaçamentos entre o centro das vigas são de: 30 cm, 40 cm, 50 cm e 60 cm.

6.4.2 Materiais

Os materiais considerados foram:

- Viga de madeira com seção transversal I
- Isolante térmico acústico (PET)
- Painel estrutural “OSB”

- Manta Anti ruído
- Concreto leve (contrapiso)
- Revestimento Cerâmico (piso acabado)

De acordo com dados obtidos nos Catálogos Técnicos LP, a viga I e o painel estrutural de “OSB” apresentam pesos de 3,39 Kg/m e 33,7 Kg/chapa, respectivamente.

A manta anti ruído e o concreto apresentam pesos específicos de 17kN/m³ e 24kN/m³, respectivamente (NBR 6120/80). Sendo suas espessuras de 2,5 mm e 50 mm.

O isolante térmico acústico considerado, manta PET, pesa 0,35Kg/m rolo, enquanto o revestimento cerâmico considerado foi de 15Kg/m².

6.4.3 Ações

Os valores mínimos de cargas verticais acidentais são de acordo com a NBR 6120/80.

- Para Despensa, Área de Serviço e Lavanderia: 2,0 kN/m².
- Para Dormitórios, Sala, Copa, Cozinha e Banheiro: 1,5 kN/m².

De acordo com NBR 8681/04, o cálculo de carregamentos para combinações últimas consta no item 5.1.3.2. sendo que os coeficientes de ponderação constam no item 5.1.4. e apresentam valores de : 1,2 para viga I, 1,5 para o concreto, 1,35 para produtos industrializados e 1,5 para carregamento acidental.

6.4.4 Propriedades Mecânicas

Os valores de cálculo das propriedades mecânicas da viga são:

- $f_{c0,d} = 10$ Mpa (Resistência à compressão)
- $f_{v,d} = 1,59$ Mpa (Resistência ao cisalhamento)
- $E_{c0,ef} = 4760$ Mpa (Módulo de Elasticidade)
- $E_{c0,ef\ osb} = 0,29$ Mpa (Módulo de Elasticidade)

Para o “OSB”, os valores foram retirados de trabalho realizado anteriormente, onde a resistência ao cisalhamento é igual a 5,1 MPa (Dias, 2004).

6.4.5 Deformações

Considerando carregamento distribuído (q), a flecha foi calculada de acordo com a equação a seguir:

$$\delta = \frac{5 q L^4}{384 E I_{ef}} + \frac{q L^2}{K} \quad (10)$$

6.4.6 Verificações

As flechas limites consideradas foram de $L/350$ para vigas biapoiadas com revestimentos frágeis e $L/300$ considerando o carregamento acidental. Verificou-se também o valor absoluto de 15 mm.

A verificação das tensões se deu através dos valores já apresentados no item anterior, onde a tensão normal deve ser menor que 10 MPa e a tensão de cisalhamento menor que 1,59 MPa.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As vigas “I-Joist”, utilizadas especialmente em estruturas de pisos residenciais, surgiram para atender demandas de maiores vãos necessários em alguns ambientes.

Apesar de não existirem indústrias de vigas “I-Joists” no Brasil, vários estudos vêm sendo realizados para avaliação do desempenho deste elemento. Neste trabalho foi estudado o desempenho da viga de madeira de seção transversal “I” com dimensões reais a fim de verificar seu comportamento estrutural. Com base nos resultados obtidos, pode - se obter as seguintes conclusões:

- A flecha teórica calculada considerando-se a deformação por cisalhamento fica mais próxima da flecha experimental do que se não considerar a deformação por cisalhamento. Os resultados alcançados para flecha teórica e experimental corroboram com os obtidos por estudos anteriores, indicando que a deformação por cisalhamento deve ser considerada nas vigas “I-Joists”.

- Devido a pouca altura da viga em relação ao seu comprimento, os resultados que avaliam a influencia do cisalhamento não foram esclarecedores para estudo. Mais estudos devem ser conduzidos no sentido de verificar numericamente e experimentalmente a influencia da deformação por cisalhamento no deslocamento das vigas “I-Joists” Sugere-se vigas de dimensões variadas, como por exemplo, alturas maiores e vãos menores.

- Os enrijecedores instalados nos pontos de aplicação de carga, nos apoios e, a cada 60 cm no comprimento da viga foram suficientes para evitar flambagem local da alma. Sugere-se que mais trabalhos sejam realizados para avaliar a ocorrência desse efeito.

- Mais trabalhos devem ser realizados para ensaios com vigas de séries diferentes para comparação com os valores teóricos do documento criado.

REFERÊNCIAS

ABRANTES, C. A. **Determinação da carga crítica de instabilidade lateral no regime linear elástico, em vigas de madeira laminada colada (MLC)**. 2012. 220f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

AMERICAN WOOD COUNCIL. **Wood I-Joist Awareness Guide**. Washington: American Forest & Paper Association, 2006b. 6 p. Disponível em: <<http://www.woodaware.info/PDFs/I-joists.pdf>>. Acesso em: 05 Ago. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas. Rio de Janeiro, 2004.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials. ASTM D1037-99.1999a.

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

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

CADERNO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS. São Carlos: 2007. ISSN 1809-5860.

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?PDFFilename=managed/C800.pdf>. Acesso em: 07 Jul. 2013.

ENGINEERED WOOD ASSOCIATION. **Performance Rated I-Joists**. Form N° EWS Z725D. 2012. Disponível em: <http://www.apawood.org/pdfs/download_pdf.cfm?PDFFilename=managed/Z725.pdf>. Acesso em: 05 Jul. 2013.

ENGINEERED WOOD ASSOCIATION. **Performance Rated I-Joists**. Form Nº EWS X720D. 2012. Disponível em: <http://www.apawood.org/pdfs/download_pdf.cfm?PDFFilename=managed/X720.pdf>. Acesso em: 05 Jul. 2013.

FISSETTE, PAUL. **Chosing Between Oriented Strandboard and Plywood**, 2005. Disponível em: < <http://bct.eco.umass.edu/publications/by-title/choosing-between-oriented-strandboard-and-plywood/>>. Acesso em: 15 Ago. 2013.

GARBIN, D. **ANÁLISE DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DE VIGAS I COM MESAS CONSTITUÍDAS DE MADEIRAS REAPROVEITADAS DE BATENTES**. 2013. 69f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2013.

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

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.

LEICHTI, R. J.; FALK, R. H; LAUFENBERG, T. L. **Prefabricated wood composite I-Beams: A literature review**. Wood and Fiber Science 1990.

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

MACÊDO, A. N.; JUNIOR, C. C. **Estudo de emendas dentadas em madeira laminada colada (MLC): Avaliação de método de ensaio – NBR 7190/1997**. 1996. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

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.

OSB in Wood Frame Construction. **OSB Performance by Design**, 2005. Edição 2005.

Painel de OSB oferece maior resistência para uso em estruturas. **Revista da Madeira**, n. 108, out. 2007. Disponível em: <http://migre.me/fXZ80>. Acesso em: 04 ago. 2013.

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

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

SANTANA, C. L.O. **Vigas de madeira de seção composta com alma em chapa de compensado.** 1997. 214f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

SANTOS, A. M DE L. **Avaliação teórica e experimental de vigas em “I” Pré-fabricadas de madeira com flange de painéis de lâminas paralelas (LVL) e alma de painéis de partículas orientadas (OSB) e compensado.** 2008. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade de Brasília, Brasília, 2008. Disponível em: <http://repositorio.bce.unb.br/bitstream/10482/2243/1/2008_Airton%20Mauro%20de%20Lara%20Santos.pdf>. Acesso em: 10 Jul. 2013.

SANTOS, A.M.L.; DEL MENEZZI, C.H.S.; BORTOLETTO JR., G. Comportamento teórico e experimental de vigas de madeira em perfil I: efeito do tipo de alma na resistência, rigidez e deslocamento vertical. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.37, n.82, p.131-41, jun. 2009. Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr82/cap03.pdf>>. Acesso em: 15 jul. 2013.

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

USDA, United States Department of Agriculture. **Wood handbook – Wood as an engineering material.** Madison: Forest Products Laboratory, 2010. 508 f. Disponível em: <http://www.fpl.fs.fed.us/documents/fplgtr/fp_l_gtr190.pdf>. Acesso em: 10 Ago. 2013.

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

YEH, Borjen. **ASTM Standard for Engineered Wood Products.** 2003. Disponível em <http://www.astm.org/SNEWS/JUNE_2003/yeh_jun03.html>. Acesso em: 15 Ago. 2013.

APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULO DA VIGA

Módulo de elasticidade mesa superior:

$$E_1=954,1\text{kN/cm}^2$$

Módulo de elasticidade da alma:

$$E_2=447,09\text{kN/cm}^2$$

Módulo de elasticidade mesa inferior:

$$E_3=1219,5\text{kN/cm}^2$$

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

Os valores E_1 e E_3 foram obtidos através de ensaios experimentais de flexão em três pontos e o valor de E_2 foi obtido de Dias (2004), como descrito no item 6.3.

Cálculo de relações entre módulos de elasticidade:

$$n_1 = \frac{954,1}{1000} \quad n_2 = \frac{447}{1000} \quad n_3 = \frac{1219,5}{1000}$$

$$n_1=0,9541 \quad n_2=0,44709 \quad n_3=1,2195$$

$$b_1=6,52\text{cm} \quad h_1=3,89\text{cm} \quad b_2=1,10\text{cm} \quad h_2=1,55\text{cm} \quad b_3=1,10\text{cm}$$

$$h_3=16,4\text{cm} \quad b_4=1,10\text{cm} \quad h_4=1,55\text{cm} \quad b_5=6,56\text{cm} \quad h_5=3,92\text{cm}$$

Cálculo da área e centróide da seção transformada de cada peça.

$$A_1=n_1b_1h_1 \quad A_2=n_2b_2h_2 \quad A_3=n_3b_3h_3 \quad A_4=n_3b_3h_3 \quad A_5=n_3b_3h_3$$

$$A_1=24,20\text{cm}^2 \quad A_2=0,76\text{cm}^2 \quad A_3=8,07\text{cm}^2 \quad A_4=0,76\text{cm}^2 \quad A_5=31,36\text{cm}^2$$

$$y_1=22,10\text{cm} \quad y_2=20,935\text{cm} \quad y_3=12,04\text{cm} \quad y_4=3,15\text{cm} \quad y_5=1,96\text{cm}$$

$$CG_{y_0}=10,89\text{cm}$$

Com a equação (3) para a viga produzida é possível calcular a inércia efetiva da seção transversal indicada na figura A.1.

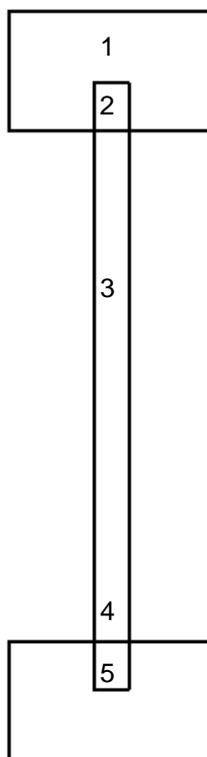


Figura A.1– Arranjo para ensaio de flexão estática em 4 pontos

$$I_{ef} = \frac{n_1 b_1 h_1^3}{12} + n_1 b_1 h_1 (y_1 - y_0)^2 - \left[\frac{n_2 b_2 h_2^3}{12} + n_2 b_2 h_2 (y_2 - y_0)^2 \right]$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{n_3 b_3 h_3^3}{12} + n_3 b_3 h_3 (y_3 - y_0)^2 \\
 & - \left[\frac{n_1 b_4 h_4^3}{12} + n_1 b_4 h_4 (y_4 - y_0)^2 \right] \\
 & + \left[\frac{n_3 b_5 h_5^3}{12} + n_3 b_5 h_5 (y_5 - y_0)^2 \right]
 \end{aligned}$$

$$I_{ef} = 5680,89 \text{ cm}^4$$

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

$$EI_{ef} = 5680889,98 \text{ kN.cm}^2$$

Flecha devido a flexão:

De acordo com o ensaio de flexão da viga os carregamentos foram:

$$P_{1\text{exp}} = 2,090 \text{ kN}$$

$$P_{2\text{exp}} = 4,499 \text{ kN}$$

Sendo assim, a flecha teórica devido a flexão para o arranjo da figura A.2 calculada de acordo com a equação (11), será:

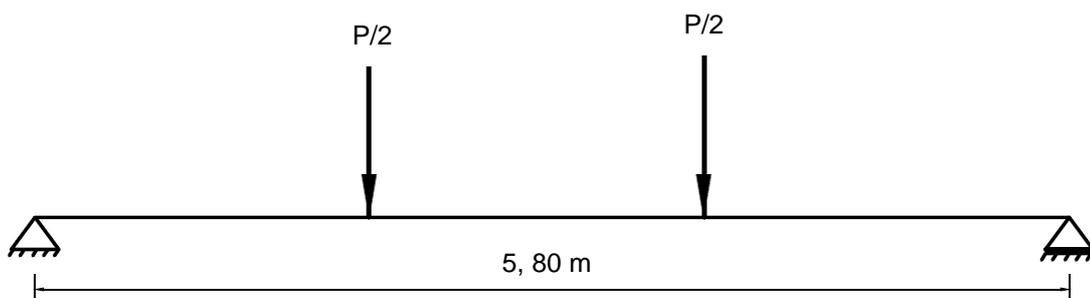


Figura A.2– Arranjo para ensaio de flexão estática em 4 pontos

$$\delta_{\text{flexão}} = \frac{23PL^3}{1296EI_{\text{teórico}}} \quad (11)$$

$$\delta_{\text{flexão}} = 14,68 \text{ mm}$$

$$P = 2,409 \text{ kN}$$

$$L = 580 \text{ cm}$$

$$EI_{\text{ef}} = 5680889,98 \text{ kN.cm}^2$$

A flecha máxima experimental no centro do vão retirando-se a influência dos apoios será calculada de acordo com a equação a seguir.

$$\delta_{\text{exp}} = \delta_{\text{centro}} - \left[\delta_{\text{extremidade menor}} + \frac{(\delta_{\text{apoio maior}} - \delta_{\text{apoio menor}})}{2} \right] \quad (12)$$

$$\delta_{\text{exp}} = 15,66 \text{ mm}$$

A flecha teórica devido ao cisalhamento foi calculada de acordo com a equação (7).

$$\delta_{\text{cisalhamento}} = 0,81 \text{ mm}$$

$$M = 233 \text{ kN.cm}$$

$$L = 580 \text{ cm}$$

$$EI_{\text{ef}} = 5680889,98 \text{ kN.cm}^2$$

$$K = 23000 \text{ kN (APA PR310C)}$$

Portanto, a flecha teórica de acordo com a equação (6) será:

$$\delta_{\text{teórica}} = 15,49 \text{ mm}$$

Cálculo da rigidez efetiva experimental.

A rigidez efetiva experimental foi calculada de acordo com a equação (13).

$$EI_{\text{exp}} = \frac{23PL^3}{1296 (\delta_{\text{exp1}} - \delta_{\text{exp2}})} \quad (13)$$

$$EI_{\text{exp}} = 528276,3 \text{ kN.cm}^2$$

Cálculo da capacidade de carga teórica.

Para o cálculo da capacidade de carga utiliza-se a equação a seguir:

$$P = n_i \frac{6\sigma_c I_{\text{ef}}}{Ly} n \quad (14)$$

Estado limite de tensão normal no bordo comprimido:

$$\sigma_c = 4,0 \text{ kN/cm}^2$$

$$I_{\text{ef}} = 5680,89 \text{ cm}^4$$

$$L = 580 \text{ cm}$$

$$P = 16,4 \text{ kN}$$

APENDICE B - PADRONIZAÇÃO “I – JOIST”

1. ESCOPO

A “I-Joist” é um elemento estrutural fabricado com madeira maciça ou compostos estruturais de madeira nas mesas e painéis estruturais nas almas juntamente com adesivos.

Para serem classificadas no Brasil para utilização, devem obedecer limites de deslocamento específicos para pisos residenciais, em adição com algumas especificações normativas.

A “I-Joist” pode ser utilizada para outros fins que não seja pisos residenciais desde que sejam utilizadas as propriedades apropriadas de projeto da viga.

2. DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

A seguir se apresenta alguns documentos de referência aplicados para este documento.

2.1. Normas ASTM

- D 5055 – Standard Specification for Establishing and Monitoring Structural Capacities of Prefabricated Wood “I-Joists”.
- ASTM D 198 – Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes.

2.2. Normas Brasileiras

- NBR 7190 - Projeto de Estruturas de Madeira
- NBR 6180 – Cargas para o cálculo de estruturas de edificações
- NBR 8681 – Ações e segurança nas estruturas

2.3. Publicações APA

- PRI – 400 Performance Standard for APA EWS I-Joists

3. CRITÉRIOS DE DESEMPENHO

3.1. Dimensões e Tolerâncias

Os valores apresentados neste item estão de acordo com *APA Performance Rated I-Joists, 2012*.

3.1.1. Altura 'I-Joist'

As "I-Joists" devem apresentar alturas de 241mm, 302mm, 356mm, 406mm. A figura 31 ilustra as alturas de uma "I-Joist".

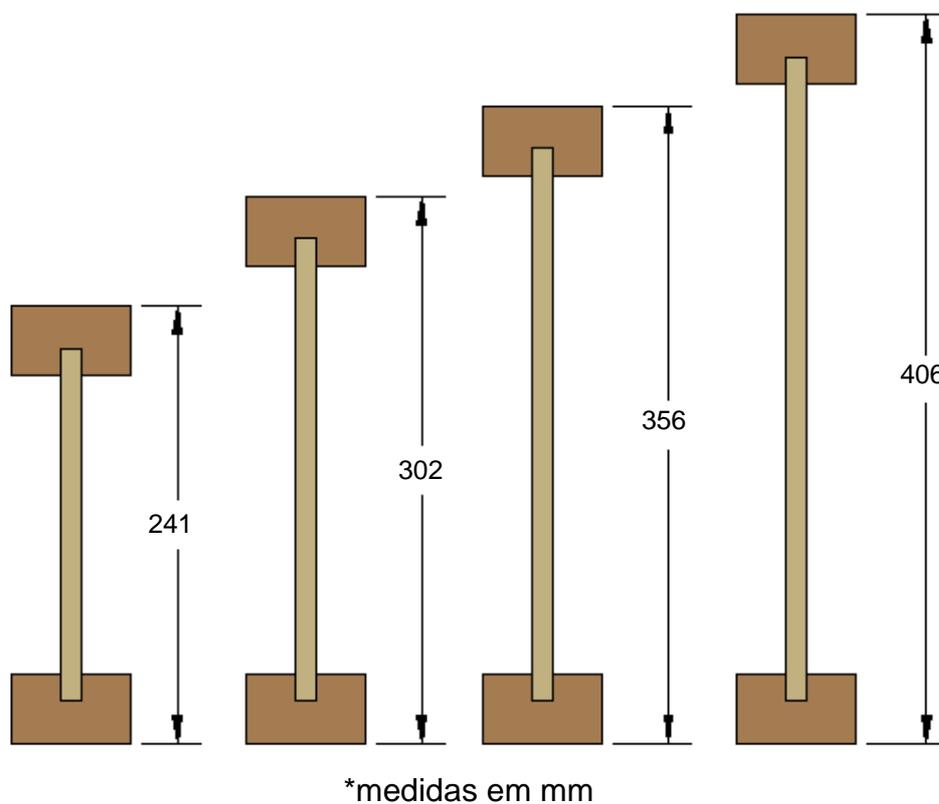


Figura 32 - Altura "I-Joist"

3.1.2. Dimensões das Mesas

A largura das mesas depende do material utilizado e devem apresentar no mínimo 3,8 mm e altura mínima 3,3 mm.

3.1.3. Dimensões das Almas

A altura da alma depende da altura total da “I-Joist” e a espessura pode ser de 9,5 mm e 11,1 mm.

3.1.4. Tolerâncias

As tolerâncias permitidas durante a fabricação devem ser:

- Largura da Mesa: 0,8 mm.
- Altura da Mesa: Menos que 1,5 mm.
- Altura “I-Joist”: Entre 0 e 3,1 mm.

3.2. Vãos admissíveis

Os vãos admissíveis como apresentados na Tabela 11, indicam o vão máximo permitido para vários espaçamentos entre as vigas de um piso residencial. Os carregamentos combinados sobre os pisos considerados para os cálculos deste documento estão apresentados na Tabela 10. Sendo que há uma carga que corresponde a cada espaçamento entre o centro das vigas.

Tabela 9 - Carregamentos Combinados de acordo com NBR 7190/97

	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm
Carga permanente (N/m)	778	1023	1268	1512
Carga Acidental (N/m)	675	900	1125	1350

Para o valor da carga permanente foi considerado o sistema estrutural o apresentado na figura 32.

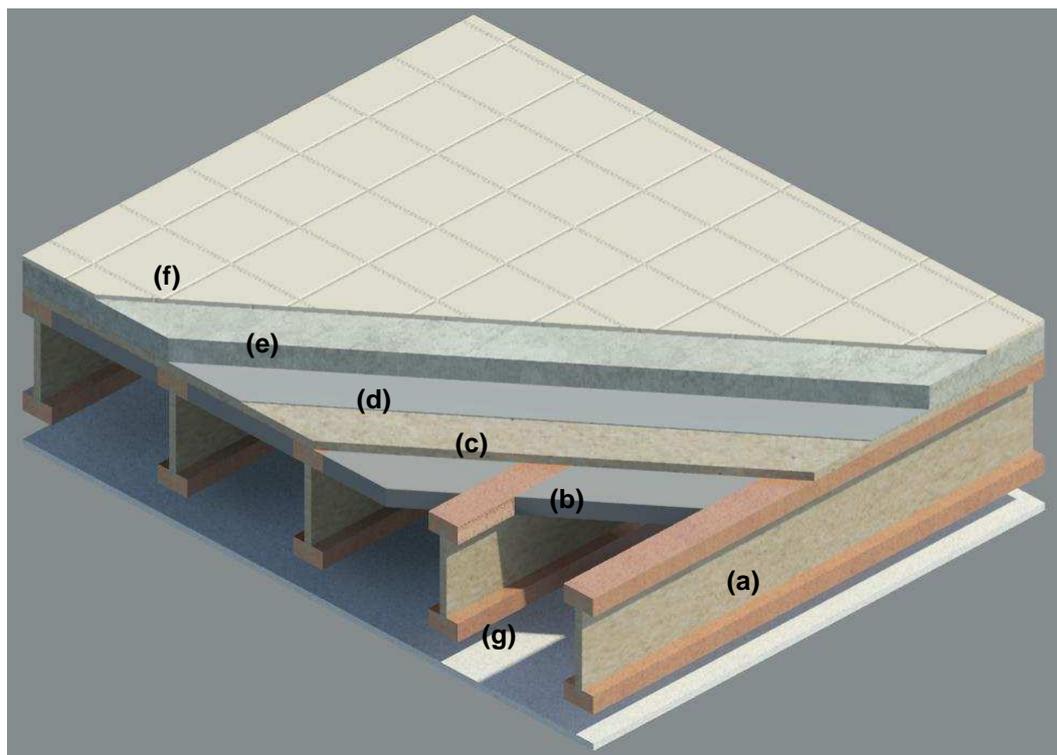


Figura 33 - Sistema estrutural para lajes residenciais

- (a) Viga de madeira "I-Joist".
- (b) Isolante térmico acústico (PET).
- (c) Chapa de "OSB".
- (d) Manta anti-ruído
- (e) Contrapiso
- (f) Revestimento Cerâmico
- (g) Forro (Gesso)

O valor da carga acidental é de acordo com o descrito na NBR6120/80. Sendo que para o cálculo neste documento foi utilizado o carregamento acidental (b).

A tabela 11 indica os vãos admissíveis para a viga de madeira em "I".

Tabela 10 - Vãos teóricos admissíveis para Viga de Madeira em “I” – Vão Simples^(a,b,c)

Altura (mm)	Série da Viga	Vão Simples (m)			
		Espaçamento entre Vigas (cm)			
		30	40	50	60
241	PRI - 20	3,1	2,8	2,6	2,4
	PRI - 30	3,0	2,7	2,5	2,4
	PRI - 40	3,5	3,1	2,9	2,7
	PRI - 50	3,2	2,9	2,7	2,5
	PRI - 60	3,5	3,1	2,9	2,7
302	PRI - 20	3,7	3,4	3,1	2,9
	PRI - 30	3,6	3,3	3,1	2,8
	PRI - 40	4,1	3,7	3,5	3,2
	PRI - 50	3,8	3,5	3,2	3,0
	PRI - 60	4,1	3,7	3,5	3,2
356	PRI - 40	4,7	4,3	4,0	3,7
	PRI - 50	4,4	4,0	3,7	3,4
	PRI - 60	4,7	4,3	3,9	3,7
406	PRI - 40	5,2	4,7	4,4	4,1
	PRI - 50	4,9	4,4	4,1	3,8
	PRI - 60	5,2	4,7	4,4	4,1

- a) Vão máximo permitido aplicado em construções de pisos residenciais com valor de projeto de carga permanente e acidental apresentado na tabela 10.
- b) A verificação da flecha deve contemplar os seguintes valores limites:
- Considerando a combinação quase permanente de serviço, a flecha deve ser inferior a $L/350$ (para vigas biapoiadas com revestimentos frágeis e $L/300$ para elementos fletidos que não tenham materiais frágeis sobre os mesmos (NBR7190).
 - Somente no caso de haver revestimentos frágeis sobre a viga, deve-se verificar também a flecha máxima apenas com o carregamento acidental, sendo o valor máximo igual a $L/300$, atendendo também o valor absoluto de 15 mm (NBR7190).
- c) A viga deve conter enrijecedores nos apoios e pontos de aplicação de carga e a cada 60 cm com especificação da APA-PR310C.

3.3. Propriedades de Projeto

As vigas de madeira de seção transversal em “I” devem ser designadas com base nos valores apresentados na tabela 12. Foram considerados os vãos mínimos permitidos (espaçamento 60 cm) e a seção transversal mínima de cada série da viga. Os valores apresentados nessa tabela são valores teóricos.

Tabela 11 - Propriedades de Projeto da Viga de madeira em “I”

Altura (mm)	Série da Viga	EI (kN.m ²)	M (kN.m)	V (kN)	K (kN)
241	PRI 20	278	1,95	3,25	21974
	PRI 30	258	1,95	3,25	21974
	PRI 40	385	2,47	3,66	21974
	PRI 50	301	2,12	3,39	21974
	PRI 60	386	2,47	3,66	21974
302	PRI 20	474	2,85	3,93	27490
	PRI 30	444	2,66	3,80	27490
	PRI 40	655	3,47	4,34	27490
	PRI 50	517	3,05	4,07	27490
	PRI 60	651	3,47	4,34	27490
356	PRI 40	965	4,64	5,01	32383
	PRI 50	765	3,92	4,61	32383
	PRI 60	953	4,64	5,01	32383
406	PRI 40	1317	5,70	5,56	37009
	PRI 50	1051	4,89	5,15	37009
	PRI 60	1297	5,70	5,56	37009

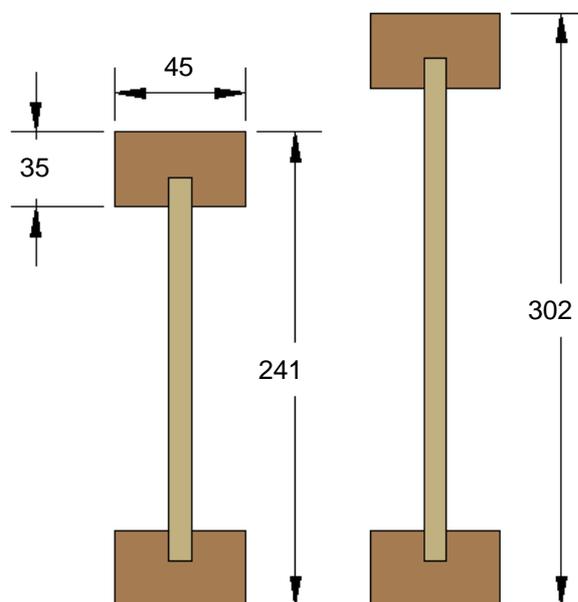
Rigidez a flexão (EI) da Viga.

Momento Fletor (M) da Viga.

Força Cortante (V) da Viga.

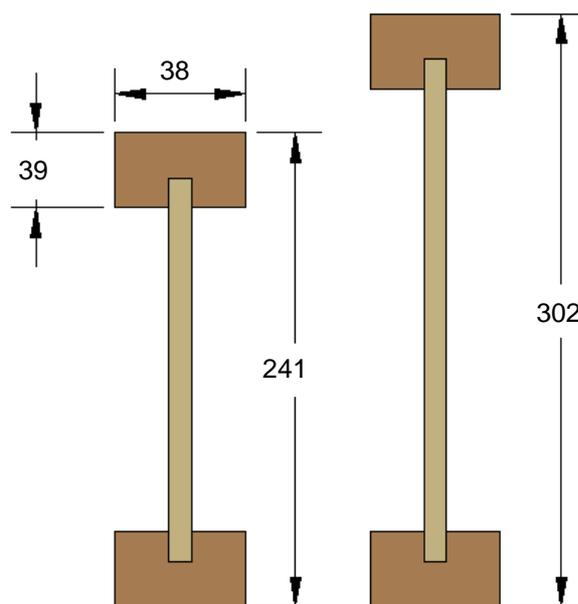
Fator de cisalhamento (K).

A descrição da Viga de madeira em “I” é feita de acordo com as dimensões que a viga apresenta em cada série “I-Joist”. As Figuras 33 a 37 ilustram as séries “I-Joist”, em mm, sendo que a espessura da alma é de 9,5 mm e o material é de “OSB”.



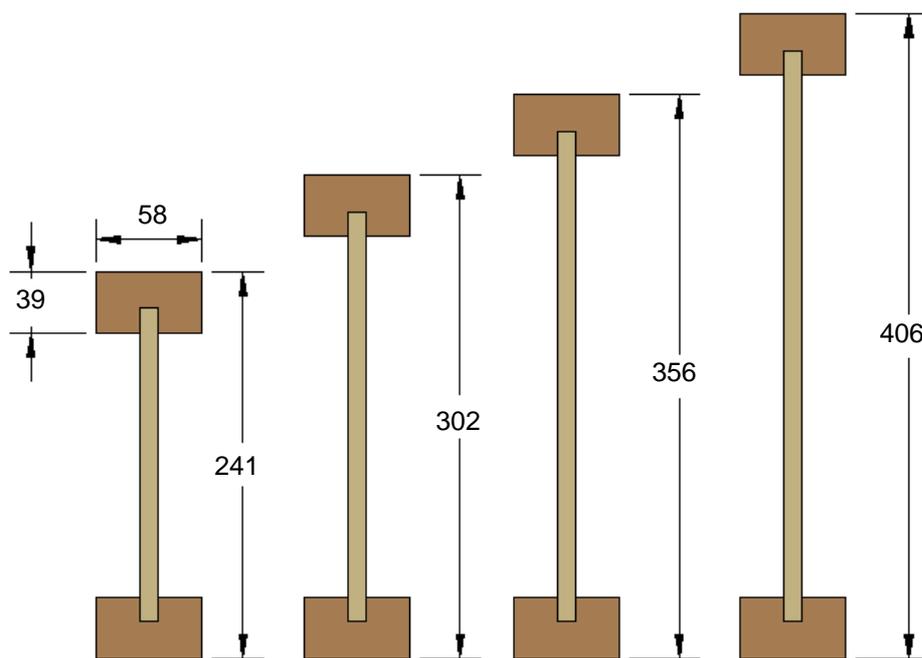
*medidas em mm

Figura 34 - PRI – 20.



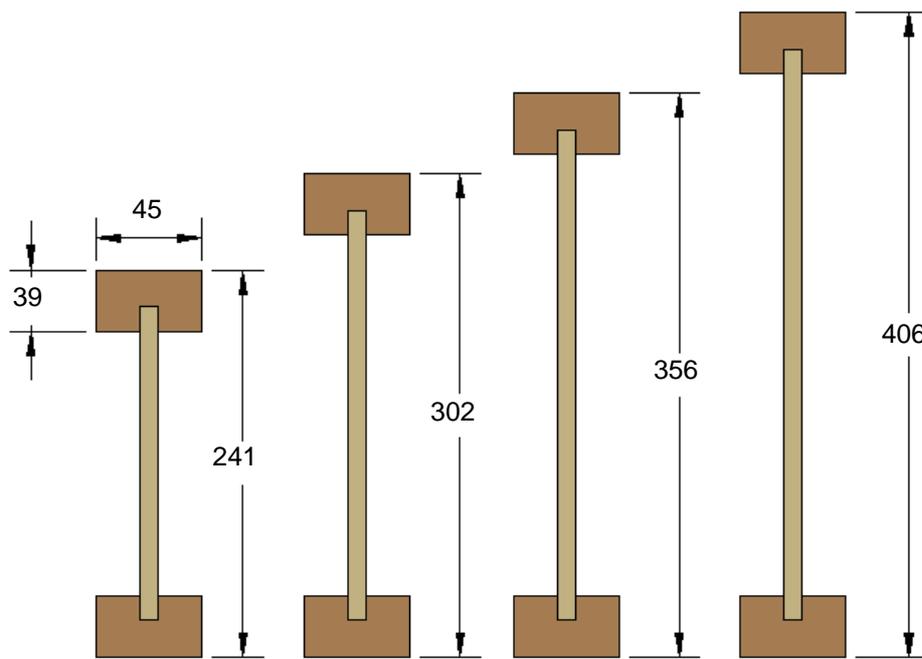
*medidas em mm

Figura 35 - PRI – 30.



*medidas em mm

Figura 36 - PRI - 40.



*medidas em mm

Figura 37 - PRI - 50.

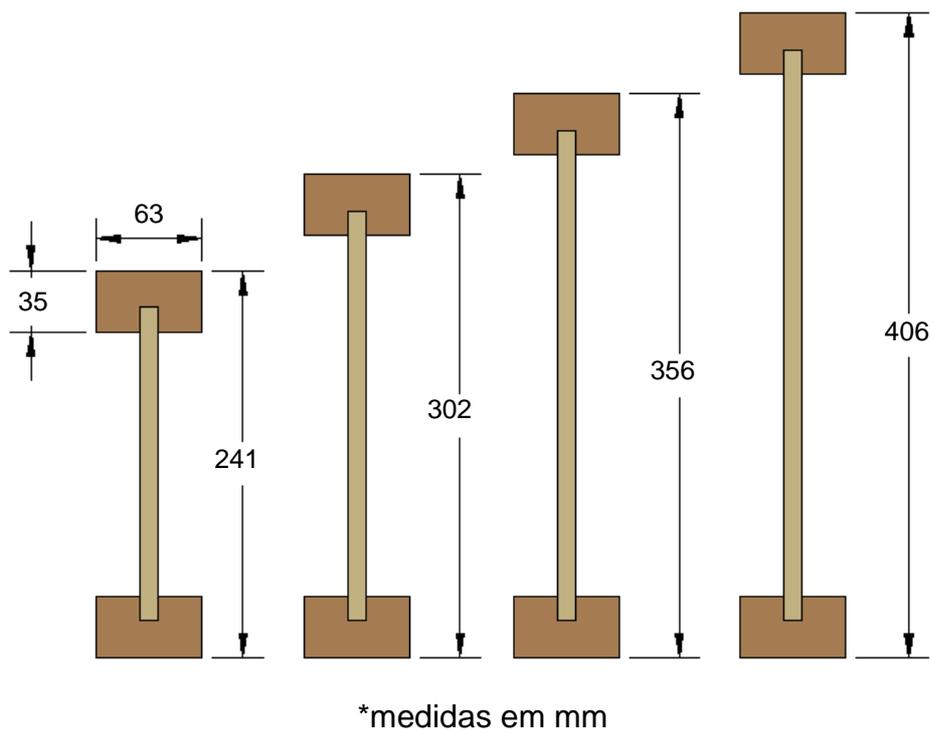


Figura 38 - PRI – 60.

Os valores apresentados nas Figuras 33 a 37 estão de acordo com os documentos abaixo:

- *PRI-400 Performance Standard for APA EWS I-Joists* (PFC-5317)
- *Pacific Woodtech Corporation PWIJoists* (PFC-5804)
- *Nordic I Joist Series PRI - 20, PRI - 40, NI - 40x, PRI - 60, PRI - 80* (CCMC 13032-R)

Os valores utilizados para a tabela de vãos teóricos admissíveis foram os valores mínimos apresentados em cada série da “I-Joist” para todos os valores de altura.

4. Qualificação

Toda “I-Joist” deve ser qualificada de acordo com os requisitos constados neste item.

4.1. Material das Mesas

As mesas são de madeira serrada ou de LVL. A mesa superior e inferior deve ser constituída do mesmo material, ou seja, apresentar mesmas características como, por exemplo, a densidade. As dimensões das mesas estão relacionadas com a série da viga “I”, ou seja, depende do material, espécie e demais fatores. Os materiais da mesa são qualificados de acordo com a ASTM D5055.

4.2. Material da Alma

Os painéis estruturais têm características próprias de acordo com o fabricante. Geralmente para a fabricação das almas são utilizados painéis estruturais de “OSB”. O fabricante LP Brasil fornece o LP OSB Home, uma placa estrutural de alta tecnologia permanentemente controlada e testada de acordo com normas internacionais de produção, padrão e qualidade. O painel apresenta certificação pela APA (Engineered Wood Association), estando aprovados quanto às suas propriedades físico-mecânicas para serem utilizados na construção de casas, conforme a normativa de construção do Canadá e EUA. O fabricante oferece algumas instruções como especificações de uso, espessura nominal e grau de exposição Podem ser utilizados tanto na fabricação de vigas quanto na composição da laje. Para a fabricação das vigas, as espessuras devem estar de acordo com o item 1.2.4.1.

4.3. Adesivos

O adesivo que deve ser utilizado é o fenol-resorcinol-formaldeído (PRF), encontrado no mercado com o nome comercial de CASCOPHEN – RS 216M, produzido pela Hexion Specialty Chemicals, usado em conjunto com o preparado Endurecedor FM-60-M (em pó) na proporção por peso de 20%.

4.4. Produtos “I-Joist”

Parâmetros de produção da viga em “I”, como tipos de alma, espessura, tipos e tamanhos de mesas, ligação mesa-alma e ligações alma-alma devem ser

identificados como parte dos procedimentos de qualificação. Mudanças nesses parâmetros requerem uma análise técnica.