

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

TATIANA CARLIN

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA DEFORMAÇÃO
POR CISALHAMENTO EM VIGAS “I-JOISTS”**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO

2017

TATIANA CARLIN

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA DEFORMAÇÃO
POR CISALHAMENTO EM VIGAS “I-JOISTS”**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Engenharia Civil, do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes

CAMPO MOURÃO

2017



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



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA DEFORMAÇÃO POR CISALHAMENTO EM VIGAS “I-JOISTS”

por

Tatiana Carlin

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 8h30min do dia 29 de junho de 2017 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. Leandro Waidemam

(UTFPR)

Co-orientador

Prof. Dr. Marcelo Rodrigo Carreira

(UTFPR)

Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes

(UTFPR)

Orientador

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

Coordenador do Curso de Engenharia Civil:

Prof. Dr. Ronaldo Rigobello

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

Dedicatória:
Aos meus pais Veridiana e Everaldo,
A minha irmã Eduarda,
Ao meu namorado Paulo,
A minha família e amigos de Campo Mourão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, pela proteção diária, coragem e força os quais me proporcionaram a realização de mais um sonho. Sobretudo, por ter a chance de ter comigo pessoas tão incríveis todos os dias e não me deixar esquecer que “só se vê bem com o coração, o essencial é invisível aos olhos”.

Expresso minha gratidão eterna aos meus pais, Veridiana e Everaldo, meus maiores incentivadores e exemplos, que sempre se fizeram presentes, apesar da distância durante a graduação. Todos os sacrifícios que fizeram por mim certamente valeram a pena. A minha mãe e melhor amiga, muito obrigada especial pelas conversas diárias, conselhos, cuidados, amor, sorrisos, lágrimas, por tudo. Você me inspira todos os dias. A minha pequena irmã e afilhada Eduarda, pelas brincadeiras, sorrisos e abraços que a cada dia me cativam mais.

Agradeço ao meu namorado e melhor amigo Paulo, pela paciência, carinho, amor, amparo em momentos difíceis - nos quais encontrava soluções quando não mais pareciam existir - e momentos de felicidade que deixaram tudo mais encantador. As minhas amigas Beatriz e Valriane por me receberem em Campo Mourão e orientarem desde o início do curso, além dos almoços deliciosos, conversas e risadas. Vocês são especiais. Aos meus sinceros amigos Matheus e Josué, integrantes do TIME, obrigada pelos momentos de alegria e descontração em meio a tanta pressão, vocês contribuíram para que a graduação se tornasse um período inesquecível.

Ao meu professor orientador e tutor Dr. Jorge Luís Nunes de Góes, agradeço pela dedicação, conhecimento, conversa, e disposição que não só contribuíram para a realização do presente trabalho, mas para minha formação pessoal e profissional. Ao Programa de Educação Tutorial (PET) e aos petianos pela oportunidade de crescer profissionalmente e pessoalmente, inovando e obtendo novas experiências.

Por fim, sou grata aos professores os quais tive a oportunidade de conhecer, por todos os ensinamentos fundamentais para minha formação acadêmica. Ao técnico do laboratório de Sistemas Estruturais da UTFPR – CM, Maiko Cristian Sedoski, agradeço pelo apoio, amizade, oportunidades e conhecimentos transmitidos ao longo da graduação.

RESUMO

CARLIN, Tatiana. **Avaliação experimental da influência da deformação por cisalhamento em vigas “I-Joists”**. 2017. 86 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2017.

Inseridos no contexto de escassez dos recursos minerais não renováveis, surgem os Produtos Engenheirados de Madeira (PEM), caracterizados por suas propriedades estruturais melhoradas e controle rigoroso de qualidade. Dessa maneira, a Associação da Madeira Engenheirada (APA) classifica esses produtos em categorias e, inseridas em uma delas, estão as vigas “I-Joists”. Tais vigas em perfil “I” são constituídas por mesas de madeira serrada e alma composta por OSB. Considerando a importância do conhecimento do comportamento estrutural de vigas “I-Joists” e visando futura normatização brasileira sobre esse elemento, faz-se necessário o estudo teórico e experimental sobre o comportamento destes produtos. O presente trabalho expõe uma comparação de modelos analíticos para previsão de flechas com resultados experimentais realizados em vigas de perfil “I” em escala real. Além disso, o programa experimental da pesquisa foi conduzido de forma a caracterizar todos os materiais empregados em atendimento a normas brasileiras e estrangeiras, quando na falta de normatização nacional. Sendo assim, para a estimativa de flechas nas vigas “I” foram utilizados o método clássico do Princípio dos Trabalhos Virtuais e o modelo simplificado de Rancourt, sendo que ambos se demonstraram satisfatórios quando comparados com os resultados experimentais.

Palavras-chave: I-Joist; Modelo analítico; Comportamento estrutural.

ABSTRACT

CARLIN, Tatiana. **Experimental evaluation of the influence of shear deflection in “I-Joists” beams**. 2017. 86 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2017.

Inserted in the context of the scarcity of non-renewable mineral resources, the Engineered Wood Products (EWPs) are characterized by their improved structural properties and strict quality control. Thus, the Association of Engineered Wood classifies these products into categories and inserted in one of them, are the "I-Joists" beams. Such beams in shape of an "I" are constituted by lumber flanges and web made of Oriented Strand Board (OSB). Considering the importance of the knowledge about the structural behavior of "I-Joists" beams and aiming at future Brazilian standardization, a theoretical and experimental study on the behavior of these products is necessary. The present paper propound a comparison of analytical models for forecast deflections with the experimental results realized in full size specimen “I” shaped beams. In addition, the experimental research program was conducted in order to characterize all the materials used in compliance with Brazilian and foreign standards, in the absence of national standards. Therefore, for deflection estimation in the "I-Joists", the classical method of the Principle of Virtual Works and the simplified model of Rancourt were used and both of them were satisfactory in comparison with the experimental results.

Keywords: I-Joist; Analytical model; Structural behavior.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	12
2.1 OBJETIVO GERAL.....	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3 JUSTIFICATIVA	13
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
4.1 PRODUTOS ENGENHEIRADOS DE MADEIRA (PEM)	15
4.2 VIGAS “I-JOISTS”	16
4.2.1 Contexto histórico	16
4.2.2 Aspectos gerais.....	17
4.2.3 Materiais constituintes	20
4.2.4 Montagem das Vigas “I-Joists”.....	23
4.3 NORMATIZAÇÃO.....	24
4.3.1 NBR 7190 - Projeto de Estruturas de Madeira.....	25
4.3.2 ASTM D 198 – Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes	25
4.3.3 ASTM D5055 – Standard Specification for Establishing and Monitoring Structural Capacities of Prefabricated Wood I-Joists	26
4.3.4 APA Performance Rated I-Joists	28
4.4 COMPORTAMENTO DE VIGAS “I” SUBMETIDAS À FLEXÃO	36
4.4.1 Método da seção transformada para seção em “I”	37
4.4.2 Estimativa de flecha considerando a deformação por cisalhamento.....	40
4.4.3 Método do Princípio dos Trabalhos Virtuais	41
4.4.4 Método simplificado de Rancourt.....	46
5 METODOLOGIA	50
5.1 MATERIAIS	50
5.2 CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA E DO OSB	51
5.3 MONTAGEM DAS VIGAS	54
5.4 ENSAIO DAS VIGAS	58
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
6.1 UMIDADE E DENSIDADE.....	61
6.2 RIGIDEZ EFETIVA EXPERIMENTAL DAS MESAS	61
6.3 DESLOCAMENTO EXPERIMENTAL DAS VIGAS “I-JOISTS”	62
6.4 DESLOCAMENTOS ANALÍTICOS DAS VIGAS “I-JOISTS”	63
6.5 RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS	63
6.6 DIFERENÇA ENTRE MODELOS DE CÁLCULO APRESENTADOS	67
6.7 RIGIDEZ DAS VIGAS “I-JOISTS”	68
7 CONCLUSÃO	69
REFERÊNCIAS	70

APÊNDICE – A	75
APÊNDICE – B.....	77
APÊNDICE – C	79
APÊNDICE – D	81
APÊNDICE – E.....	83
APÊNDICE – F.....	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Produtos engenheirados de madeira (a) MLC, (b) OSB, (c) LVL e (d) “I-Joist” ...	16
Figura 2 – Composição da viga “I-Joist”	18
Figura 3 – Método de fabricação comprimento fixo	19
Figura 4 – Método de fabricação linhas contínuas	20
Figura 5 – Painéis estruturais OSB	21
Figura 6 - Orientação dos painéis na chapa de OSB	22
Figura 7 - Tipos de geometrias alma/mesa	24
Figura 8 - Principais modos de falhas das vigas “I” em testes feitos em escala real	27
Figura 9 - Explicação das identificações na viga “I-Joist”	29
Figura 10 – Enrijecedor de alma	35
Figura 11 - Distribuição da deformação, tensão e força de vigas “I” submetidas a momento fletor positivo.....	36
Figura 12 - Distribuição da deformação, tensão e força de vigas “I” submetidas ao cisalhamento	36
Figura 13 - Seção transformada para viga “I” com três elementos	38
Figura 14 - Pórtico plano	42
Figura 15 - Seção transversal da Viga “I” em estudo.....	45
Figura 16 – Configuração do ensaio de flexão em quatro pontos	46
Figura 17 – Modelos de carregamento para cálculo da flecha	48
Figura 18 – Disposição dos corpos de prova para determinação da umidade e densidade aparente	51
Figura 19 - Ensaio de flexão estática das mesas.....	52
Figura 20 – Procedimentos utilizados para confecção das vigas.....	55
Figura 21 – Seção das vigas “I-Joists”	56
Figura 22 – Comprimento das vigas “I-Joists”.....	56
Figura 23 – Preparação para colagem das “I-Joists”	57
Figura 24 – Aplicação de pressão de colagem	57
Figura 25 – Vigas “I-Joists” finalizadas	57
Figura 26 – Enrijecedores instalados ao longo do comprimento das “I-Joists” nos pontos de aplicação de carga.....	58
Figura 27 – Contraventamento das vigas durante ensaio de flexão	59
Figura 28 – Esquemática do ensaio de flexão a quatro pontos	60
Gráfico 1 – Resultados obtidos para viga 1	64
Gráfico 2 – Resultados obtidos para viga 2	64
Gráfico 3 – Resultados obtidos para viga 3	65
Gráfico 4 – Resultados obtidos para viga 4	65
Gráfico 5 – Resultados obtidos para viga 5	66
Gráfico 6 – Resultados obtidos para viga 6	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Vãos simples (a, b, c, d) permitidos pela APA EWS Performance Rated I-Joist...	31
Tabela 2 – Vãos múltiplos (a, b, c, d) permitidos pela APA EWS Performance Rated I-Joist	32
Tabela 3 – Vãos múltiplos (a, b, c, d) permitidos pela APA EWS Performance Rated I-Joist	34
Tabela 4 – Valores de coeficiente K para as séries de vigas “I-Joists” padronizadas.....	47
Tabela 5 – Cálculo de flecha para as vigas “I-Joists”, considerando a deformação por cisalhamento	49
Tabela 6 - Valores médios para as constantes elásticas da madeira (E_i e G_{ij} em MPa)	53
Tabela 7 – Relações médias entre parâmetros elásticos longitudinais e transversais	53
Tabela 8 - Valores médios para as constantes elásticas das chapas de OSB (MPa).....	54
Tabela 9 - Valores de umidade e densidade aparente para a madeira <i>Eucalyptus grandis</i>	61
Tabela 10 - Valores de rigidez efetiva experimental das mesas.....	62
Tabela 11 – Deslocamento obtido experimentalmente no centro do vão.....	63
Tabela 12 – Deslocamento obtido analiticamente	63
Tabela 13 – Diferenças entre resultado experimental e modelos analíticos.....	67
Tabela 14 – Rigidez das vigas “I-Joists”	68

1 INTRODUÇÃO

Tendo em vista a possibilidade de carência dos recursos não renováveis, a madeira ganha importante destaque frente a outros materiais na construção civil. Além de caracterizar-se como um recurso proveniente de fonte renovável, possui ótimas propriedades mecânicas e físicas, ótima relação resistência/peso e baixo consumo energético para sua produção. Dessa maneira, o conhecimento de suas propriedades físicas é primordial para que se garantam as exigências de segurança e durabilidade.

Para fins estruturais, a madeira é amplamente utilizada em vários países da América do Norte e Europa, devido, sobretudo, pelo surgimento dos Produtos Engenheirados de Madeira (PEM), os quais são produtos derivados de madeira com o emprego de espécies provenientes de reflorestamento. O surgimento desses produtos se deu principalmente por questões sustentáveis e econômicas, visto que proporcionam controle de qualidade, segurança e uma economia de material pelo uso mais eficiente de suas propriedades.

Entre os Produtos Engenheirados de Madeira, as vigas com seção “I” são uma combinação de materiais com características diferentes, aliada a uma geometria da seção transversal mais eficiente. Elas destacam-se por sua elevada rigidez e resistência, capacidade de vencer grandes vãos, leveza, confiabilidade, fácil manufatura e economicamente competitivas, possuindo custo acessível quando comparado com o de vigas de madeira maciça.

O processo de sua normatização deu-se início em 1981 sendo transferido, em 1985, para a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) Comitê D-7 de madeira, sendo que a primeira norma - ASTM D5055 - foi publicada em 1997. Devido à necessidade de se estabelecer um padrão de desempenho dessas vigas, a Associação de Madeira Engenheirada (APA) desenvolveu um programa de padronização denominado “*Performance Rated I-Joists*” (PRI), isto é, vigas “I” com performance controlada, apresentando uma alternativa de alto desempenho para vigas de madeira.

Apesar de sua disseminação pelo mundo, as vigas “I-Joists”, comumente utilizadas em pisos e telhados residenciais, ainda não se fazem tão frequentes no Brasil. Várias são as razões para tal, porém, as principais se evidenciam pela falta de uma norma específica nacional fornecedora de diretrizes e parâmetros construtivos, a fim de que o correto dimensionamento seja realizado; bem como pela falta de informações sobre sua tecnologia e aplicações no mercado da construção civil; além da questão cultural em que há preconceito com a utilização da madeira no país.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a rigidez e deslocamento de vigas “I-Joists”, compostas por alma de OSB e mesas de madeira serrada de *Eucalyptus grandis*, por meio de ensaios laboratoriais padronizados, bem como comparar os resultados obtidos experimentalmente com modelos analíticos provenientes de documentos normativos nacionais e internacionais.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar modelos teóricos de cálculo de flecha para vigas “I-Joists”;
- Determinar as características das peças de madeira através de ensaios preliminares padronizados por norma;
- Produzir vigas com seção transversal “I”;
- Determinar a rigidez e deslocamento das vigas “I-Joists” confeccionadas por meio de ensaios de flexão padronizados por norma;
- Comparar os resultados obtidos experimentalmente com os resultados teóricos;
- Avaliar a influência da deformação por cisalhamento em vigas “I-Joists”.

3 JUSTIFICATIVA

O conceito de sustentabilidade se encontra cada vez mais presente no cotidiano da população. Entretanto, para que o desenvolvimento sustentável seja realmente uma realidade, faz-se necessário reduzir o consumo de recursos e produção de resíduos, bem como a preservação da biodiversidade dos sistemas naturais. Assim, reconhece-se a finita disponibilidade dos recursos naturais, evidenciando que o consumo desses recursos deve ocorrer num nível suscetível de serem renovados.

Nesse contexto, a madeira engloba as condições fundamentais para diminuir os impactos ambientais causados pelas construções, sendo um material renovável, reaproveitável e com baixo consumo energético para sua produção, apresentando excelente resistência mecânica, leveza, estética, conforto térmico e acústico. A fim de aprimorar seu uso, o processamento industrial agrega aos produtos derivados da madeira características antes ausentes na madeira sólida, como apresentar uma estrutura mais homogênea, com defeitos reduzidos, melhores propriedades físico-mecânicas e estabilidade dimensional.

Tais características manifestam os produtos industrializados derivados da madeira como grande atrativo ao mercado consumidor da construção civil brasileiro. As vigas de madeira de seção “I” são exemplos evidentes desses produtos, devido principalmente a sua eficiência estrutural e economia de material, se comparadas com as vigas de seção retangular.

Contudo, no Brasil, as maiores causas de desempenho insatisfatório da madeira frente a outros materiais consistem na falta de conhecimento das propriedades da madeira por muitos de seus usuários e na insistência em métodos de construção tradicionais. Assim, conhecer as propriedades e comportamento desse material, assim como de seus derivados, é condição *sine qua non* para utilizá-los com racionalidade.

Porém, não existem normativas nacionais que abordem esses produtos industrializados derivados da madeira, mais especificamente as vigas “I-Joists” e seu dimensionamento de maneira plena e efetiva. A norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997) não apresenta metodologia de cálculo detalhada, apenas indica uma recomendação simplificada para o dimensionamento dessas vigas.

Habitualmente, em análises estruturais, utilizam-se modelos analíticos nos quais os efeitos de deformação por cisalhamento não são levados em conta. Entretanto, para o tipo de viga a ser analisado, as deformações por cisalhamento são consideráveis, sendo responsáveis por 19% a 31% da flecha devido à flexão pura, dependendo das condições geométricas (GARBIN, 2013).

Dessa maneira, considerando a importância do conhecimento do comportamento estrutural de vigas “I-Joists” e visando futura normatização brasileira, faz-se necessário o estudo teórico e experimental sobre o comportamento destes produtos, em especial, em relação a influência da deformação por cisalhamento.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 PRODUTOS ENGENHEIRADOS DE MADEIRA (PEM)

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

De acordo com o Conselho Americano de Madeira (*American Wood Council*), na década de 80, limitações ambientais e a ascendente demanda dos consumidores impulsionaram a utilização de madeiras mais leves. Dessa maneira, a indústria madeireira desenvolveu tecnologias para utilização de árvores menores de forma mais eficiente e com menor desperdício, a fim de obter produtos mais leves e resistentes estruturalmente.

O consumo cada vez maior de materiais de construção e as crescentes dificuldades para obtenção de madeira bruta com dimensões e qualidade adequadas às diversas necessidades, juntamente com a grande explosão da tecnologia de fabricação ocorrida pouco antes da metade do século XIX, conduziram ao desenvolvimento da indústria de produtos derivados da madeira (VAZ¹, 1987, apud STAMATO, 1998).

Nesse contexto, surgem os Produtos Engenheirados de Madeira (PEM) ou *Engineered Wood Products* (EWPs), caracterizados como produtos com propriedades estruturais melhoradas para ter seu uso mais eficiente, visando à economia de material, o desenvolvimento sustentável e o desempenho estrutural. A utilização desses produtos tem como objetivo a melhoria da madeira que naturalmente apresenta defeitos, como nós, fendas, fibra torcida, inclinação excessiva das fibras, entre outros. Esses defeitos naturais que impedem uma utilização mais abrangente e eficiente da madeira fizeram com que fossem manufaturados novos materiais para a solução desse problema (SILVA, 2010).

Os PEM são fabricados através da combinação de partículas de madeira (*wood strand*), lâminas de madeira (*veneers*), madeira serrada (*lumber*) ou fibras de madeira com adesivo para

¹ VAZ, J. **Silos verticais de madeira compensada**. São Carlos, 1987. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 346p.

formar uma unidade estrutural. Eles são projetados e manufaturados para maximizar as características de resistência e rigidez natural da madeira por meio da orientação das partículas e lâminas de madeira com a adição de adesivos estruturais (ENGINEERED WOOD ASSOCIATION, 2011).

A Associação da Madeira Engenheirada, *Engineered Wood Association* (APA), classifica 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, *Structural Composite Lumber* (SCL), incluindo principalmente folheado de madeira laminada, *Laminated Veneer Lumber* (LVL); 4) as vigas em “I” de madeira (ENGINEERED WOOD ASSOCIATION, 2010). A Figura 1 ilustra alguns tipos de produtos compostos de madeira.



**Figura 1 – Produtos engenheirados de madeira (a) MLC, (b) OSB, (c) LVL e (d) “I-Joist”
Fonte: ENGINEERED WOOD ASSOCIATION, 2011.**

4.2 VIGAS “I-JOISTS”

4.2.1 Contexto histórico

Vigas de madeira com seção transversal “I” são a segunda geração dos produtos engenheirados de madeira (PEM) os quais são envolvidos pela união de almas de painéis estruturais e mesas de madeira serrada. A concepção de se utilizar a viga em “I” de madeira usando a alma de painéis de madeira e as mesas de madeira serrada não foi completamente

desenvolvida até meados de 1940, quando foi impulsionado por pesquisas relacionadas a segunda guerra mundial, através de aeronaves de madeira (GREEN, 1998).

Em concordância com Fisette (2000), as vigas “I-Joists” começaram a se consolidar em 1969 com a empresa *Trus Joist Corporation*, pioneira e líder no segmento até hoje. O custo, o desempenho, bem como o estilo das construções que estavam surgindo na década de 1970 estimularam o desenvolvimento das vigas “I”. Inicialmente, elas eram constituídas por almas de compensado e mesas de madeira sólida.

A partir de 1977, a *Trus Joist Corporation* substituiu as mesas de madeira sólida pelo folheado de madeira laminada (LVL), possibilitando a construção de vigas com comprimentos maiores. Além disso, em 1990 outra inovação na área surgiu com a troca do compensado pelo OSB, uma vez que possui menor custo, maior resistência à força cortante (ao cisalhamento) e pode ser encontrado com maior facilidade. Atualmente uma tendência pelo uso da madeira serrada sólida nas mesas se expandiu, assim como a utilização do OSB nas almas das “I-Joists” por grande parte dos fabricantes (FISETTE, 2000).

4.2.2 Aspectos gerais

Vigas “I-Joists” de madeira pré-fabricada são feitas a partir de Produtos Engenheirados de Madeira (PEM). As mesas são formadas tipicamente de compósitos estruturais de madeira serrada (SCL), enquanto as almas podem ser constituídas tanto por OSB, quanto por madeira compensada. Todos esses componentes podem ser produzidos com espécies de crescimento rápido, pequeno diâmetro e com árvores de baixa qualidade. Portanto, é possível fazer um produto estrutural com uma dimensão maior que o diâmetro da árvore, da qual os componentes são produzidos (WIJMA, 2001). A Figura 2 evidencia a composição da viga “I-Joist”.

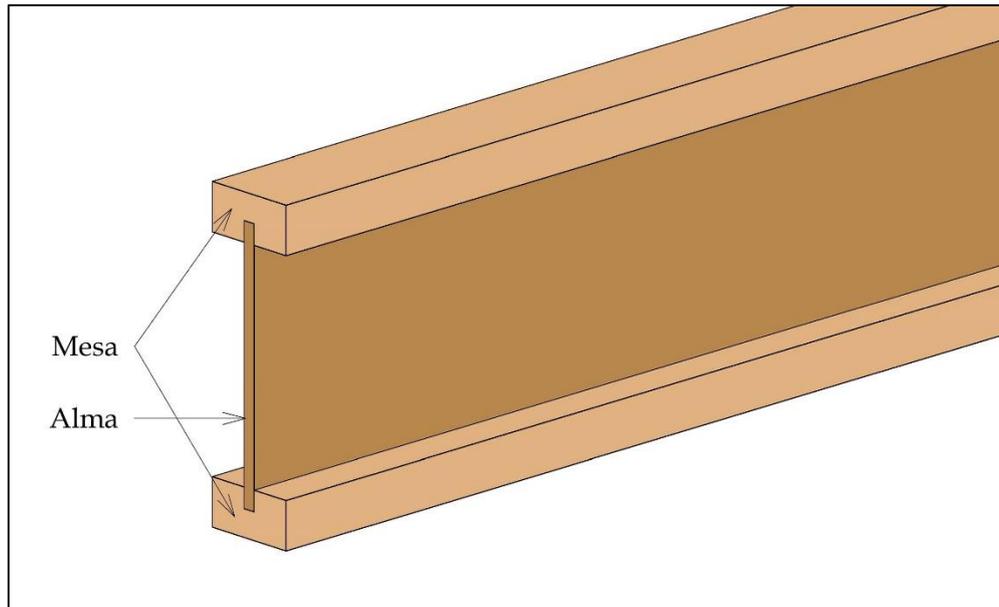


Figura 2 – Composição da viga “I-Joist”
Fonte: Adaptado de WILLIAMSON, 2002.

Em conformidade com American Wood Council (1999) as vigas “I” são amplamente utilizadas como barrotos para lajes de pavimentos na América do Norte. Além do uso em habitação, “I-Joists” deparam-se com crescente, porém ainda tímido, uso na construção comercial e industrial. A alta resistência, rigidez, ampla disponibilidade e baixo custo caracterizaram-nas como uma alternativa viável para os projetos de construção. (AMERICAN WOOD COUNCIL, 1999).

Vigas “I-Joist” são fabricadas por um número de diferentes materiais, os da mesa e da alma. Como tal, os processos de fabricação variam ligeiramente para acomodar as diferenças de material. Em geral, no entanto, elas são fabricadas em um dos dois métodos básicos: em comprimentos fixos ou em linhas contínuas. (WILLIAMSON, 2002).

De acordo com Williamson (2002), o método de comprimento fixo é usado para mesas, geralmente compostas por folheado de madeira laminada (LVL) com comprimentos em torno de 18,3 a 19,9 metros. Um sulco em forma de cunha é usinado no material das mesas, sendo que a geometria do mesmo é essencial no processo de aderência entre as mesas e a alma. Tal aderência é viável através de adesivos impermeáveis e sua aplicação ocorre nas mesas e na alma. Dessa maneira, após a sua cura, as vigas são registradas, empacotadas e enviadas aos distribuidores. A Figura 3 representa o processo descrito.

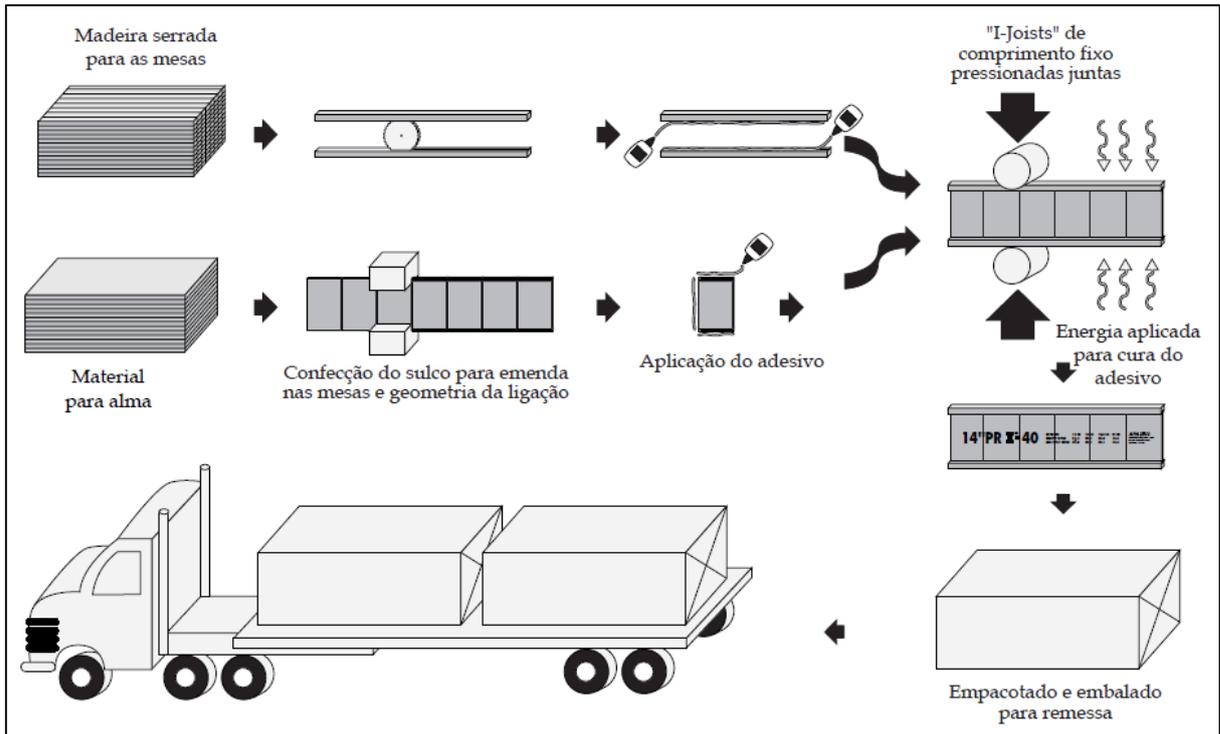


Figura 3 – Método de fabricação comprimento fixo
 Fonte: Adaptado AMERICAN WOOD COUNCIL, 2006.

Ainda segundo Williamson (2002), o método de linhas contínuas, é empregado em mesas de madeira serradas para produção de vigas "I-Joists" com longos comprimentos. Por serem maiores em sua extensão, primeiramente, confecciona-se a emenda entre as mesas, aplica-se adesivo entre elas e aguarda-se sua cura. Na próxima etapa do processo, o sulco é usinado concomitantemente nas mesas e de forma contínua. Como no método anterior, aplica-se o adesivo nas mesas e na alma, espera-se a cura do mesmo. Assim, a viga é cortada no comprimento desejado. Por fim, elas são registradas, empacotadas e enviadas aos distribuidores. A representação desse procedimento pode ser visualizada na Figura 4.

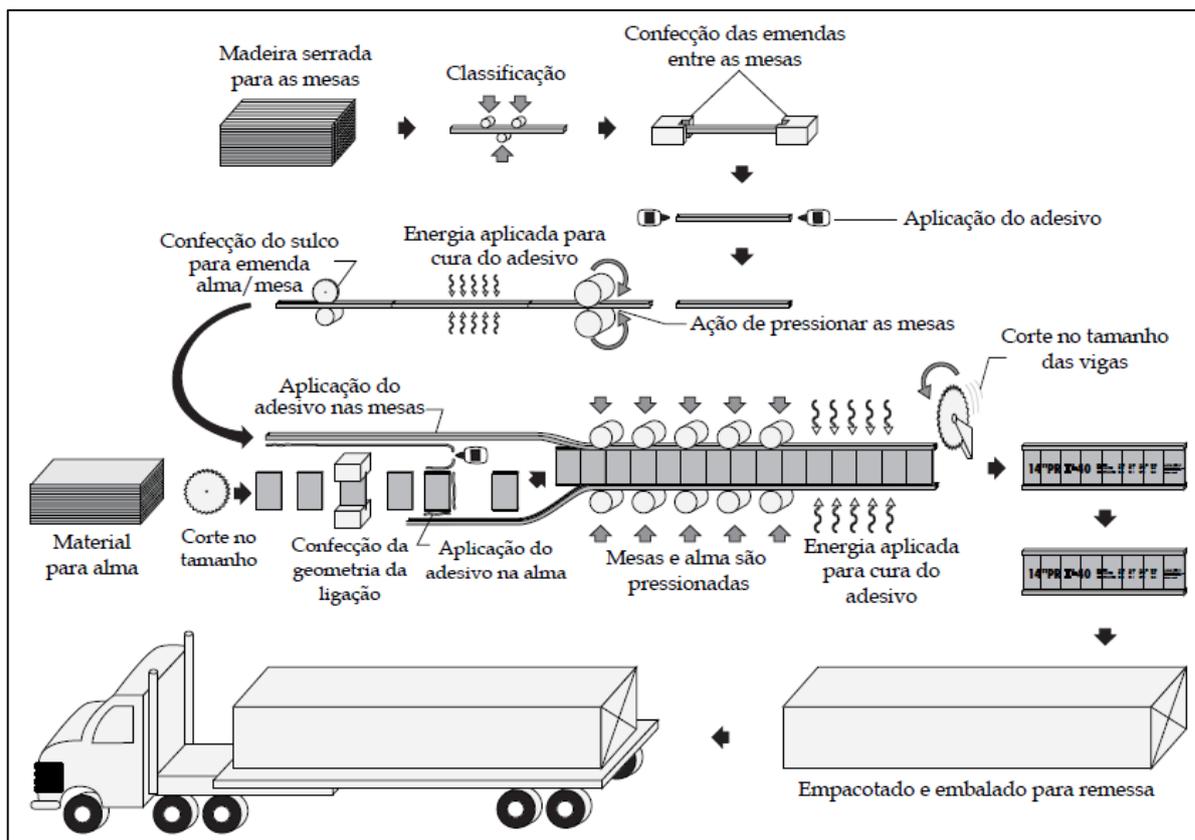


Figura 4 – Método de fabricação linhas contínuas
Fonte: Adaptado de AMERICAN WOOD COUNCIL, 2006.

4.2.3 Materiais constituintes

Quando se pensa em espécies de rápido crescimento como alternativa na produção de madeira, o gênero *Eucalyptus* se apresenta como opção potencial, não somente por sua capacidade produtiva e adaptabilidade a diversos ambientes, mas sobretudo pela grande diversidade de espécies, tornando possível atender aos requisitos tecnológicos dos mais diversos segmentos da produção industrial madeireira (PONCE², 1995, apud LOBÃO, et al., 2012).

Poucas décadas de pesquisa começam a mudar a história do eucalipto no Brasil. De madeira de péssima qualidade e de vilão da natureza, acusado de extenuar os solos, consumir demasiada água, afugentar a fauna e impedir o cultivo com outras culturas, o eucalipto vem se transformando em alternativa de madeira de qualidade para aplicação na indústria em geral e

² PONCE, R.H. Madeira serrada de eucalipto: desafios e expectativas. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA. Anais. São Paulo, 1995. p. 50-58.

na construção civil. Apesar das incessantes pesquisas realizadas para melhorar a qualidade da madeira eucalipto, ainda se está longe de atingir níveis adequados para obtenção de peças de grandes dimensões livre de defeitos (PEREIRA³, 2000, apud LOBÃO, et al., 2012).

O alto grau de eficiência estrutural e a economia de material das vigas "I" são frutos dos esforços de muitos cientistas. O material utilizado na alma pode ser o compensado ou OSB, materiais caracterizados pela elevada resistência ao cisalhamento (LEICHTI; FALK; LAUFENBERG, 1990). A Figura 5 ilustra o material mencionado.



Figura 5 – Painéis estruturais OSB
Fonte: LP BRASIL (2016).

Os painéis de partículas orientadas, mais conhecidos como OSB, foram desenvolvidos para suprir uma característica demandada, e não encontrada, tanto na madeira aglomerada tradicional quanto nas chapas MDF – a resistência mecânica exigida para fins estruturais. Os painéis são formados por camadas de partículas com resinas fenólicas, que são orientados em uma mesma direção e então, prensados para sua consolidação. Cada painel consiste de três a cinco camadas, orientadas em ângulo de noventa graus umas com as outras. A resistência destes painéis à flexão estática é alta, não tanto quanto a da madeira sólida original, mas tão alta quanto a dos compensados estruturais, aos quais substituem perfeitamente (REMADE, 2007).

Com o objetivo das tiras formarem um painel com espessura relativamente pequena, são unidos vários painéis de diversas espessuras. Cada painel ainda pode ter uma orientação diferente de suas tiras, OSB com superfície alinhada e o núcleo aleatório e OSB com a superfície

³ PEREIRA, J.C. D. et al. Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil. Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 113p.

alinhada e o núcleo orientado (USDA, 2010). Essa orientação é exposta, respectivamente, conforme a Figura 6.

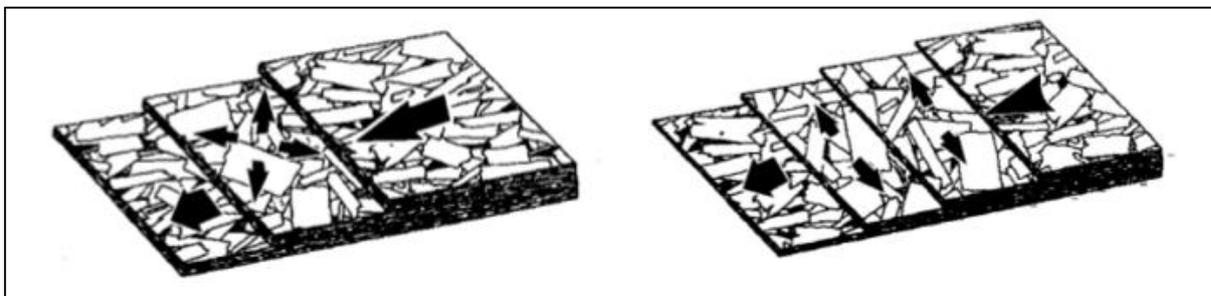


Figura 6 - Orientação dos painéis na chapa de OSB
Fonte: STRUCTURAL BOARD ASSOCIATION (2005).

Os painéis OSB têm tido utilização no exterior, principalmente na construção habitacional. Nos Estados Unidos, a construção de casas apresenta características de uso intenso de madeira serrada e de painéis, especialmente em paredes internas e externas, pisos e forros e, nestes usos, os painéis OSB têm tido bom desempenho (REMADE, 2007).

Nos Estados Unidos e Canadá, uma das principais utilizações do OSB está na fabricação de vigas “I”. Contudo, também pode ser utilizado em produção de divisórias de ambientes, utilização no fechamento de paredes, nos contrapisos, nos forros de coberturas e fabricação de móveis. A definição da orientação das lascas da madeira, obtida no processo de manufatura do produto, assegura propriedades estruturais às chapas que permitem a sua plena utilização em obras de edificações, tanto para sustentação estrutural quanto para fechamento de paredes (LIMA, 2005).

O êxito de sua utilização está relacionado com a escassez de matéria-prima, já que seu concorrente, o compensado, necessita de árvores com diâmetros maiores e madeira de melhor qualidade para sua produção. Em contrapartida, o OSB pode ser produzido a partir de árvores de pequeno diâmetro e toras de qualidade inferior. Ademais, a resistência ao cisalhamento pode ser até duas vezes maior que a do compensado, já que não apresenta defeitos proveniente da madeira sólida, destacando a razão pela qual o OSB é o material mais indicado para uso como alma das vigas “I” (FISSETTE, 2005).

Além do mais, Pizzini e Góes (2015) realizaram ensaios para determinação das propriedades do OSB. Nesse estudo, em virtude da falta de normatização específica no Brasil, foram utilizadas as normas ASTM para determinação da resistência e propriedades elásticas das chapas de OSB. Todavia, devido à complexidade dos métodos apresentados pela norma

ASTM D2719, adaptou-se um dos métodos para determinação da resistência e do módulo de elasticidade transversal dessas chapas.

4.2.4 Montagem das Vigas “I-Joists”

Existem vários tipos de ligações as quais podem ser empregadas para a união das peças de uma viga “I” de madeira. Pode-se dividi-las em dois grandes grupos: uniões mecânicas e uniões adesivas. As uniões adesivas são consideradas como uniões rígidas, ou seja, não proporcionam deslizamentos significativos entre as partes unidas. Já as uniões mecânicas são naturalmente deformáveis e suas deformações devem ser computadas no cálculo estrutural (GÓES, 2002).

Consideram-se estruturais adesivos que contribuem com aderência e rigidez durante a vida útil da estrutura. Esses adesivos geralmente são mais resistentes e mais rígidos do que a madeira em que estão ligados. Ademais, os adesivos podem ser classificados em adesivos de uso exterior e adesivos de uso interno. Os primeiros, possuem o diferencial de permanecerem eficientes mesmo sob condições climáticas adversas, como na presença de umidade. Em contrapartida, os de uso interno não possuem durabilidade quando expostos a umidade e não devem ser utilizados em aplicações estruturais (USDA, 2010).

Um estudo realizado por Lima (2005) analisa o comportamento estrutural das vigas de madeira com seção “I”, contemplando a união da alma e das mesas realizada com adesivo ou não. Verificou-se que as vigas pregadas têm capacidade de resistir até 90 vezes o seu peso próprio, ao passo que as vigas coladas e pregadas e as vigas coladas atingiram cargas superiores a 230 vezes o seu peso. A utilização do adesivo na confecção dessas vigas faz com que a alma e as mesas trabalhem como se fossem uma única peça, não ocorrendo escorregamento.

Além das ligações adesivas utilizadas nas vigas “I-Joists”, outro fator relevante é a geometria para a ligação alma/mesa. De acordo com Ribeiro (2012), as ligações entre alma e mesa são estudadas com muita frequência em busca de resultados satisfatórios, já que são um dos grandes obstáculos para a fabricação dessas vigas. Dessa forma, o autor analisou quatro tipos distintos de geometrias: em “V”, com dois sulcos levemente inclinados, com dois sulcos e retangular, conforme a Figura 7.



Figura 7 - Tipos de geometrias alma/mesa
Fonte: RIBEIRO; SEDOSKI; GÓES (2011).

Ainda sobre o estudo de Ribeiro (2012), verifica-se que as geometrias retangular e em forma de “V” apresentaram resistências superiores às geometrias com sulcos paralelos e inclinados, a diferença tem fundamento na identificação do estado de ruptura dos corpos de prova. As geometrias retangular e em forma de “V” apresentaram facilidade de montagem e resultados satisfatórios com ruptura por cisalhamento na alma. Ao passo que as geometrias com sulcos paralelos e inclinados romperam por cisalhamento do OSB próximo a borda de ligação.

4.3 NORMATIZAÇÃO

O processo de normatização das vigas em “I” de madeira, começou nos EUA em 1981 por um grupo de produtores interessados em estabelecer critérios de desempenho para essas estruturas. Ao fim, determinou-se as capacidades de cargas, resultando em uma classificação mais uniforme do produto. Em 1985, o processo de normatização transferiu-se para a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) Comitê D-7 de madeira. Em 1997, elaborou-se a primeira norma para vigas em “I” pré-fabricadas de madeira, a ASTM D 5055 (*Standard Specification for Establishing and Monitoring Structural Capacities of Prefabricated Wood I-Joists*), uma especificação padrão para estabelecer e monitorar capacidades estruturais das vigas em “I” pré-fabricadas de madeira (WILLIAMSON, 2002).

4.3.1 NBR 7190 - Projeto de Estruturas de Madeira

A ABNT NBR 7190 (1997) 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. Entretanto, em relação ao dimensionamento de vigas com seção transversal “I”, há recomendação para aquelas com almas pregadas e para peças compostas com alma em treliça ou de chapa de madeira compensada.

As vigas de perfil “I” com alma pregada podem ser dimensionadas como peças maciças, com seção transversal de área igual à soma das áreas das seções dos elementos componentes, e momento de inércia efetivo dado pela Equação 1.

$$I_{ef} = \alpha_r I_{th} \quad (1)$$

Em que:

I_{th} = momento de inércia da seção total da peça como se ela fosse maciça

α_r = coeficiente de ajuste; para seção I é igual a 0,85.

Já para peças compostas com alma em treliça ou de chapa de madeira compensada, encontra-se apenas o seguinte direcionamento:

As peças compostas com alma em treliça formada por tábuas diagonais e as peças compostas com alma formada por chapa de madeira compensada devem ser dimensionadas à flexão simples ou composta, considerando exclusivamente as peças dos banzos tracionado e comprimido, sem redução de suas dimensões.

A alma dessas vigas e as suas ligações com os respectivos banzos devem ser dimensionados a cisalhamento como se a viga fosse de seção maciça (ABNT NBR 7190, 1997).

4.3.2 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 ensaios da ASTM D198. A norma atual caracteriza-se como uma expansão da norma original (1927), permitindo sua aplicação em diversos tipos de elementos de madeira e seções transversais. Tal normativa fornece métodos de avaliação estáticos, em

peças de tamanho estrutural, como compressão, torção, determinação do módulo de elasticidade transversal, bem como o ensaio de flexão.

O ensaio de flexão abrange a determinação de propriedades de vigas estruturais compostas de madeira sólida ou seus compostos. Esse método de ensaio é destinado primeiramente para vigas de seção transversal retangular, mas também é aplicável a vigas roliças e outras seções transversais, como as vigas “I-Joists” (ASTM D198, 2002).

4.3.3 ASTM D5055 – Standard Specification for Establishing and Monitoring Structural Capacities of Prefabricated Wood I-Joists

A ASTM D5055 indica especificações padrão a fim de estabelecer, monitorar e reavaliar o comportamento estrutural de vigas de madeira com perfil “I” pré-fabricadas. Descreve também os procedimentos, empíricos e analíticos, para a classificação inicial das vigas. Além disso, expõe uma codificação para as principais formas de rupturas que possam vir a ocorrer nas vigas “I-Joists”, porém considera a possibilidade de ocorrer outros modos de ruptura ainda não relatados na norma. Essa codificação tem por propósito realizar o controle de qualidade dessas peças e criar um padrão das principais rupturas (ASTM D5055, 2004). A Figura 8 apresenta os principais modos de falha das vigas “I” em testes feitos em escala real de utilização.

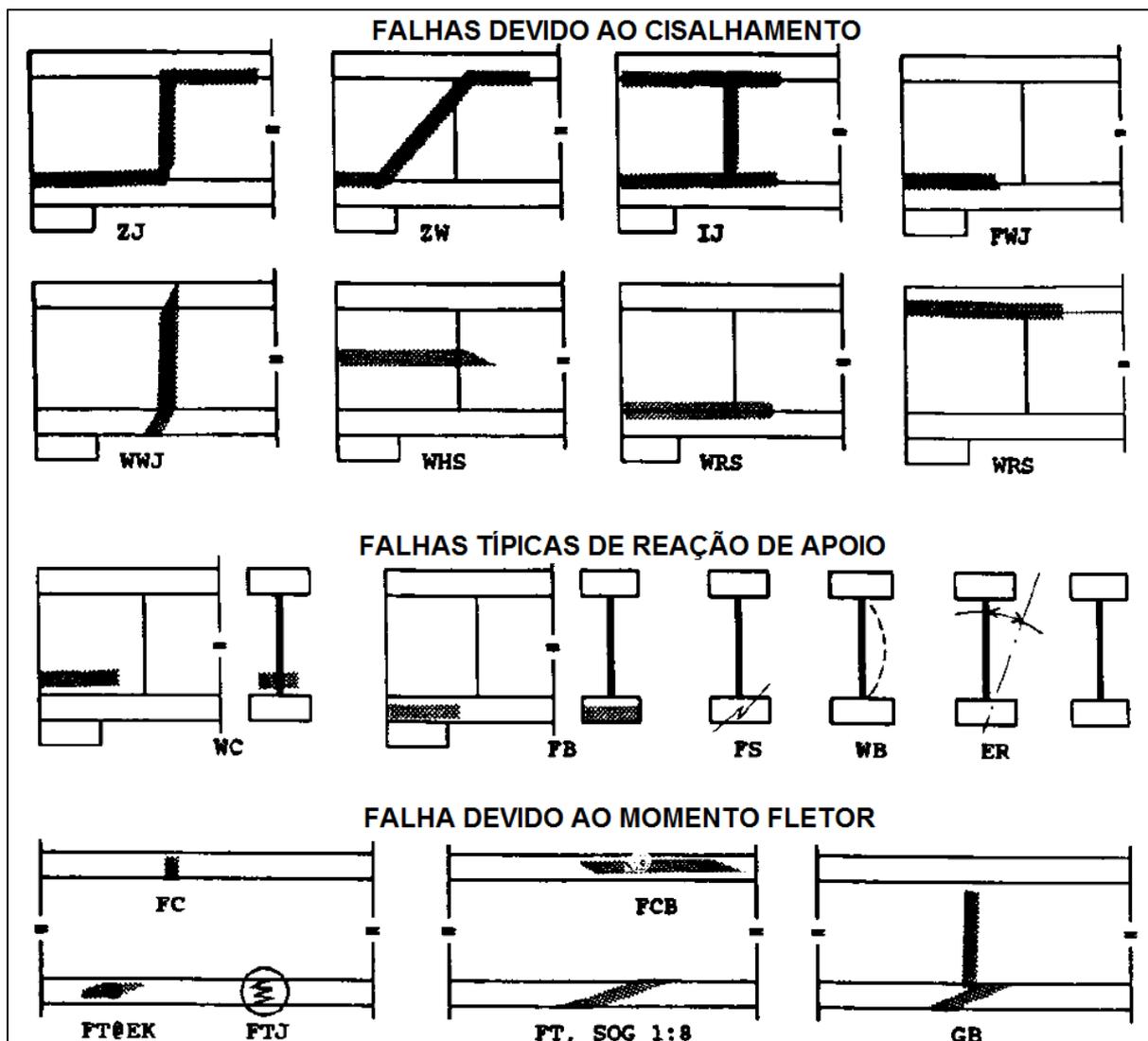


Figura 8 - Principais modos de falhas das vigas "I" em testes feitos em escala real
Fonte: Adaptado de ASTM (2004).

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, porém as falhas da ligação mesa-alma se estendem para os dois lados da ligação alma-alma.

FWJ: 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.

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

4.3.4 APA Performance Rated I-Joists

A marca APA significa que as vigas em “I-Joists” são fabricadas com rigorosos padrões de qualidade determinados pela “*Performance Rated I-Joists*” (PRI), por um membro da Engineered Wood Systems (EWS), uma corporação relacionada da APA. Esse programa foi criado para garantir performance consistente e confiável dos produtos, viabilizando a seleção e uso de “I-Joists” de vários fabricantes, com padrões geométricos e recomendações construtivas (APA PERFORMANCE RATED I-JOISTS, 2012). A Figura 9 revela os significados em cada posição da Marca APA EWS, sendo que, pode variar de acordo com o fabricante.

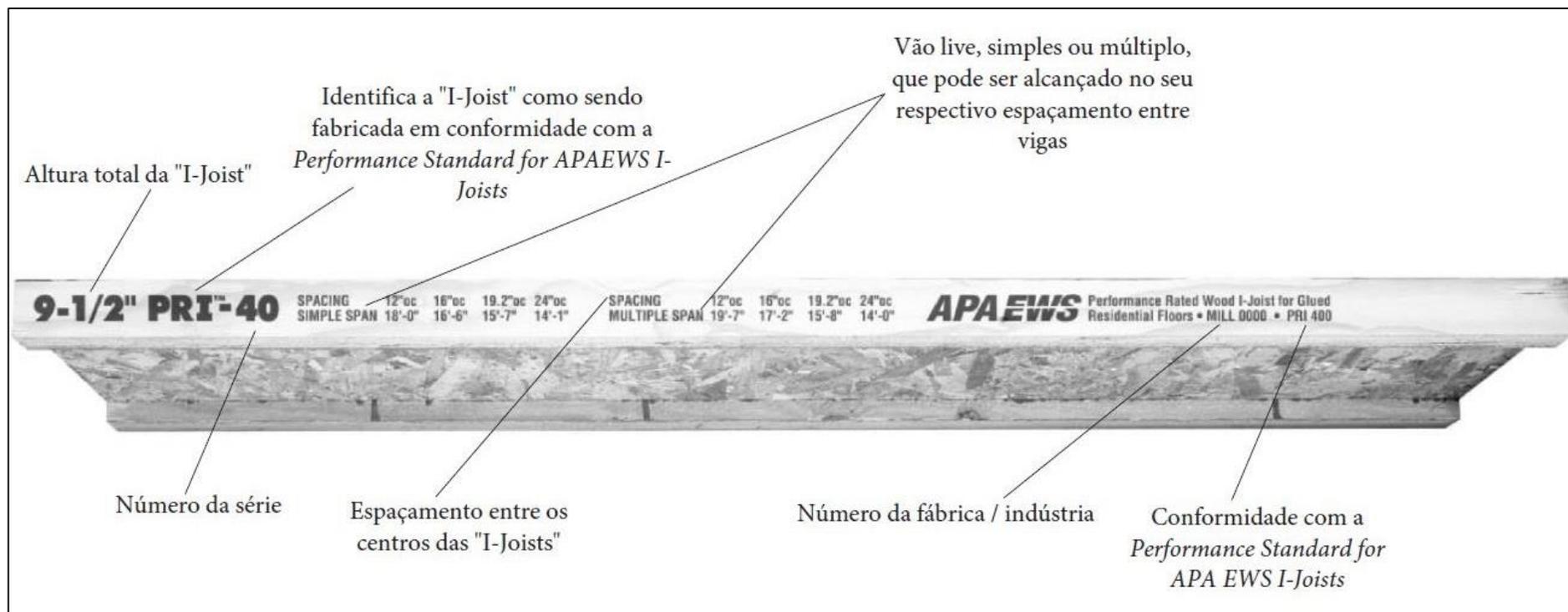


Figura 9 - Explicação das identificações na viga "I-Joist"

Fonte: Adaptado de WILLIANSO (2002).

As normas APA Performance Rated I-Joists Form X720 e Z725 (2012) indicam especificações de vigas “I” para uso em pisos residenciais, em condições de uso interno. A APA PRI X720 cita requisitos de qualidade, conforme ASTM D5055, como o material da mesa e alma, além do adesivo a ser empregado. Por outro lado, a APA PRI Z725 expõe especificações de aberturas na alma, instalação e detalhes construtivos das “I-Joists”, bem como considerações com o objetivo de diminuir ou prevenir o alastramento de fogo.

Ambas as normas APA Performance Rated I-Joist Form X720 e Z725 (2012) apresentam tabelas de referência de uso das vigas “I-Joists” em pisos residenciais, com base em documentos normativos norte americanos e tomando como fator limitante a flecha $L/480$, considerando apenas o a ação variável combinada. Tal fator limitante é critério justificado pela norma, o qual determina desempenho de piso superior, visto que proporciona diminuição substancial da vibração de piso.

As Tabelas 1 e 2 apresentam o vão máximo permitido para vigas em pisos residenciais com vão simples, isto é, bi-apoiada, e para vigas contínuas. A utilização das tabelas ocorre, basicamente, de acordo com quatro parâmetros: a altura, a classificação da série, o espaçamento entre o centro das vigas e, o vão da “I-Joist”.

Tabela 1 – Vãos simples (a, b, c, d) permitidos pela APA EWS Performance Rated I-Joist

Altura (mm)	Série da viga	Vão simples (m)			
		Espaçamento entre apoios (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 múltiplos (a, b, c, d) permitidos pela APA EWS Performance Rated I-Joist

Altura (mm)	Série da viga	Múltiplos vãos (m)			
		Espaçamento entre apoios (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).

a) Vão máximo permitido para pisos residenciais considerando valor de projeto para carga permanente 0,48 kN/m² e ação variável 1,91 kN/m². A deflexão pela ação variável de projeto é limitada em L/480.

b) Os vãos tabelados são baseados num sistema de piso pregado-colado utilizado no sistema *wood frame*, conforme exigências da APA *Rated Sheathing* ou APA *Rated Sturd-I-Floor*. Os painéis de OSB utilizados devem possuir espessura mínima de 15 mm para um espaçamento entre “I-Joists” de 488 mm ou menos, ou 18,3 mm para espaçamento entre vigas

de 610 mm. O adesivo utilizado nesse sistema deve respeitar a especificação da APA AFG-01 ou da ASTM D3498. Ademais, os vãos devem ser reduzidos a 305 mm quando esse sistema foi apenas pregado.

c) O mínimo comprimento de apoio deve ser de 44,5 mm para os apoios de extremidade e 88,9 para apoios intermediários.

d) Enrijecedores não são necessários quando “I-Joists” são utilizadas com os vãos e espaçamentos contidos na tabela, exceto quando requeridos pelos fabricantes.

As vigas devem ser produzidas atendendo as seguintes especificações: as mesas superiores e inferiores devem ser constituídas do mesmo material, 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 madeira compensada ou OSB. Estes painéis devem ser classificados como de Exposição 1 ou Exterior, com espessura igual ou superior a 9,5 mm. 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).

Além disso, as alturas totais disponíveis de “I-Joists” são 241 mm, 302 mm, 356 mm, 406 mm, sendo que vigas de mesma altura são fabricadas com diferentes larguras 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 (APA Performance Rated I-Joists, 2012).

A APA PRI (2012) apresenta notas de instalação e alguns detalhes construtivos das vigas “I”, específico para pisos residências. A mesa da viga, com exceção ao corte em comprimento, não deve ser cortada, perfurada ou entalhada e as mesas superior e inferior devem estar 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, luminárias ou forros.

Em conformidade com a APA PRI (2012), as “I-Joists” não devem ser utilizadas em lugares onde serão permanentemente expostas às intempéries ou em áreas onde atingirão teor de umidade maior que 16%, tal como numa piscina. Além do mais, elas não devem ser instaladas em locais com contato direto com concreto ou alvenaria.

A APA PRI (2012) ainda apresenta a avaliação de várias propriedades de projeto. A Tabela 3 apresenta tais características, de acordo com a padronização da APA para as quatro alturas de vigas “I”.

Tabela 3 – Vãos múltiplos (a, b, c, d) permitidos pela APA EWS Performance Rated I-Joist

Altura (mm)	Série da Viga	EI (kN.m ²)	Md (kN.m)	Vd (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
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
406	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).

Em que:

EI = rigidez à flexão da viga;

Md = momento resistente de cálculo da viga;

Vd = cortante resistente de cálculo da viga;

K = coeficiente utilizado para cálculo da flecha.

Observam-se efeitos súbitos de perda de estabilidade nas vigas em geral. Essa instabilidade pode ocorrer de três modos: local, global e distorcional. Em geral, na flambagem global, considera-se predominante o caso particular da flambagem por flexão. Já a instabilidade devido a flambagem lateral por flexo-torção ocorre nas vigas sem contenções laterais ou com contenções laterais muito espaçadas (ABRANTES, 2012). Em relação às falhas típicas na região do apoio, pode ocorrer flambagem da alma na reação de apoio, devido à ausência de enrijecedores que garantem maior rigidez a peça.

Em relação aos enrijecedores, conforme a APA PRI (2012), há dois tipos, aqueles localizados na região dos apoios intermediários ou das extremidades e os localizados no vão, utilizados na existência de carga concentrada aplicada na mesa superior da viga. Sugere-se que a altura dos enrijecedores de alma seja igual a distância entre as mesas da viga menos 3,18mm até 6,35mm. Nos enrijecedores localizados no vão, a abertura é localizada entre a base dos enrijecedores e a base da mesa inferior. Em contrapartida, nos enrijecedores de alma do apoio, essa abertura é compreendida entre o topo do enrijecedores e a base da mesa superior, conforme ilustra a Figura 10.

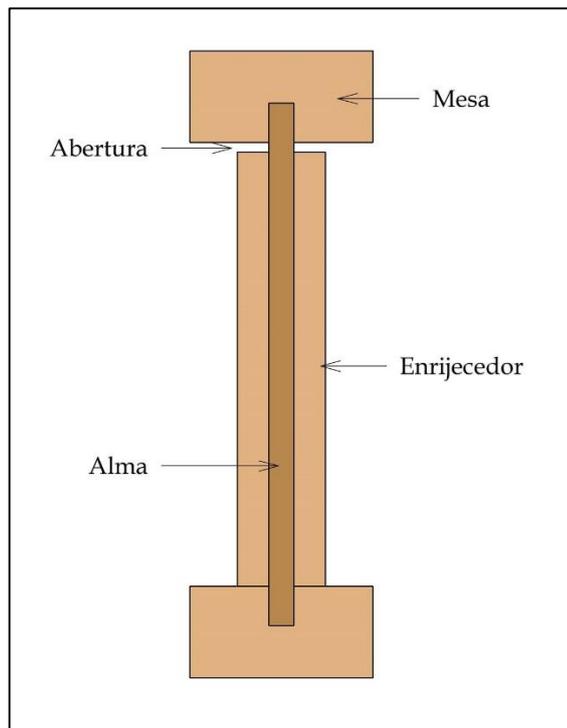


Figura 10 – Enrijecedor de alma

4.4 COMPORTAMENTO DE VIGAS “I” SUBMETIDAS À FLEXÃO

A geometria das vigas “I” permite o melhor posicionamento dos materiais em relação às suas características. Dessa maneira, as mesas são produzidas para suportar a maior parte do momento fletor oferecendo elevada rigidez à flexão, e a alma, o esforço referente ao cisalhamento. Nesse contexto, diversos autores estudaram métodos de cálculo das seções transversais. As vigas “I-Joists” são produzidas utilizando adesivos rígidos na ligação alma/mesa, eliminando o deslizamento pelo cisalhamento e simplificando o cálculo (LEICHTI; FALK; LAUFENBERG, 1990). As Figuras 11 e 12 ilustram as tensões que atuam na viga devido ao momento fletor e ao esforço cisalhante, respectivamente.

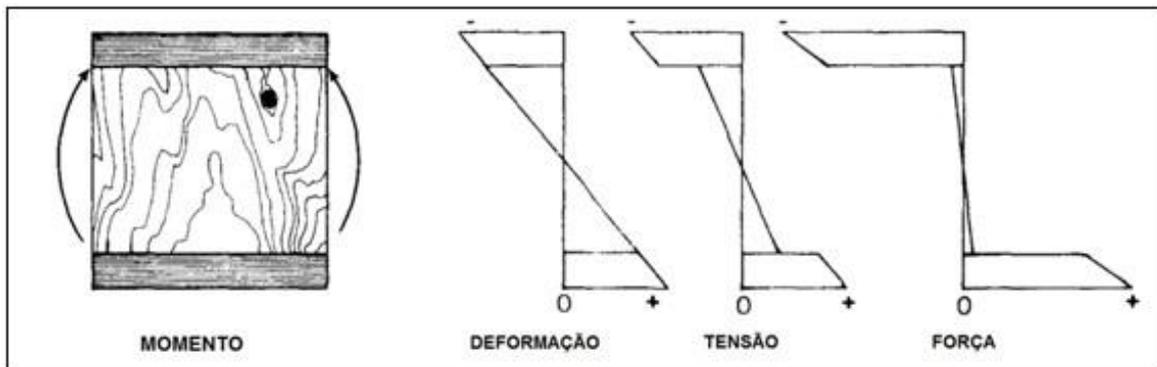


Figura 11 - Distribuição da deformação, tensão e força de vigas “I” submetidas a momento fletor positivo
 Fonte: Leichti; Falk; Laufenberg (1990).

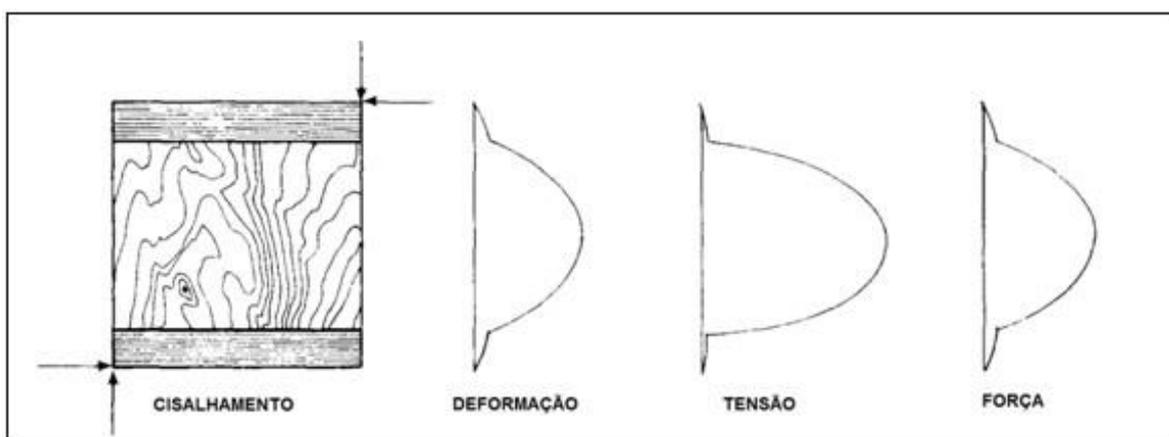


Figura 12 - Distribuição da deformação, tensão e força de vigas “I” submetidas ao cisalhamento
 Fonte: Leichti; Falk; Laufenberg (1990).

4.4.1 Método da seção transformada para seção em “I”

Frequentemente, utiliza-se o método da seção transformada ou também conhecido como homogeneização da seção quando uma viga possui seção transversal constituída por diferentes materiais. O princípio do método está baseado na Teoria da Flexão e consiste em transformar a seção em outra equivalente que seja constituída por apenas um material, com a mesma rigidez à flexão, tal que os eixos permaneçam na mesma posição.

Na flexão normal em torno do eixo principal horizontal, os elementos terão sua área e sua largura modificadas, mas não a altura. A fim de homogeneizar a seção transversal, deve-se adotar apenas um material como referência. Feito isso, a largura dos elementos da seção transversal será multiplicada por uma razão modular dada entre o módulo de elasticidade do material escolhido como referência e o módulo de elasticidade do outro material, sendo tal representação exposta na Equação 2 (SANTANA, 1997).

$$n_i = \frac{E_i}{E_C} \quad (2)$$

Em que:

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 13 apresenta a seção transversal para cálculo de viga “I” com três elementos.

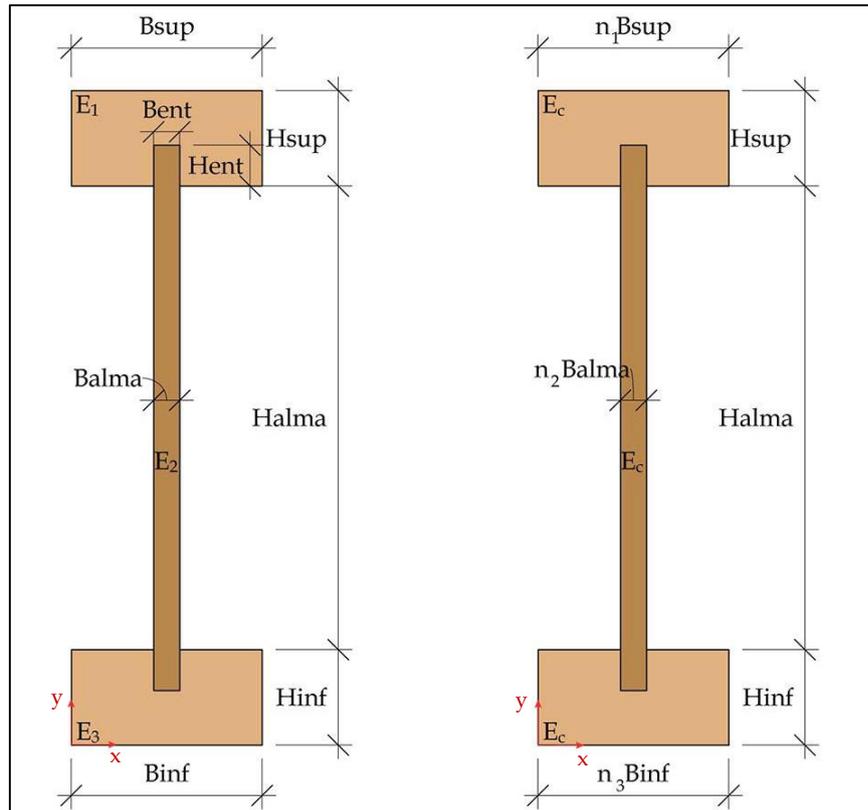


Figura 13 - Seção transformada para viga “I” com três elementos

Além do mais, a Equação 3, 4, 5 e 6 determina a área da seção transformada de cada peça. Por meio das Equações 10 e 14 encontram-se o centroide da seção transformada e a inércia efetiva da seção transversal, respectivamente. A Equação 15 permite encontrar a rigidez efetiva da seção transformada. A eixo de referência adotado se encontra na borda inferior da viga.

$$A_i = n_i b_i h_i \quad (3)$$

Em que:

b_i = largura de cada elemento;

h_i = altura de cada elemento.

$$A_1 = Hsup. Bsup. n_1 - Hent. Bent. n_1 \quad (4)$$

$$A_2 = Balma. (Halma + 2. Hent). n_2 \quad (5)$$

$$A_3 = n_3 \cdot (Hinf \cdot Binf - Hent \cdot Bent) \quad (6)$$

$$CT_1 = Hinf + Halma + \frac{\frac{Hsup}{2} \cdot Hsup \cdot Bsup \cdot n_1 - \frac{Hent}{2} \cdot Hent \cdot Bent \cdot n_1}{Hsup \cdot Bsup \cdot n_1 - Hent \cdot Bent \cdot n_1} \quad (7)$$

$$CT_2 = \frac{Halma + 2 \cdot Hent}{2} + Hinf - Hent \quad (8)$$

$$CT_3 = \frac{\frac{Hinf}{2} \cdot Hinf \cdot Binf \cdot n_3 - \left(Hinf - \frac{Hent}{2}\right) \cdot Hent \cdot Bent \cdot n_3}{Hint \cdot Bint \cdot n_3 - Hent \cdot Bent \cdot n_3} \quad (9)$$

$$CT_{Total} = \frac{CT_1 \cdot A_1 + CT_2 \cdot A_2 + CT_3 \cdot A_3}{A_1 + A_2 + A_3} \quad (10)$$

$$I_{ef1} = n_1 \left[\left(\frac{Bsup \cdot Hsup^3}{12} - \frac{Bent \cdot Hent^3}{12} \right) + Hsup \cdot Bsup \cdot \left(\left(Hinf + Halma + \left(\frac{Hsup}{2} \right) \right) - CT_{Total} \right)^2 - Bent \cdot Hent \cdot \left(CT_{Total} - \left(Hinf + Halma + \frac{Hent}{2} \right) \right)^2 \right] \quad (11)$$

$$I_{ef2} = n_2 \left[\left(\frac{Balma \cdot (Halma + 2 \cdot Hent)^3}{12} \right) + Balma \cdot (Halma + 2 \cdot Hent) \cdot (CT_2 - CT_{Total})^2 \right] \quad (12)$$

$$I_{ef3} = n_3 \left[\left(\frac{Binf \cdot Hinf^3}{12} - \frac{Bent \cdot Hent^3}{12} \right) + Hinf \cdot Binf \cdot \left(\left(\frac{Hinf}{2} \right) + -CT_{Total} \right)^2 - Bent \cdot Hent \cdot \left(CT_{Total} - Hinf - Hent + \frac{Hent}{2} \right)^2 \right] \quad (13)$$

$$I_{ef} = I_{ef1} + I_{ef2} + I_{ef3} \quad (14)$$

$$EI_{(ef)} = I_{ef} \cdot E_C \quad (15)$$

Em que:

B_{sup} = base da mesa superior;

H_{sup} = altura da mesa superior;

B_{ent} = base do entalhe;

H_{ent} = altura do entalhe;

B_{alma} = base da alma;

H_{alma} = altura da alma;

B_{inf} = base da mesa inferior;

H_{inf} = altura da mesa inferior;

CT_1 = Centróide da mesa superior;

CT_2 = Centróide da alma;

CT_3 = Centróide da mesa inferior;

CT_T = Centróide da seção transversal;

I_{ef1} = inércia efetiva da mesa superior;

I_{ef2} = inércia efetiva da alma;

I_{ef3} = inércia efetiva da mesa inferior;

I_{ef} = inércia efetiva da seção transversal;

$EI_{(ef)}$ = Rigidez efetiva para a seção transformada.

4.4.2 Estimativa de flecha considerando a deformação por cisalhamento

Lima (2014), em suas observações finais, evidenciou que o resultado do modelo analítico obtido, o qual leva em consideração a deformação por cisalhamento, é mais próximo do valor da flecha alcançada experimentalmente, em comparação ao que não considera tal deformação. De acordo com Garbin (2013), em seu estudo, em relação ao critério de rigidez à flexão, as vigas “I-Joists” apresentaram resultados de uma diferença considerável, variando de 19% a 31%. Ele afirma que tal fato pode ter origem pela deformação por cisalhamento a qual não foi considerada no método de cálculo utilizado em seu trabalho.

Segundo o American Wood Council (1999) as vigas “I” de madeira, devido ao material otimizado da alma, são suscetíveis aos efeitos de deformação por cisalhamento sendo este responsável por 15% até 30% do total da flecha da viga. Portanto, ao se estudar o desempenho das vigas “I-Joists” faz-se necessário considerar a deformação por cisalhamento.

4.4.3 Método do Princípio dos Trabalhos Virtuais

O Princípio dos Trabalhos Virtuais (PTV), comumente utilizado em análises de estruturas, baseia-se na conservação de energia, sendo resultado do balanço entre o trabalho externo e a energia de deformação interna armazenada em uma estrutura (MARTHA, 2010). Assim, tal princípio é anunciado a partir da consideração de que, numa estrutura, um sistema de forças equilibradas quaisquer, denominadas forças virtuais, o trabalho virtual das forças externas é igual ao trabalho virtual das forças internas (SORIANO, 2006).

Além disso, cabe ressaltar que o Princípio dos Trabalhos Virtuais só é válido se o sistema de forças realmente satisfizer as condições de equilíbrio e se a configuração deformada satisfizer as condições de compatibilidade. Logo, esse princípio pode ser utilizado para impor condições de compatibilidade a uma configuração deformada qualquer. Basta que se escolha arbitrariamente um sistema de forças, denominado virtual, do qual se saiba que satisfaz as condições de equilíbrio. Tal versão do PTV é chamada de Princípio das Forças Virtuais (MARTHA, 2010).

Levando em consideração o princípio mencionado, com o objetivo de determinar o deslocamento, em determinada direção, de um ponto qualquer, considera-se como novo caso de carregamento, na mesma estrutura, uma força virtual unitária no ponto e direção do deslocamento pretendido, conforme ilustrado na Figura 14. A Figura 14 também exhibe que a estrutura em que se pretende conhecer o deslocamento pode ser hiperestática e o modelo com a força unitária pode ser isostático, obtido pela retirada dos vínculos superabundantes da estrutura hiperestática (SORIANO, 2006).

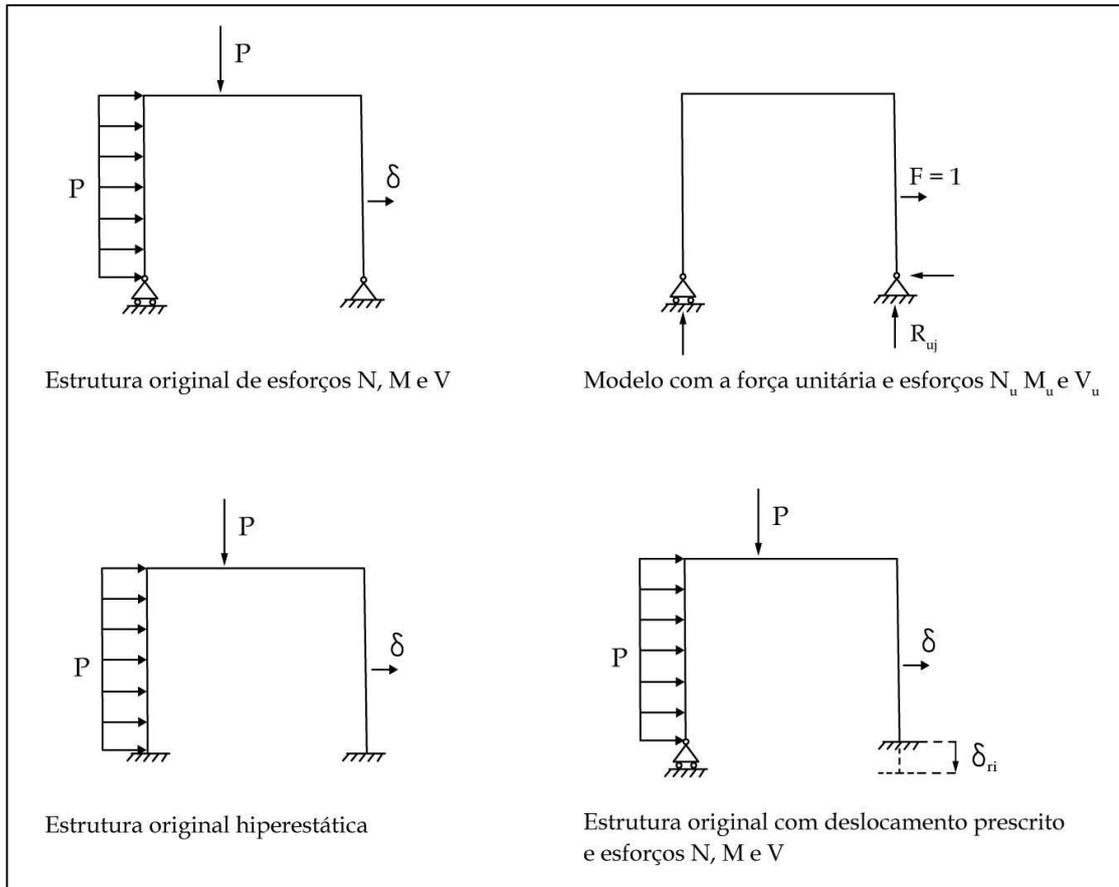


Figura 14 - Pórtico plano
Fonte: SORIANO (2006).

No caso do método da força virtual, a carga virtual “total” é aplicada antes de as cargas reais provocarem deslocamentos e, portanto, o trabalho das cargas virtuais internas consiste simplesmente no produto entre a carga virtual interna e seu deslocamento real (HIBBELER, 2009). Designando os esforços internos nas seções da estrutura com carga unitária sendo N_u , M_u , V_u , T_u e N , M , V e T os esforços internos nas seções da estrutura com carregamento original, tem-se a equação do trabalho virtual para um corpo submetido a uma carga geral, Equação 16.

$$\delta = \sum_b \int_x \left(\frac{N_u N}{EA} + \frac{M_u M}{EI} + f_s \frac{V_u V}{GA} + \frac{T_u T}{GJ} \right) dx \quad (16)$$

Em que:

δ = deslocamento desejado;

N_u = esforço normal gerado pela força virtual unitária;

M_u = momento fletor gerado pela força virtual unitária;

V_u = esforço cortante gerado pela força virtual unitária;

T_u = momento torçor gerado pela força virtual unitária;

EI = rigidez à flexão da seção transversal;

G = módulo de elasticidade transversal do material;

J = momento de inércia à torção da seção transversal;

A = área da seção transversal;

f_s = coeficiente de forma da seção transversal.

Considerando as vigas sem a presença do esforço normal e torção, a Equação 16 também pode ser descrita através das Equações 17 e 18, evidenciando o deslocamento devido ao momento fletor e cisalhamento. Este, levado em consideração uma vez que as vigas em análise possuem fator L/H próximo de 10 e, para relações de L/H entre 10 e 25, a parcela de deformação devido ao cisalhamento varia de 25 a 5% (GUIMARÃES, 2016).

$$\delta_{total} = \delta_{momento\ fletor} + \delta_{cisalhamento} \quad (17)$$

$$\delta_{total} = \int_x \frac{M_u M}{EI} dx + \int_x f_s \frac{V_u V}{GA} dx \quad (18)$$

Solucionando o segundo termo da Equação 18, obtém-se as Equações 19, 20 e 22, visto que a inclinação da curva no diagrama dos momentos fletores é igual à força de cisalhamento, ou seja, $dM/dx = V$, Equação 21 (HIBBELER, 2006).

$$\delta_{cisalhamento} = \int_x f_s \frac{V_u V}{GA} dx \quad (19)$$

$$\delta_{\text{cisalhamento}} = \frac{f_s}{GA} \int_x V_u V dx \quad (20)$$

$$\int_x V_u V dx = M_{\text{máx}} \quad (21)$$

$$\delta_{\text{cisalhamento}} = \frac{f_s}{GA} M_{\text{máx}} \quad (22)$$

Segundo Timoshenko e Gere (1984) o fator de forma assume diferentes valores, a depender da seção transversal do elemento. Assim, para a seção transversal retangular, o valor do coeficiente de forma é exposto pela Equação 23; para seção circular, Equação 24; para tubo circular de parede fina, Equação 25; e tubo retangular de parede fina, bem como para seção “I” com chapas finas, Equação 26.

$$f_s = \frac{6}{5} \quad (23)$$

$$f_s = \frac{10}{9} \quad (24)$$

$$f_s = 2 \quad (25)$$

$$f_s \cong \frac{A_{\text{total}}}{A_{\text{alma}}} \quad (26)$$

Young e Budynas (2002) propõem a Equação 27, para o cálculo do fator de forma para vigas “I-Joists” com seção transversal indicada na Figura 15. Sendo que o raio de giração se apresenta pela equação 28.

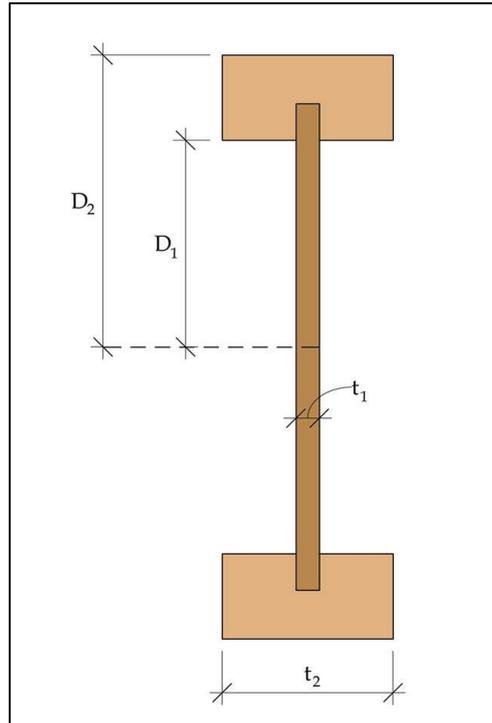


Figura 15 - Seção transversal da Viga “I” em estudo

$$f_s = \left[1 + \frac{3(D_2^2 - D_1^2)D_1}{2D_2^3} \left(\frac{t_2}{t_1} - 1 \right) \right] \frac{4D_2^2}{10r^2} \quad (27)$$

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (28)$$

Em que:

D_1 = distância do CG até a face interna da mesa;

D_2 = distância do CG até a face externa da mesa;

t_1 = espessura da alma;

t_2 = espessura da mesa;

r = raio de giração;

I = inércia da seção transversal;

A = área da seção transversal.

A Equação 29 apresenta o cálculo do deslocamento transversal no meio do vão, considerando a deformação por cisalhamento, submetidas ao método de carregamento do ensaio de flexão de quatro pontos, conforme a ASTM D198 (2002), indicado na Figura 16.

$$\delta = \frac{23PL^3}{1296EI} + \frac{f_s}{GA} \left(\frac{PL}{6} \right) \quad (29)$$

Em que:

P = força concentrada aplicada (N);

L = vão de cálculo.

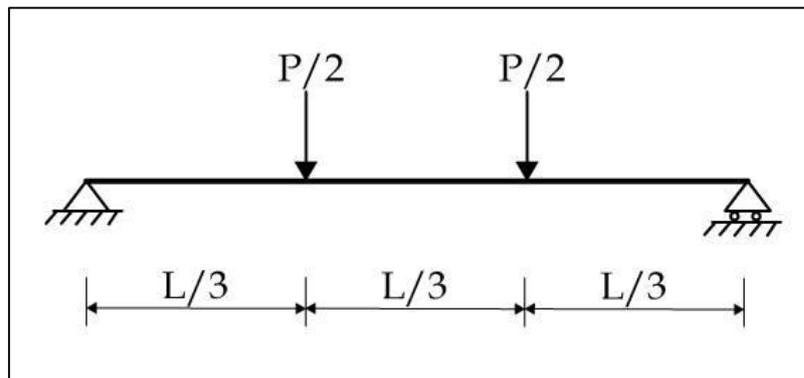


Figura 16 – Configuração do ensaio de flexão em quatro pontos
 Fonte: Adaptado RANCOURT (2008).

4.4.4 Método simplificado de Rancourt

De acordo com Rancourt (2008) as vigas “I-Joists” são suscetíveis aos efeitos do cisalhamento, sendo que sua influência varia de 15% até 30% da deflexão total para razão L/H (vão por altura da viga) pequena. Nesse contexto, a norma americana APA Performance Rated I-Joist Form Z725 (2012), exibe o método de cálculo da deformação devido ao cisalhamento, evidenciado por Rancourt, conforme Equação 30.

$$\delta_{\text{cisalhamento}} = \frac{8M}{K} \quad (30)$$

Em que:

K = coeficiente empírico de deformação por cisalhamento;

M = momento no meio do vão.

É possível comparar o deslocamento devido ao cisalhamento conforme o Princípio dos Trabalhos Virtuais, Equação 22, com o proposto por Rancourt, Equação 30. Dessa maneira, ao se observar as equações 31 e 32, verifica-se que o valor do coeficiente obtido experimentalmente K está relacionado ao coeficiente de forma da seção, módulo de elasticidade transversal do material composto pela alma, assim como área da seção transversal.

$$\frac{f_s}{GA} M = \frac{8M}{K} \quad (31)$$

$$K = \frac{8GA}{f_s} \quad (32)$$

O coeficiente de deformação por cisalhamento, K , varia em conformidade com a altura da viga e apresenta seus valores tabelados para cada série PRI, evidenciada pela APA Performance Rated I-Joist Form Z725 (2012), segundo a Tabela 4.

Tabela 4 – Valores de coeficiente K para as séries de vigas “I-Joists” padronizadas

Altura (mm)	Série da Viga	K (kN)
241	PRI – 20, PRI – 30, PRI – 40, PRI – 50, PRI – 60	21974
302	PRI – 20, PRI – 30, PRI – 40, PRI – 50, PRI – 60, PRI – 70, PRI – 80, PRI – 90	27490
356	PRI – 40, PRI – 50, PRI – 60, PRI – 70, PRI – 80, PRI – 90	32383
406	PRI – 40, PRI – 50, PRI – 60, PRI – 70, PRI – 80, PRI – 90	37009

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

Desse modo, a Figura 17 apresenta os carregamentos e vinculações comumente utilizados. Ademais, a Tabela 5 expõe o momento máximo nas vigas I, II e III e a flecha devido ao momento fletor, além da parcela de flecha proveniente do esforço cortante, em conformidade com a metodologia de cálculo apresentada por Rancourt.

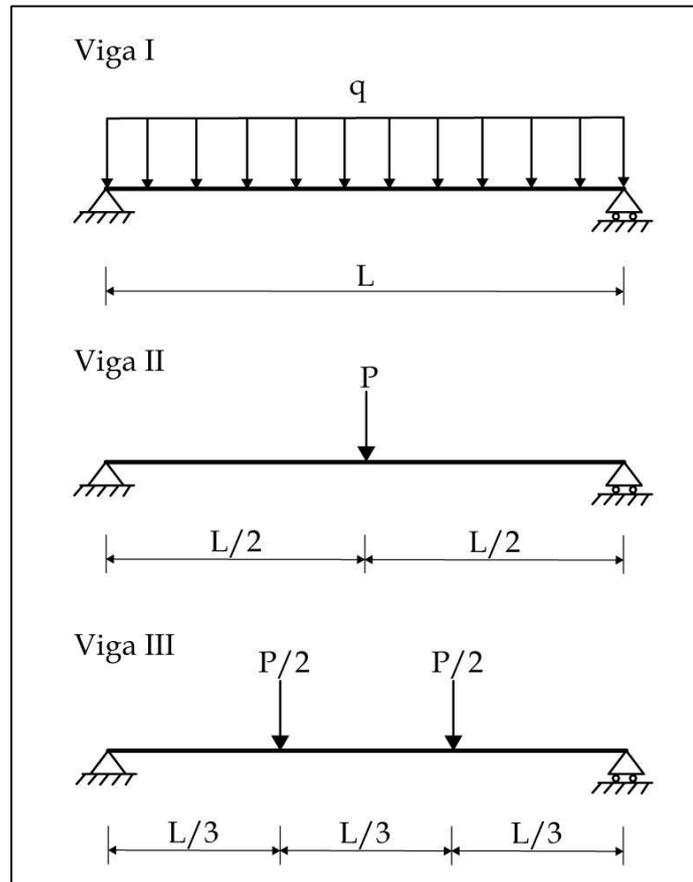


Figura 17 – Modelos de carregamento para cálculo da flecha
Fonte: Adaptado RANCOURT (2008).

Em que:

q = força uniforme distribuída (N/m);

P = força concentrada (N).

Tabela 5 – Cálculo de flecha para as vigas “I-Joists”, considerando a deformação por cisalhamento

Item	Viga I	Viga II	Viga III
$M_{m\acute{a}ximo}$	$\frac{qL^2}{8}$	$\frac{PL}{4}$	$\frac{PL}{6}$
$\delta_{cisalhamento}$	$\frac{qL^2}{K}$	$\frac{2PL}{K}$	$\frac{6PL}{8K}$
$\delta_{momento}$	$\frac{5qL^4}{384EI}$	$\frac{PL^3}{48EI}$	$\frac{23PL^3}{1296EI}$
δ_{total}	$\frac{5qL^4}{384EI} + \frac{qL^2}{K}$	$\frac{PL^3}{48EI} + \frac{2PL}{K}$	$\frac{23PL^3}{1296EI} + \frac{6PL}{8K}$

5 METODOLOGIA

A fim de avaliar o desempenho estrutural de vigas “I-Joists” realizaram-se comparações entre diferentes modelos de cálculo analítico – PTV e Rancourt – com resultados experimentais de vigas com perfil “I” em escala real. Assim, o programa experimental da pesquisa foi conduzido de forma a caracterizar os materiais empregados em atendimento a normas brasileiras e estrangeiras, quando na falta de normatização nacional.

Nesse sentido, foram fabricadas seis vigas “I”, com chapas de OSB compondo a alma e peças de madeira serrada de *Eucalyptus grandis* constituindo as mesas superior e inferior. Além disso, os ensaios foram desenvolvidos no Laboratório de Sistemas Estruturais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Câmpus Campo Mourão.

5.1 MATERIAIS

As madeiras serradas de *Eucalyptus grandis* foram adquiridas em uma empresa da cidade de Campo Mourão - Paraná para confecção das mesas e ficaram condicionadas em tabiques até atingir a umidade de equilíbrio, em torno de 12% em conformidade com a ABNT NBR 7190 (1997). Ademais, realizou-se controle periódico do teor de umidade por meio de medidor elétrico Digisystem DL 2000. Após a secagem das peças, elas foram classificadas por processo visual, descartando aquelas que apresentaram defeitos como medula, trincas, empenas e nós maiores do que 1/4 da seção transversal.

Para o material da alma, foi utilizado o painel de OSB estrutural (Home Plus) do fabricante LP Brasil de Ponta Grossa - Paraná, com dimensões de 1200 mm x 2400 mm e 9,5 mm de espessura. A fim de unir as mesas e a alma, utilizou-se o adesivo fenol-resorcinol-formaldeído (PRF), o qual é encontrado com o nome comercial de CASCOPHEN – RS 216M, produzido pela Hexion Specialty Chemicals, utilizado em conjunto com o preparado endurecedor FM-60-M (em pó) na proporção por peso de 20%.

A escolha desse adesivo é justificada por Ribeiro (2012), o qual estudou diferentes tipos de adesivo e a CASCOPHEN garantiu facilidade de confecção, alto desempenho e confiabilidade da ligação.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA E DO OSB

Com o propósito de caracterizar a madeira utilizada, primeiramente, foram retirados das vigas sete corpos de prova para determinação do teor de umidade e densidade da madeira. As dimensões nominais da seção transversal do corpo de prova foram de 2,0 cm x 3,0 cm e comprimento, ao longo das fibras, de 5,0 cm, de acordo com a ABNT NBR 7190 (1997). A figura 18 apresenta os corpos de prova obtidos e sua disposição na câmara de secagem.



Figura 18 – Disposição dos corpos de prova para determinação da umidade e densidade aparente

O procedimento iniciou com a determinação da massa inicial do corpo de prova com precisão de 0,01 g. Posteriormente, os corpos de prova foram colocados na câmara de secagem, com temperatura de $100^{\circ} \text{C} \pm 3^{\circ} \text{C}$. Durante a secagem, a massa dos corpos de prova foi mensurada a cada seis horas, até ocorrer uma variação, entre duas medidas consecutivas, menor ou igual a 0,5% da última massa medida. Por fim, calculou-se o teor de umidade através da Equação 33.

$$U (\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (33)$$

Em que:

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

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

A densidade aparente da madeira foi obtida utilizando os mesmos corpos de prova do ensaio de umidade. Dessa forma, a massa inicial e o volume inicial dos corpos de prova foram mensurados e, através da Equação 34, determinou-se a densidade.

$$\rho = \frac{m_i}{V_i} \quad (34)$$

A rigidez efetiva experimental de cada uma das mesas foi obtida por meio do ensaio não destrutivo de flexão estática, após a realização dos entalhes para o encaixe da alma. O carregamento foi aplicado através de objetos pré-pesados, sendo que a flecha não superou 1/200 do vão das peças. Os deslocamentos foram medidos por meio de relógio comparador com resolução de 0,01mm, conforme Figura 19.



Figura 19 - Ensaio de flexão estática das mesas

Com isso, a rigidez efetiva experimental das mesas foi calculada conforme a Equação 35.

$$EI_{(ef)exp} = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot \delta} \quad (35)$$

Em que:

$EI_{(ef)exp}$ = rigidez efetiva experimental, em N.mm².

P = força, em N.

L = distância entre os apoios, em mm.

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

Dessa forma, utilizando a Equação 37, o módulo de elasticidade longitudinal (E_L) de cada uma das mesas também foi determinado, sendo I o momento de inércia, em mm^4 .

Cabe salientar que Pizzini (2017) realizou ensaios para obtenção das constantes elásticas para caracterização da madeira a ser empregada, sendo os módulos de elasticidade Longitudinal, Radial e Tangencial (E_L , E_R e E_T), os módulos de elasticidade transversal (G_{RT} , G_{LT} e G_{LR}), os coeficientes de Poisson (ν_{RL} , ν_{TL} e ν_{TR}) e as relações entre esses parâmetros elásticos, representados na Tabela 6 e Tabela 7.

Tabela 6 - Valores médios para as constantes elásticas da madeira (E_i e G_{ij} em MPa)

E_L	E_R	E_T	G_{RT}	G_{LT}	G_{LR}
22014,85	1494,08	781,13	109,92	599,44	878,04
ν_{RL}	ν_{TL}	ν_{LR}	ν_{TR}	ν_{LT}	ν_{RT}
0,03	0,02	0,46	0,32	0,55	0,61

Fonte: PIZZINI (2017).

Tabela 7 – Relações médias entre parâmetros elásticos longitudinais e transversais

Relações entre parâmetros elásticos	
E_L/E_T	28,18
E_R/E_T	1,91
E_L/E_R	14,73
G_{LR}/G_{RT}	7,99
G_{LT}/G_{RT}	5,45
G_{LR}/G_{LT}	1,46
E_L/G_{LR}	25,07

Fonte: PIZZINI (2017).

O mesmo autor também apresentou a caracterização do OSB, como os módulos de elasticidade a flexão longitudinal (E_1), transversal (E_2), vertical e de cisalhamento, bem como o Poisson longitudinal-transversal (ν_{12}) e transversal-longitudinal (ν_{21}), apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores médios para as constantes elásticas das chapas de OSB (MPa)

Módulo de Elasticidade				ν_{12}	ν_{21}
Flexão Longitudinal (E_1)	Flexão Transversal (E_2)	Flexão Vertical	Cisalhamento (G_{12})		
4246,74	2391,39	3246,26	1131,05	0,54	0,31

Fonte: PIZZINI (2017).

5.3 MONTAGEM DAS VIGAS

Após a caracterização das mesas com ensaio de flexão, procedimento realizado a fim de obter rigidez semelhantes nas mesas de uma mesma viga, as peças foram introduzidas no processo de confecção das mesas, a saber: 1) passaram pela desengrossadeira e plaina chegando às dimensões corretas da seção transversal; 2) foram cortadas no comprimento adequado com o auxílio da serra circular; 3) com o auxílio da tupia, foram realizados os sulcos para o encaixe da alma; 4) as peças foram lixadas. As etapas são mostradas na Figura 20.

A escolha da geometria do entalhe para encaixe da alma com as mesas das vigas “I-Joists” foi a retangular, visto que, conforme afirma Ribeiro (2012) em seu estudo, tal geometria apresentou resistência satisfatória e praticidade em sua execução.



Figura 20 – Procedimentos utilizados para confecção das vigas

Ademais, a placa de OSB foi cortada nas dimensões adequadas e, com o auxílio da máquina tupia um pequeno rebaixo foi realizado na alma com o objetivo de facilitar o perfeito encaixe com as mesas. O perfil de viga “I” escolhido foi o PRI - 60 e as Figuras 21 e 22 exibem as dimensões da seção das vigas fabricadas e seu comprimento, respectivamente.

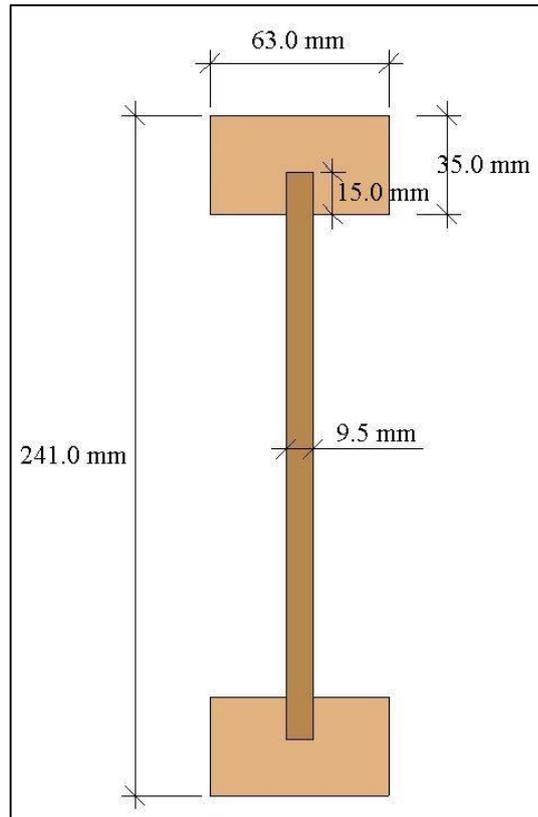


Figura 21 – Seção das vigas “I-Joists”

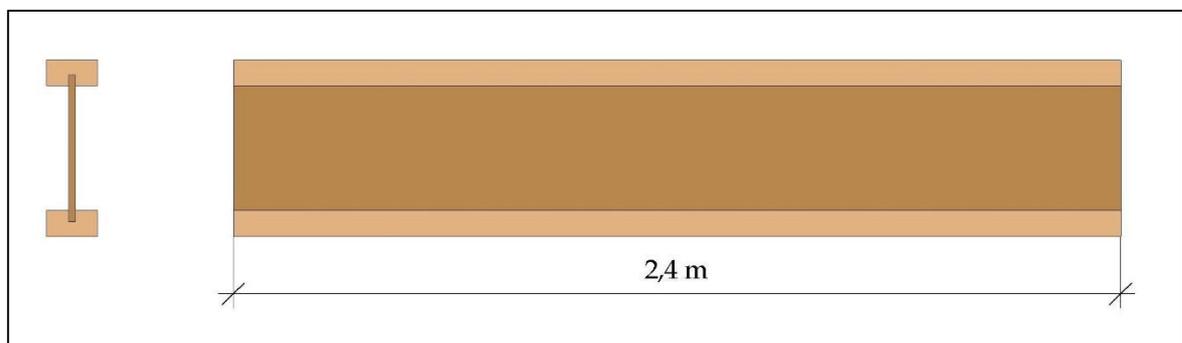


Figura 22 – Comprimento das vigas “I-Joists”

Posteriormente, iniciou-se o processo de colagem com a aplicação do adesivo com auxílio de um pincel, controlando a quantidade visualmente a fim de obter aplicação homogênea, conforme Figura 23. Assim, uniram-se as peças com pressão de colagem constante em todos os pontos, através de aparato constituído por barras roscadas e controladas por torquímetro, de 5 N.m, por oito horas, em conformidade com a Figura 24. A Figura 25 ilustra as vigas “I-Joists” finalizadas.



Figura 23 – Preparação para colagem das “I-Joists”



Figura 24 – Aplicação de pressão de colagem



Figura 25 – Vigas “I-Joists” finalizadas

Além disso, de maneira a evitar uma possível instabilidade local da alma durante o ensaio, foram instalados enrijecedores nos pontos de aplicação da carga e nos apoios de acordo com especificação da APA-PR310C (2016), conforme a Figura 26.



Figura 26 – Enrijecedores instalados ao longo do comprimento das “I-Joists” nos pontos de aplicação de carga

5.4 ENSAIO DAS VIGAS

No experimento, foi obtido o valor da rigidez efetiva relativo à flexão para cada viga. O ensaio foi realizado no pórtico de reação, que é composto de uma estrutura metálica combinada com um pistão hidráulico acoplado em uma célula de carga. De maneira a evitar possível instabilidade lateral durante o ensaio, as vigas foram contraventadas ao longo de seu comprimento, como ilustra a Figura 27.



Figura 27 – Contraventamento das vigas durante ensaio de flexão

A ASTM D198 (2002) indica que o tempo de ensaio deve ser aproximadamente de dez minutos, sendo que a carga máxima não deve ser alcançada em menos de seis minutos e nem mais do que vinte minutos. Os deslocamentos foram medidos com o auxílio de transdutor de deslocamento modelo Mitutoyo DT-100 localizado no meio do vão e relógios comparadores modelo 543-682B, com resolução de 0,001 mm, localizados nas extremidades.

Ademais, o equipamento de aquisição de dados utilizado foi o LYNX 2161 e os softwares utilizados foram: AqDados e AqAnalysis. O vão teórico utilizado foi de 2,3 metros. A esquematização do ensaio está exposta nas Figura 28.

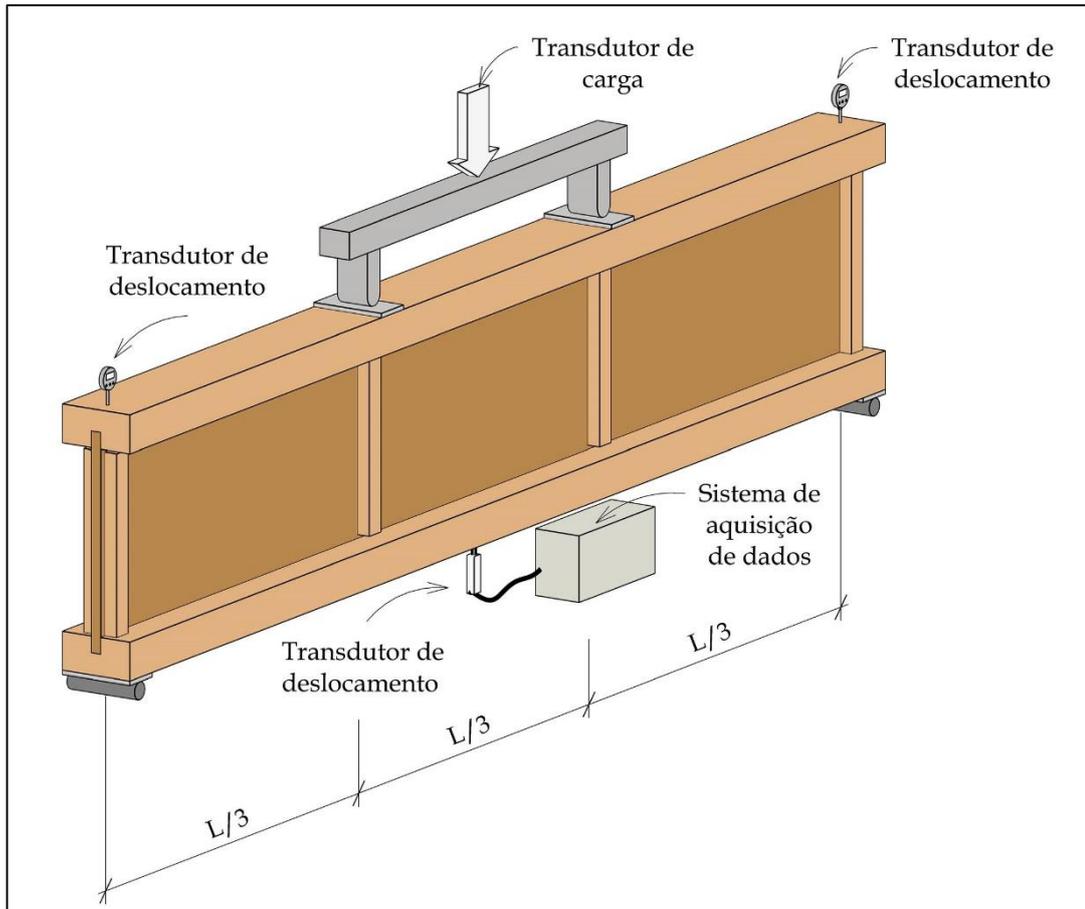


Figura 28 – Esquematização do ensaio de flexão a quatro pontos

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 UMIDADE E DENSIDADE

A Tabela 9 apresenta os resultados dos ensaios de determinação do teor de umidade e densidade aparente para os corpos de prova da madeira *Eucalyptus grandis*. Além disso, são dispostos os valores médios, desvio padrão, bem como o coeficiente de variação.

Tabela 9 - Valores de umidade e densidade aparente para a madeira *Eucalyptus grandis*

Corpo de Prova	Umidade (%)	Densidade (kg/m ³)
1	16,69	571,47
2	21,31	560,42
3	15,60	532,79
4	17,55	523,61
5	17,33	505,19
6	16,72	645,81
7	21,44	504,75
Média	18,09	549,15
Desvio padrão	2,15	45,97
Coeficiente de variação (%)	11,91	8,37

6.2 RIGIDEZ EFETIVA EXPERIMENTAL DAS MESAS

A seguir, a Tabela 10 apresenta os valores da rigidez efetiva experimental das mesas das vigas já com os sulcos para o encaixe da alma, obtidas através do ensaio de flexão. Tal ensaio foi efetuado dentro o limite elástico, sendo que a flecha não superou 1/200 do vão das peças.

Tabela 10 - Valores de rigidez efetiva experimental das mesas

Viga	Mesa	$EI_{(ef)exp}$ (N.mm²)
1	superior	3,67E+09
	inferior	3,76E+09
2	superior	3,26E+09
	inferior	3,19E+09
3	superior	3,14E+09
	inferior	3,27E+09
4	superior	3,11E+09
	inferior	3,20E+09
5	superior	3,17E+09
	inferior	3,02E+09
6	superior	2,94E+09
	inferior	2,82E+09
Média		3,21E+09
Desvio padrão		2,69E+08
Coefficiente de variação (%)		8,39

6.3 DESLOCAMENTO EXPERIMENTAL DAS VIGAS “I-JOISTS”

Através da metodologia apresentada, os deslocamentos obtidos experimentalmente são mostrados na Tabela 11.

Tabela 11 – Deslocamento obtido experimentalmente no meio do vão

Viga	Resultado experimental (mm)	Força (N)
1	3,28	7845,32
2	3,60	7845,32
3	3,66	7845,32
4	3,65	7845,32
5	3,90	7845,32
6	4,04	7845,32

6.4 DESLOCAMENTOS ANALÍTICOS DAS VIGAS “I-JOISTS”

A Tabela 12 indica os valores de deslocamentos atingidos de maneira analítica por meio dos métodos apresentados anteriormente.

Tabela 12 – Deslocamento obtido analiticamente

Viga	PTV sem considerar cisalhamento (mm)	PTV considerando cisalhamento (mm)	Rancourt (mm)
1	2,09	3,27	3,19
2	2,38	3,56	3,47
3	2,41	3,59	3,50
4	2,48	3,66	3,58
5	2,53	3,71	3,62
6	2,57	3,73	3,66

6.5 RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Portanto, através dos ensaios experimentais e cálculos analíticos, os resultados já descritos são sintetizados nos Gráficos a seguir.

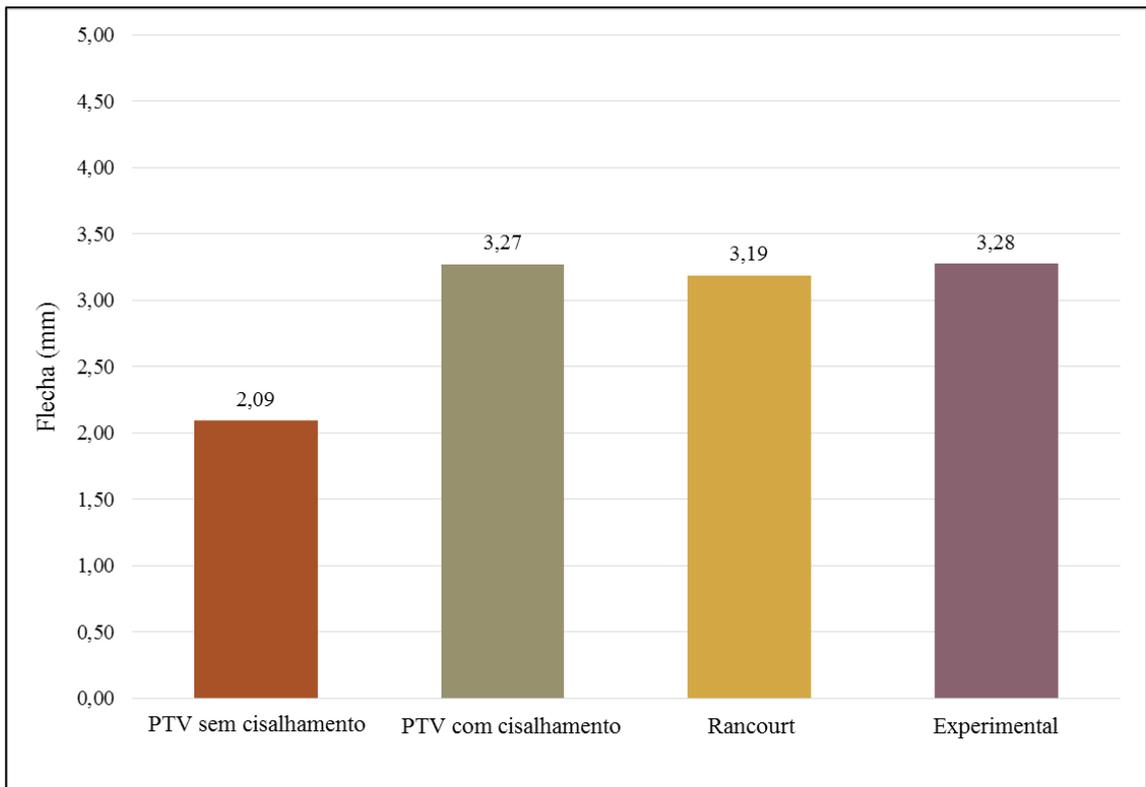


Gráfico 1 – Resultados obtidos para viga 1

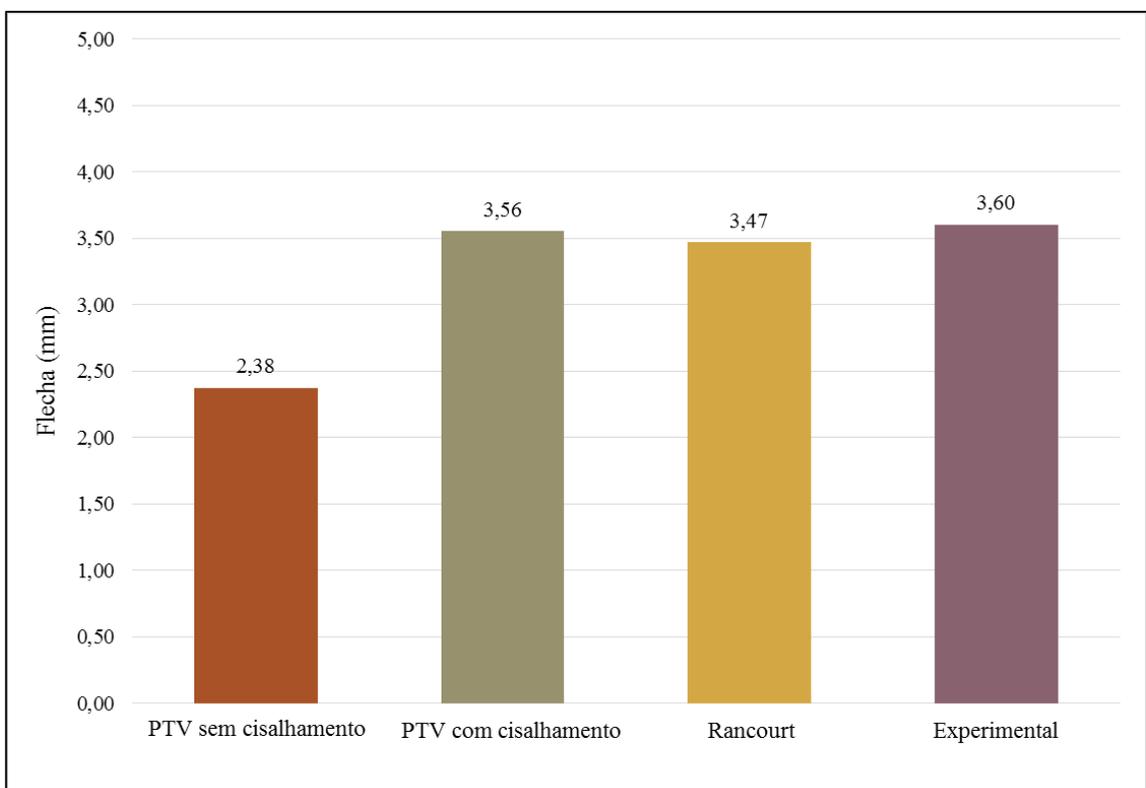


Gráfico 2 – Resultados obtidos para viga 2

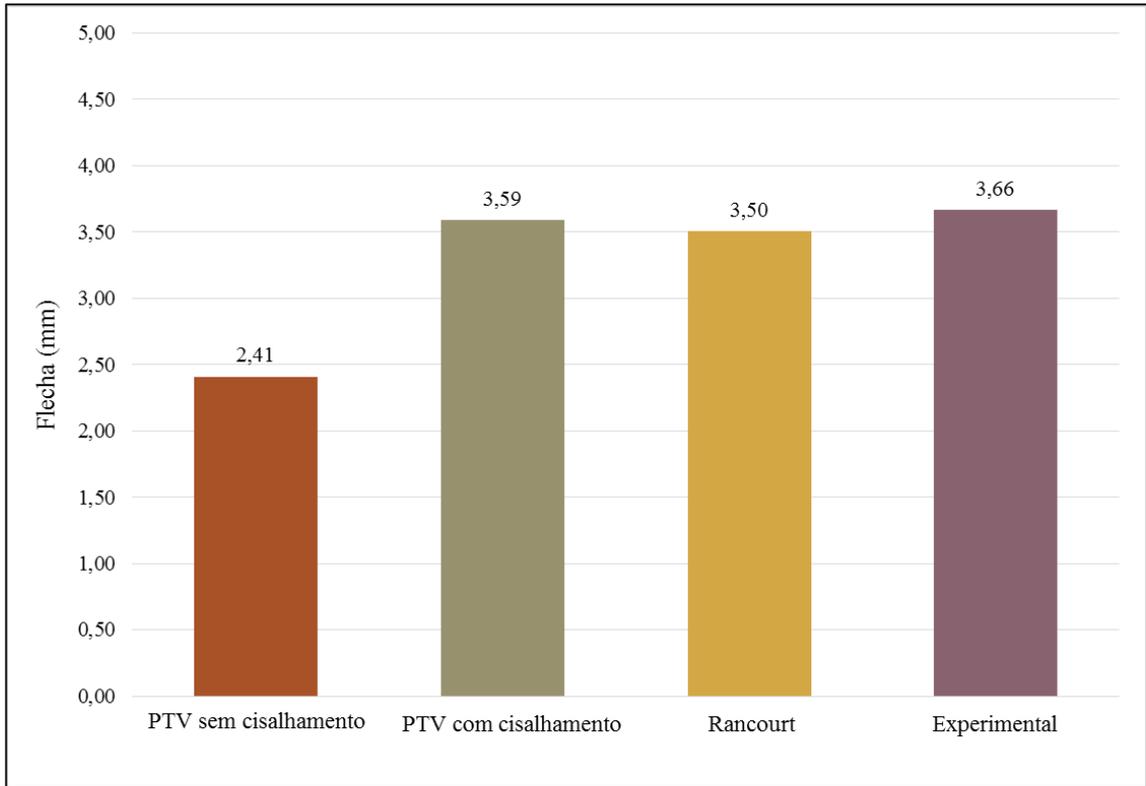


Gráfico 3 – Resultados obtidos para viga 3

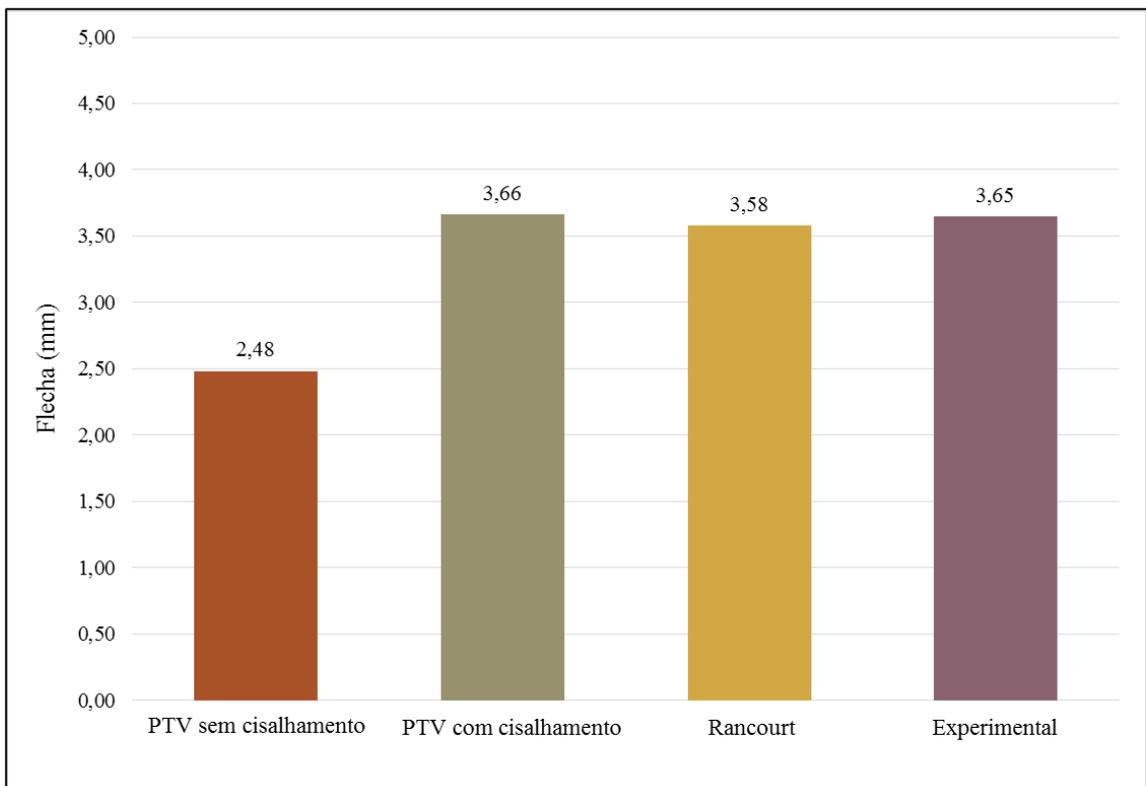


Gráfico 4 – Resultados obtidos para viga 4

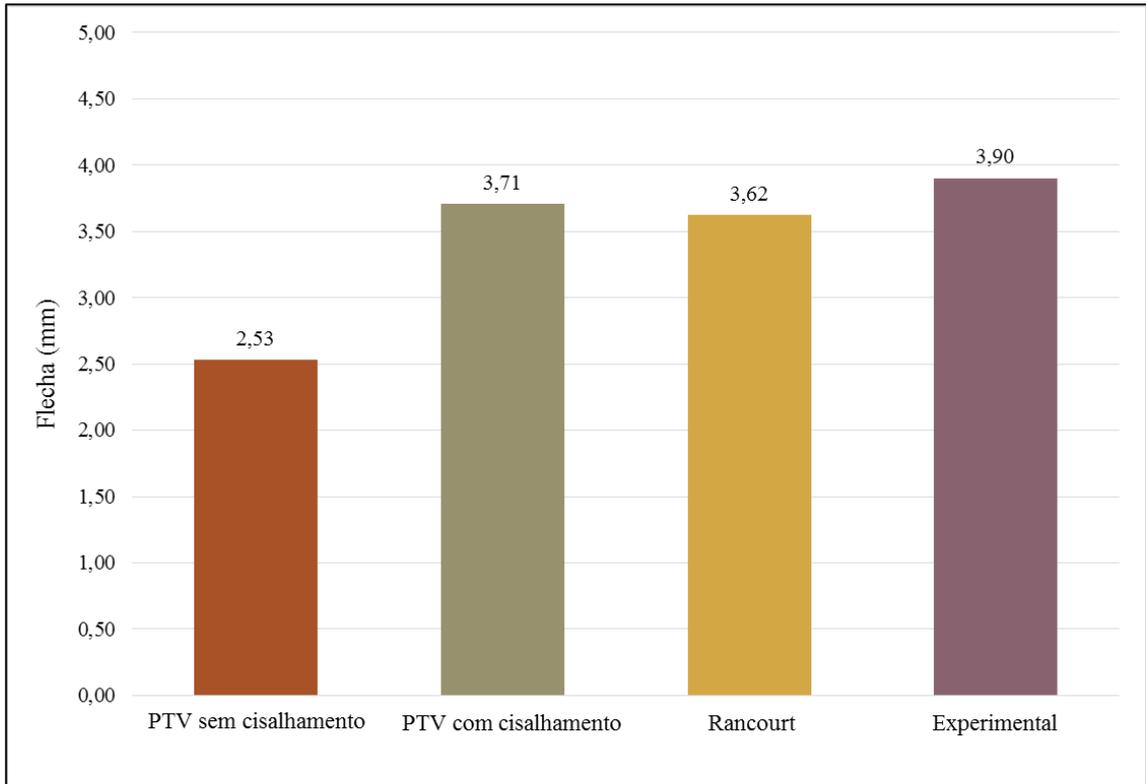


Gráfico 5 – Resultados obtidos para viga 5

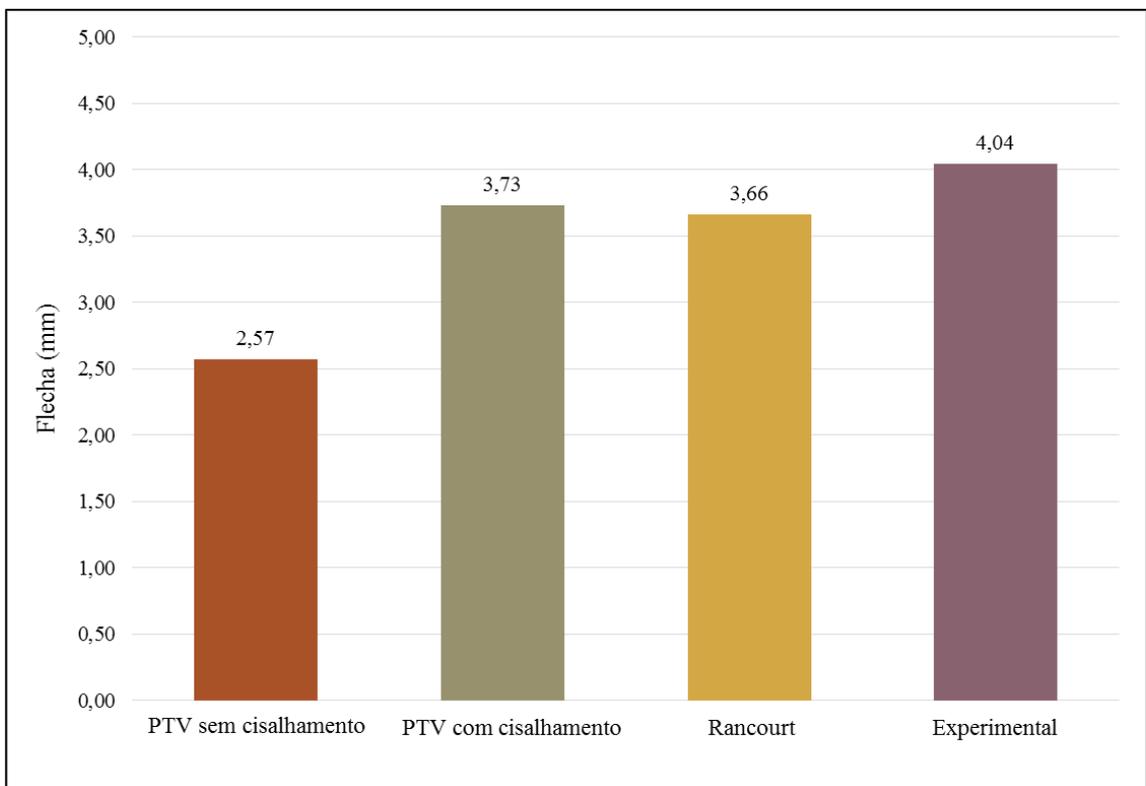


Gráfico 6 – Resultados obtidos para viga 6

6.6 DIFERENÇA ENTRE MODELOS DE CÁLCULO APRESENTADOS

Comparando os resultados experimentais com cada um dos métodos de cálculo já apresentados, os valores obtidos para o deslocamento e a diferença entre os modelos, podem ser analisados segundo a Tabela 13. A diferença foi calculada de acordo com a Equação 36.

$$\text{Diferença (\%)} = \frac{\text{Flecha experimental} - \text{Flecha comparada}}{\text{Flecha experimental}} \cdot 100 \quad (36)$$

Tabela 13 – Diferenças entre resultado experimental e modelos analíticos

Viga	PTV sem cisalhamento (%)	PTV considerando cisalhamento (%)	Rancourt (%)
1	36,11	0,13	2,69
2	34,07	1,30	3,69
3	34,25	2,01	4,36
4	31,88	-0,49	1,84
5	35,14	4,91	7,06
6	36,44	7,65	9,35

A maior diferença entre os valores de flecha sucedeu na viga número 6 com 9,35%. Nas vigas de 1 a 4 são observadas diferenças de no máximo 4,36%. Além disso, é possível perceber que o resultado experimental foi compatível com os modelos analíticos propostos, apesar de o PTV sem cisalhamento resultar numa diferença de 31,88% a 36,44%. Dessa maneira, evidencia-se a importância de considerar o efeito de cisalhamento no cálculo de flecha nas vigas “I-Joists”, as quais tinham fator L/H pequeno, igual a 9,5, como mostra a Tabela 13.

6.7 RIGIDEZ DAS VIGAS “I-JOISTS”

Além disso, determinou-se a rigidez das vigas utilizando a flecha obtida experimentalmente, bem como o modelo analítico proposto pelo Princípio dos Trabalhos Virtuais em que se considera os efeitos de deformação gerados pelo momento fletor e esforço cortante. A APA (2012) expõe o valor de referência para rigidez à flexão de $6,29E+11$ N.mm². Dessa maneira, é possível comparar os resultados obtidos com o proposto pela APA, evidenciado na Tabela 14, através da Equação 37.

$$\text{Diferença (\%)} = \frac{\text{Rigidez experimental} - \text{Rigidez APA}}{\text{Rigidez experimental}} \cdot 100 \quad (37)$$

Tabela 14 – Rigidez das vigas “I-Joists”

Viga	Rigidez experimental (N.mm ²)	Rigidez APA (N.mm ²)	Diferença (%)
1	8,07E+11		22,23
2	6,99E+11		10,18
3	6,82E+11		7,96
4	6,87E+11	6,28E+11	8,61
5	6,23E+11		-0,88
6	5,89E+11		-6,69

7 CONCLUSÃO

Diferentemente de países em que as vigas “I-Joists” são comumente utilizadas, principalmente no sistema construtivo *Wood Frame*, o Brasil não possui normativas ou diretrizes as quais apresentem, de maneira plena e efetiva, o dimensionamento e execução desses elementos estruturais. Dessa maneira, a avaliação da rigidez dessas vigas, através de ensaios laboratoriais e comparação com os modelos analíticos existentes é um importante passo para início de maior divulgação do método construtivo, bem como inicialização de uma norma específica para o mesmo.

Conforme apresentado, as vigas “I-Joists” possuem comportamento estrutural fortemente influenciado por deformações de cisalhamento na alma, no caso das vigas em estudo, em torno de 34,65%, para relação L/H igual a 9,5. Dessa maneira, através de estudo via metodologia analítica e experimental, observa-se a necessidade de considerar a parcela proveniente do esforço cortante nos modelos de cálculo para vigas com perfil em “I”.

Ademais, verificou-se que o modelo analítico via Princípio dos Trabalhos Virtuais proporcionou resultados de deslocamento mais próximos daqueles obtidos experimentalmente, evidenciando maior precisão do modelo de cálculo, em comparação com o de Rancourt. Contudo, o modelo de Rancourt proposto pela APA, apesar de ser caracterizado por metodologia de cálculo simplificada, concede resultados satisfatórios.

Nesse sentido, mais trabalhos sobre o assunto devem ser executados, principalmente em relação a influência do cisalhamento em vigas com aberturas na alma, assim como diferentes séries PRI e fator L/H. Além do mais, instiga-se a pesquisa sobre critérios para dimensionamento dos estados limites últimos e modos de falha das “I-Joists”, visto que o presente estudo examinou apenas o regime elástico linear do elemento estrutural.

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. **Allowable Stress Design: Manual for engineered wood construction**. American Forest & Paper Association, p. 4, 1999. Disponível em: <http://i-joist.org/pdf/Asd_ij.pdf>. Acesso em: 24 Jun. 2016.

AMERICAN WOOD COUNCIL. **Engineered Wood Products Primer Awareness Guide**. Washington: American Forest & Paper Association, 2006. 6 p. Disponível em: <<http://www.woodaware.info/PDFs/EWPPrimer.pdf>>. Acesso em: 17 Jun. 2016.

AMERICAN WOOD COUNCIL. **Wood I-Joist Awareness Guide**. Washington: American Forest & Paper Association, 2006. 6 p.

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

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

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

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

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: 18 Jun. 2016.

ENGINEERED WOOD ASSOCIATION. **Engineered Wood Construction Guide**. Form N° E30V. 2011.

ENGINEERED WOOD ASSOCIATION. **Engineered Wood Construction Guide**. Form N° E30V. 2011. Disponível em: <http://www.apawood.org/pdfs/download_pdf.cfm?PDFFilename=managed/E30.pdf>. Acesso em: 18 Jun. 2016.

ENGINEERED WOOD ASSOCIATION. **Performance Rated I-Joists**. Form N° EWS X720D. 2012. Disponível em: <[http://www.apawood.org/pdfs/download_pdf.cfm?PDFFilename= managed/X720.pdf](http://www.apawood.org/pdfs/download_pdf.cfm?PDFFilename=managed/X720.pdf) >. Acesso em: 30 Jul. 2016.

ENGINEERED WOOD ASSOCIATION. **Performance Rated I-Joists**. Form N° EWS Z725D. 2012. Disponível em: <[http://www.apawood.org/pdfs/download_pdf.cfm?PDFFilename= managed/Z725.pdf](http://www.apawood.org/pdfs/download_pdf.cfm?PDFFilename=managed/Z725.pdf) >. Acesso em: 30 Jul. 2016.

ENGINEERED WOOD ASSOCIATION. **Performance Rated I-Joists. Form N° PR-L310C**. 2016. Disponível em: <<https://www.apawood.org/publication-search?q=l310c> >. Acesso em: 15 agosto, 2016.

FISETTE, 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: 25 Jul. 2016.

FISETTE, Paul. **The evolution of engineered wood I-joists**, 2000. Disponível em: <http://www.umass.edu/bmatwt/publications/articles/i_joyist.html>. Acesso em: 23 Jun. 2016.

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.

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.

GREEN, D. W. e HERNANDEZ, R. Standards for Structural Wood Products and Their Use in the United States. **Wood design focus** v.9, n.3, p.10, 1998. Disponível em: <[http://civil.unm.edu/classes /content/CE130L/Week%2013/green98a.pdf](http://civil.unm.edu/classes/content/CE130L/Week%2013/green98a.pdf)>. Acesso em: 23 Jun. 2016.

GUIMARÃES, H. W. **Estudo de Modelos Analíticos e Numéricos para o Cálculo de Flecha em Vigas I-Joist**. 2016. 83 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2016.

HIBBELER, Russell Charles. **Estática, mecânica para engenharia**. São Paulo: Pearson, 2006.

HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos materiais**. São Paulo: Pearson, 2009.

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.

LIMA, F. M. **Desempenho Estrutural de Vigas "I-Joists" - Padronização e Subsídios para o Pré Dimensionamento**. 2014. 84f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2014.

LOBÃO, Moisés Silveira, et al. Avaliação experimental de vigas com emendas de topo coladas com cobrejuntas de madeira de eucalipto. **Revista Árvore**, v.36, n.2, 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-67622012000200017>. Acesso em: 18 Jun. 2016.

LP BRASIL. **Placas estruturais para construção CES**. Catálogo técnico. Curitiba, 2016. 8p.

MARTHA, Luis Fernando. **Análise de estruturas: conceitos e métodos básicos**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.

Painel de OSB oferece maior resistência para uso em estruturas. **REMADE - Revista da Madeira**, n. 18, out. 2007. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1157&subject=M%20FAltiplos%20Usos&title=Painel%20de%20OSB%20oferece%20maior%20resist%20EAnca%20para%20uso%20em%20estruturas>. Acesso em: 27 Jun. 2016.

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.

PIZZINI, Paulo R. Determinação experimental das constantes elásticas da madeira de eucalyptos grandis e chapas de osb. 2017. 93f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2017.

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.

RIBEIRO, Wilson. F. **Análise de diferentes resinas e geometrias de ligações para vigas de madeira compostas em perfil I**. 2012. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2012.

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.

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

SILVA, C. C. e **Análise teórica e experimental de vigas de madeira de seção transversal “I” para uso em fôrmas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-14072010-091217/publico/2010ME_CatiaCostaeSilva.pdf>. Acesso em: 18 Jun. 2016.

SORIANO, H. L. **Análise de Estruturas Método das Forças e Método dos Deslocamentos**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2006.

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

STRUCTURAL BOARD ASSOCIATION. **OSB in wood frame construction**. 2005. 34 f.

TIMOSHENKO, Stephen E.; GERE, James E. **Mêcanica dos Sólidos: Volume II**. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora, 1984.

USDA, United States Department of Agriculture. **Wood handbook – Wood as an engineering material**. Madison: Forest Products Laboratory, 2010. 508 f.

WIJMA, Wood I-Joist Manufacturers Association. **Why Use Prefabricated Wood I-joists?**, 2001. Disponível em: <<http://i-joist.org/benefits>>. Acesso em: 24 Jun. 2016.

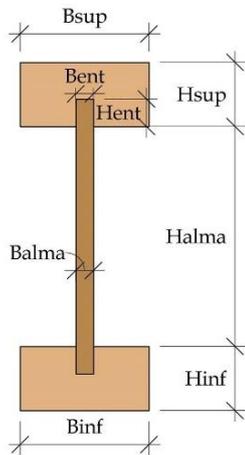
WILLIAMSON, P. E. **APA engineered Wood Handbook**. 1. ed. New York: McGraw-Hill, 2002.

YOUNG, Warren C; BUDYNAS, Richard G. **Roark's Formulas for Stress and Strain**. New York: McGraw-Hill, 2002.

APÊNDICE - A

FICHA TÉCNICA - VIGA I

DADOS GERAIS



Componentes	Base (B) (mm)	Altura (H) (mm)
Mesa Superior	63,10	36,10
Alma	9,50	172,90
Mesa Inferior	62,70	35,50
Entalhe	9,50	15,50

EI EXPERIMENTAL DAS MESAS

Mesa Sup.	CG (mm)	Área (mm ²)	Inércia (I) (mm ⁴)	L vão (mm)	Flecha (mm)	Força (N)	Mod. Elast. (E) (MPa)	E médio (Mpa)	EI _{(ef)exp} (N.mm ²)
Sulco para cima	18,76	2130,66	2,28E+5	2553	3,6	39,92	16204,29	16136,46	3,67E+9
Sulco para baixo	17,34				7,39	80,27			
					3,76	39,92	16068,62		
					7,58	80,27			

Mesa Inf.	CG (mm)	Área (mm ²)	Inércia (I) (mm ⁴)	L vão (mm)	Flecha (mm)	Força (N)	Mod. Elast. (E) (MPa)	E médio (Mpa)	EI _{(ef)exp} (N.mm ²)
Sulco para cima	18,46	2078,60	2,15E+5	2532	3,11	39,92	17623,99	17479,53	3,76E+9
Sulco para baixo	17,04				6,71	80,27			
					3,34	39,92	17335,07		
					7,00	80,27			

EI EXPERIMENTAL VIGA

$$EI_{(ef)exp} = \frac{23PL^3}{1296 \cdot \left(\delta - \frac{f_s PL}{6GA} \right)} = 8,07E+11 \text{ N.mm}^2$$

APÊNDICE - A

FICHA TÉCNICA - VIGA I

SEÇÃO TRANSFORMADA

Peças	E (N/m ²)	Ec (N/m ²)	Razão modular (n)	CG (mm)	Área (mm ²)	CGtot. (mm)	I (mm ⁴)	I ef. (mm ⁴)	EI _(ef) (N.mm ²)
Mesa Sup	16136,46		1,61	227,16	3438,13		4,03E+7		
Alma	3246,26	10000	0,32	121,95	628,82	119,43	2,18E+6	8,09E+7	8,09E+11
Mesa Inf	17479,53		1,75	17,04	3633,29		3,85E+7		

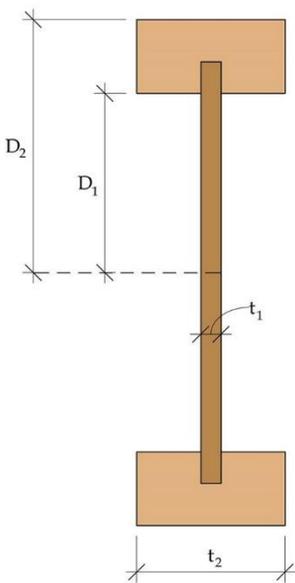
FLECHA EXPERIMENTAL

Força (N)	Relógio extrem, esquerda (RE) (mm)	Relógio extrem. Direita (RD) (mm)	Relógio Central (RC) (mm)
1961,33	0,29	0,31	1,47
3922,66	0,38	0,40	2,19
5883,99	0,48	0,50	3,19
7845,32	0,58	0,60	4,18
9806,65	0,66	0,69	5,12

$$\delta = \Delta\delta RC - \frac{\Delta\delta RD + \Delta\delta RE}{2}$$

$$\delta = 3,28 \text{ mm}$$

MODELOS ANALÍTICOS PARA DETERMINAÇÃO DE DESLOCAMENTOS



The diagram shows a cross-section of a beam with a central web of thickness t_1 and two flanges of thickness t_2 . The total height is D_2 and the height of the web is D_1 .

D1 (mm)	D2 (mm)	t1 (mm)	t2 (mm)	r ² (mm ²)	f _s
86,45	122,25	9,5	62,9	8734,65	2,72

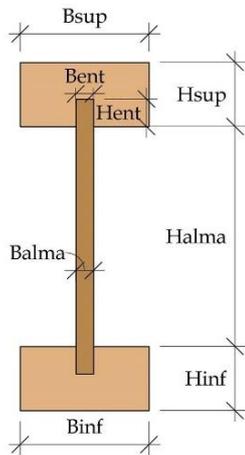
Vão (mm)	Força (N)	Área real (mm ²)	G alma (MPa)	K (N)
2300	7845,32	6146,31	1131,05	21974000

Flecha (mm)		
PTV sem cisalhamento	PTV com cisalhamento	Rancourt
2,09	3,27	3,19

APÊNDICE - B

FICHA TÉCNICA - VIGA II

DADOS GERAIS



Componentes	Base (B) (mm)	Altura (H) (mm)
Mesa Superior	63,00	35,80
Alma	9,50	173,35
Mesa Inferior	62,20	35,50
Entalhe	9,50	15,50

EI EXPERIMENTAL DAS MESAS

Mesa Sup.	CG (mm)	Área (mm ²)	Inércia (I) (mm ⁴)	L vão (mm)	Flecha (mm)	Força (N)	Mod. Elast. (E) (MPa)	E médio (Mpa)	EI _{(ef)exp} (N.mm ²)
Sulco para cima	18,61				4,1	39,92	14757,03		
		2108,15	2,22E+5	2536	8,29	80,27		14713,27	3,26E+9
Sulco para baixo	17,19				5,07	39,92	14669,51		
					9,28	80,27			

Mesa Inf.	CG (mm)	Área (mm ²)	Inércia (I) (mm ⁴)	L vão (mm)	Flecha (mm)	Força (N)	Mod. Elast. (E) (MPa)	E médio (Mpa)	EI _{(ef)exp} (N.mm ²)
Sulco para cima	18,46				3,09	39,92	14968,23		
		2060,85	2,13E+5	2300	6,30	80,27		14956,57	3,19E+9
Sulco para baixo	17,04				3,19	39,92	14944,92		
					6,40	80,27			

EI EXPERIMENTAL VIGA

$$EI_{(ef)exp} = \frac{23PL^3}{1296 \cdot \left(\delta - \frac{f_s PL}{6GA} \right)} = 6,99E+11 \text{ N.mm}^2$$

APÊNDICE - B

FICHA TÉCNICA - VIGA II

SEÇÃO TRANSFORMADA

Peças	E (N/m ²)	Ec (N/m ²)	Razão modular (n)	CG (mm)	Área (mm ²)	CGtot. (mm)	I (mm ⁴)	I ef. (mm ⁴)	EI _(ef) (N.mm ²)
Mesa Sup	14713,27		1,47	227,46	3101,78		3,45E+7		
Alma	3246,26	10000	0,32	122,18	630,20	122,54	2,19E+6	8,09E+7	7,13E+11
Mesa Inf	14956,57		1,50	17,04	3082,33		3,46E+7		

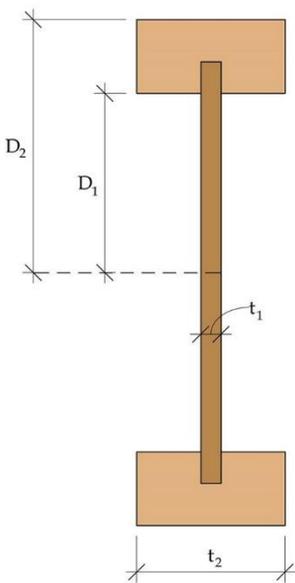
FLECHA EXPERIMENTAL

Força (N)	Relógio extrem, esquerda (RE) (mm)	Relógio extrem. Direita (RD) (mm)	Relógio Central (RC) (mm)
1961,33	0,18	0,14	1,04
3922,66	0,29	0,26	2,04
5883,99	0,38	0,35	3,04
7845,32	0,46	0,43	4,03
9806,65	0,52	0,51	5,00

$$\delta = \Delta\delta RC - \frac{\Delta\delta RD + \Delta\delta RE}{2}$$

$$\delta = 3,60 \text{ mm}$$

MODELOS ANALÍTICOS PARA DETERMINAÇÃO DE DESLOCAMENTOS



The diagram shows a cross-section of a beam with a central web and two flanges. The top flange has a width of t_1 and a thickness of D_1 . The bottom flange has a width of t_2 and a thickness of D_2 . The web has a thickness of t_2 . The total width of the beam is $D_1 + t_2 + D_2$.

D1 (mm)	D2 (mm)	t1 (mm)	t2 (mm)	r ² (mm ²)	f _s
86,68	122,33	9,5	62,6	8728,99	2,71

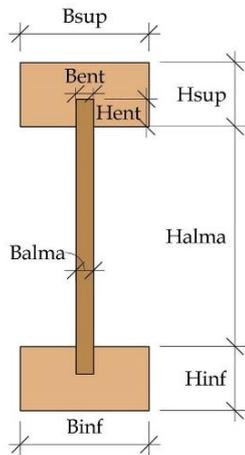
Vão (mm)	Força (N)	Área real (mm ²)	G alma (MPa)	K (N)
2300	7845,32	6110,33	1131,05	21974000

Flecha (mm)		
PTV sem cisalhamento	PTV com cisalhamento	Rancourt
2,38	3,56	3,47

APÊNDICE - C

FICHA TÉCNICA - VIGA III

DADOS GERAIS



Componentes	Base (B) (mm)	Altura (H) (mm)
Mesa Superior	62,40	35,50
Alma	9,50	173,05
Mesa Inferior	62,40	36,00
Entalhe	9,50	15,50

EI EXPERIMENTAL DAS MESAS

Mesa Sup.	CG (mm)	Área (mm ²)	Inércia (I) (mm ⁴)	L vão (mm)	Flecha (mm)	Força (N)	Mod. Elast. (E) (MPa)	E médio (Mpa)	EI _{(ef)exp} (N.mm ²)
Sulco para cima	18,46	21867,95	2,14E+5	2200	2,69	39,92	15001,68	14666,59	3,14E+9
Sulco para baixo	17,04				5,47	80,27			
					3,87	39,92	14331,50		
					6,78	80,27			

Mesa Inf.	CG (mm)	Área (mm ²)	Inércia (I) (mm ⁴)	L vão (mm)	Flecha (mm)	Força (N)	Mod. Elast. (E) (MPa)	E médio (Mpa)	EI _{(ef)exp} (N.mm ²)
Sulco para cima	18,72	2099,15	2,23E+5	2280	2,64	39,92	14591,93	14654,45	3,27E+9
Sulco para baixo	17,28				5,70	80,27			
					2,88	39,92	14716,98		
					5,91	80,27			

EI EXPERIMENTAL VIGA

$$EI_{(ef)exp} = \frac{23PL^3}{1296 \cdot \left(\delta - \frac{f_s PL}{6GA} \right)} = 6,82E+11 \text{ N.mm}^2$$

APÊNDICE - C

FICHA TÉCNICA - VIGA III

SEÇÃO TRANSFORMADA

Peças	E (N/m ²)	Ec (N/m ²)	Razão modular (n)	CG (mm)	Área (mm ²)	CGtot. (mm)	I (mm ⁴)	I ef. (mm ⁴)	EI _(ef) (N.mm ²)
Mesa Sup	14666,59		1,47	227,51	3032,98		3,42E+7		
Alma	3246,26	10000	0,32	122,53	629,28	121,73	2,18E+6	7,03E+7	7,0,3E+11
Mesa Inf	14654,45		1,47	17,28	3076,19		3,39E+7		

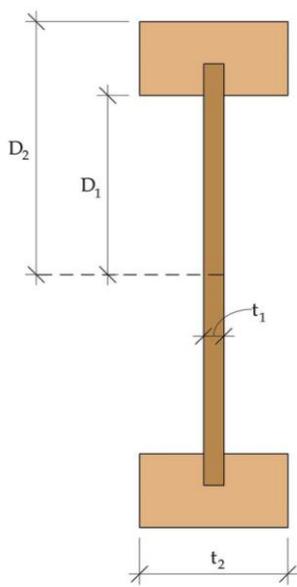
FLECHA EXPERIMENTAL

Força (N)	Relógio extrem, esquerda (RE) (mm)	Relógio extrem. Direita (RD) (mm)	Relógio Central (RC) (mm)
1961,33	0,20	0,61	1,30
3922,66	0,27	0,93	2,42
5883,99	0,33	1,05	3,43
7845,32	0,39	1,13	4,41
9806,65	0,44	1,19	5,38

$$\delta = \Delta\delta RC - \frac{\Delta\delta RD + \Delta\delta RE}{2}$$

$$\delta = 3,66 \text{ mm}$$

MODELOS ANALÍTICOS PARA DETERMINAÇÃO DE DESLOCAMENTOS



D1 (mm)	D2 (mm)	t1 (mm)	t2 (mm)	r ² (mm ²)	f _s
86,53	122,28	9,5	62,4	8714,18	2,71

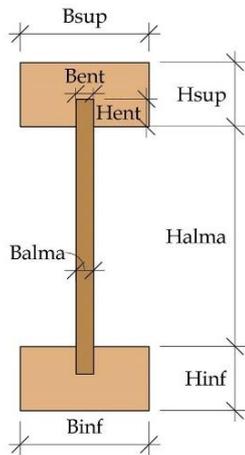
Vão (mm)	Força (N)	Área real (mm ²)	G alma (MPa)	K (N)
2300	7845,32	6105,58	1131,05	21974000

Flecha (mm)		
PTV sem cisalhamento	PTV com cisalhamento	Rancourt
2,41	3,59	3,50

APÊNDICE - D

FICHA TÉCNICA - VIGA IV

DADOS GERAIS



Componentes	Base (B) (mm)	Altura (H) (mm)
Mesa Superior	63,20	35,50
Alma	9,50	172,30
Mesa Inferior	62,9	36,40
Entalhe	9,50	15,50

EI EXPERIMENTAL DAS MESAS

Mesa Sup.	CG (mm)	Área (mm ²)	Inércia (I) (mm ⁴)	L vão (mm)	Flecha (mm)	Força (N)	Mod. Elast. (E) (MPa)	E médio (Mpa)	EI _{(ef)exp} (N.mm ²)
Sulco para cima	18,45				3,13	39,92	14480,02		
		2096,35	2,20E+5	2282	6,31	80,27		14339,37	3,11E+9
Sulco para baixo	17,05				3,18	39,92	14198,72		
					6,43	80,27			

Mesa Inf.	CG (mm)	Área (mm ²)	Inércia (I) (mm ⁴)	L vão (mm)	Flecha (mm)	Força (N)	Mod. Elast. (E) (MPa)	E médio (Mpa)	EI _{(ef)exp} (N.mm ²)
Sulco para cima	18,92				2,75	39,92	13856,09		
		2142,31	2,33E+5	2245	5,70	80,27		13879,65	3,23E+9
Sulco para baixo	17,48				2,90	39,92	13903,21		
					5,84	80,27			

EI EXPERIMENTAL VIGA

$$EI_{(ef)exp} = \frac{23PL^3}{1296 \cdot \left(\delta - \frac{f_s PL}{6GA} \right)} = 6,87E+11 \text{ N.mm}^2$$

APÊNDICE - D

FICHA TÉCNICA - VIGA IV

SEÇÃO TRANSFORMADA

Peças	E (N/m ²)	E _c (N/m ²)	Razão modular (n)	CG (mm)	Área (mm ²)	CGtot. (mm)	I (mm ⁴)	I ef. (mm ⁴)	EI _(ef) (N.mm ²)
Mesa Sup	14339,37		1,43	227,15	3006,03		3,28E+7		
Alma	3246,26	10000	0,32	122,55	626,97	123,26	2,16E+6	6,82E+7	6,82E+11
Mesa Inf	13879,65		1,39	17,48	2948,05		3,33E+7		

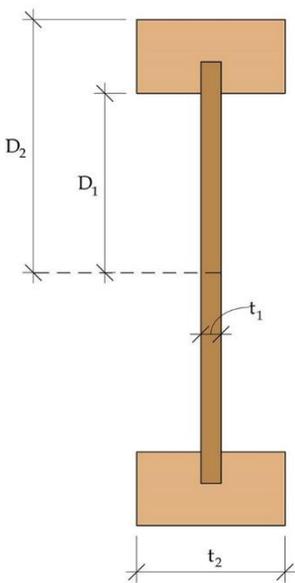
FLECHA EXPERIMENTAL

Força (N)	Relógio extrem, esquerda (RE) (mm)	Relógio extrem. Direita (RD) (mm)	Relógio Central (RC) (mm)
1961,33	0,19	0,45	1,42
3922,66	0,30	0,63	2,49
5883,99	0,38	0,77	3,51
7845,32	0,46	0,94	4,52
9806,65	0,53	1,02	5,52

$$\delta = \Delta\delta RC - \frac{\Delta\delta RD + \Delta\delta RE}{2}$$

$$\delta = 3,65 \text{ mm}$$

MODELOS ANALÍTICOS PARA DETERMINAÇÃO DE DESLOCAMENTOS



The diagram shows a cross-section of a beam with a central web and two flanges. The top flange has a width of D1 and a thickness of t1. The bottom flange has a width of t2. The total height of the section is D2. The web has a thickness of t1.

D1 (mm)	D2 (mm)	t1 (mm)	t2 (mm)	r ² (mm ²)	f _s
86,15	122,10	9,5	63,05	8703,44	2,74

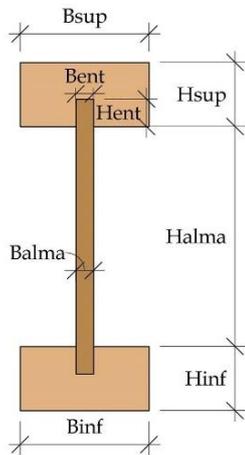
Vão (mm)	Força (N)	Área real (mm ²)	G alma (MPa)	K (N)
2300	7845,32	6170,01	1131,05	21974000

Flecha (mm)		
PTV sem cisalhamento	PTV com cisalhamento	Rancourt
2,48	3,66	3,58

APÊNDICE - E

FICHA TÉCNICA - VIGA V

DADOS GERAIS



Componentes	Base (B) (mm)	Altura (H) (mm)
Mesa Superior	62,80	35,90
Alma	9,50	172,45
Mesa Inferior	62,80	36,00
Entalhe	9,50	15,50

EI EXPERIMENTAL DAS MESAS

Mesa Sup.	CG (mm)	Área (mm ²)	Inércia (I) (mm ⁴)	L vão (mm)	Flecha (mm)	Força (N)	Mod. Elast. (E) (MPa)	E médio (Mpa)	EI _{(ef)exp} (N.mm ²)
Sulco para cima	18,66	2107,27	2,22E+5	2535	4,15	39,92	14246,94	14230,42	3,17E+9
Sulco para baixo	17,24				8,45	80,27			
					4,20	39,92	14213,89		
					8,51	80,27			

Mesa Inf.	CG (mm)	Área (mm ²)	Inércia (I) (mm ⁴)	L vão (mm)	Flecha (mm)	Força (N)	Mod. Elast. (E) (MPa)	E médio (Mpa)	EI _{(ef)exp} (N.mm ²)
Sulco para cima	18,71	2113,55	2,24E+5	2303	3,30	39,92	13440,07	13420,36	3,02E+9
Sulco para baixo	17,29				6,70	80,27			
					3,31	39,92	13400,65		
					6,72	80,27			

EI EXPERIMENTAL VIGA

$$EI_{(ef)exp} = \frac{23PL^3}{1296 \cdot \left(\delta - \frac{f_s PL}{6GA} \right)} = 6,23E+11 \text{ N.mm}^2$$

APÊNDICE - E

FICHA TÉCNICA - VIGA V

SEÇÃO TRANSFORMADA

Peças	E (N/m ²)	Ec (N/m ²)	Razão modular (n)	CG (mm)	Área (mm ²)	CGtot. (mm)	I (mm ⁴)	I ef. (mm ⁴)	EI _(ef) (N.mm ²)
Mesa Sup	14230,42		1,42	227,11	2998,73		3,17E+7		
Alma	3246,26	10000	0,32	122,23	626,43	124,84	2,17E+6	6,70E+7	6,70E+11
Mesa Inf	13420,36		1,34	17,29	2836,46		3,31E+7		

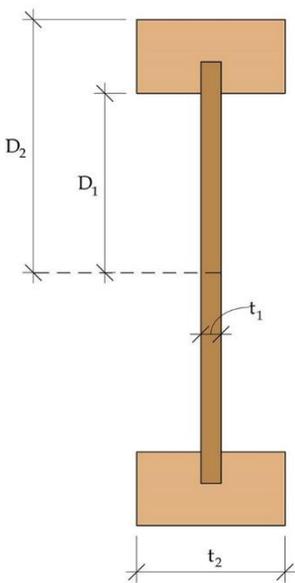
FLECHA EXPERIMENTAL

Força (N)	Relógio extrem, esquerda (RE) (mm)	Relógio extrem. Direita (RD) (mm)	Relógio Central (RC) (mm)
1961,33	0,12	0,23	1,16
3922,66	0,23	0,36	2,22
5883,99	0,33	0,47	3,30
7845,32	0,44	0,57	4,41
9806,65	0,53	0,67	5,48

$$\delta = \Delta\delta RC - \frac{\Delta\delta RD + \Delta\delta RE}{2}$$

$$\delta = 3,90 \text{ mm}$$

MODELOS ANALÍTICOS PARA DETERMINAÇÃO DE DESLOCAMENTOS



The diagram shows a cross-section of a beam with a central web and two flanges. The top flange has a width of D_1 and a thickness of t_1 . The web has a thickness of t_2 . The total height of the section is D_2 . The bottom flange is also shown with width D_1 and thickness t_1 .

D1 (mm)	D2 (mm)	t1 (mm)	t2 (mm)	r ² (mm ²)	f _s
86,23	122,18	9,5	62,8	8713,29	2,73

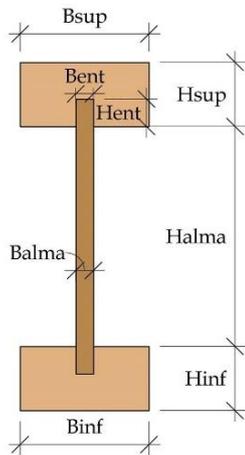
Vão (mm)	Força (N)	Área real (mm ²)	G alma (MPa)	K (N)
2300	7845,32	6153,60	1131,05	21974000

Flecha (mm)		
PTV sem cisalhamento	PTV com cisalhamento	Rancourt
2,53	3,71	3,62

APÊNDICE - F

FICHA TÉCNICA - VIGA VI

DADOS GERAIS



Componentes	Base (B) (mm)	Altura (H) (mm)
Mesa Superior	63,00	36,10
Alma	9,50	177,40
Mesa Inferior	62,9	35,50
Entalhe	9,50	15,50

EI EXPERIMENTAL DAS MESAS

Mesa Sup.	CG (mm)	Área (mm ²)	Inércia (I) (mm ⁴)	L vão (mm)	Flecha (mm)	Força (N)	Mod. Elast. (E) (MPa)	E médio (Mpa)	EI _{(ef)exp} (N.mm ²)
Sulco para cima	18,76	2127,05	2,27E+5	2246	3,22	39,92	12849,33	12943,31	2,94E+9
					6,48	80,27			
Sulco para baixo	17,34				3,22	39,92	13037,29		
					6,43	80,27			

Mesa Inf.	CG (mm)	Área (mm ²)	Inércia (I) (mm ⁴)	L vão (mm)	Flecha (mm)	Força (N)	Mod. Elast. (E) (MPa)	E médio (Mpa)	EI _{(ef)exp} (N.mm ²)
Sulco para cima	18,46	2085,70	2,16E+5	2302	3,60	39,92	13156,61	13048,77	2,82E+9
					7,20	80,27			
Sulco para baixo	17,04				3,65	39,92	12940,93		
					7,31	80,27			

EI EXPERIMENTAL VIGA

$$EI_{(ef)exp} = \frac{23PL^3}{1296 \cdot \left(\delta - \frac{f_s PL}{6GA} \right)} = 5,89E+11 \text{ N.mm}^2$$

APÊNDICE - F

FICHA TÉCNICA - VIGA VI

SEÇÃO TRANSFORMADA

Peças	E (N/m ²)	Ec (N/m ²)	Razão modular (n)	CG (mm)	Área (mm ²)	CGtot. (mm)	I (mm ⁴)	I ef. (mm ⁴)	EI _(ef) (N.mm ²)
Mesa Sup	12943,31		1,29	231,66	2753,11		3,17E+7		
Alma	3246,26	10000	0,32	124,20	642,69	124,89	2,32E+6	6,59E+7	6,59E+11
Mesa Inf	13048,77		1,30	17,04	2721,58		3,39E+7		

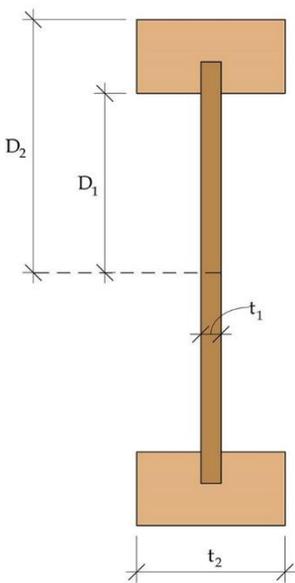
FLECHA EXPERIMENTAL

Força (N)	Relógio extrem, esquerda (RE) (mm)	Relógio extrem. Direita (RD) (mm)	Relógio Central (RC) (mm)
1961,33	0,08	0,33	0,99
3922,66	0,18	0,46	2,26
5883,99	0,27	0,54	3,32
7845,32	0,35	0,62	4,42
9806,65	0,42	0,70	5,39

$$\delta = \Delta\delta RC - \frac{\Delta\delta RD + \Delta\delta RE}{2}$$

$$\delta = 4,04 \text{ mm}$$

MODELOS ANALÍTICOS PARA DETERMINAÇÃO DE DESLOCAMENTOS



The diagram shows a cross-section of a beam with a central web and two flanges. The top flange has a width of D1 and a thickness of t1. The bottom flange has a width of t2. The total height of the section is D2. The web has a thickness of t1.

D1 (mm)	D2 (mm)	t1 (mm)	t2 (mm)	r ² (mm ²)	f _s
88,70	124,50	9,5	62,95	9062,03	2,71

Vão (mm)	Força (N)	Área real (mm ²)	G alma (MPa)	K (N)
2300	7845,32	6192,55	1131,05	21974000

Flecha (mm)		
PTV sem cisalhamento	PTV com cisalhamento	Rancourt
2,57	3,73	3,66