

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

WILSON FABIANO RIBEIRO

**ANÁLISE DE DIFERENTES RESINAS E GEOMETRIAS DE
LIGAÇÕES PARA VIGAS DE MADEIRA COMPOSTAS EM PERFIL I**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO
2012

WILSON FABIANO RIBEIRO

**ANÁLISE DE DIFERENTES RESINAS E GEOMETRIAS DE
LIGAÇÕES PARA VIGAS DE MADEIRA COMPOSTAS EM PERFIL I**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Civil da Coordenação de Engenharia Civil – COECI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção de título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes

CAMPO MOURÃO

2012



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Campo Mourão
Coordenação de Engenharia Civil

TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso Nº 2

**ANÁLISE DE DIFERENTES RESINAS E GEOMETRIAS DE LIGAÇÕES PARA VIGAS DE
MADEIRA COMPOSTAS EM PERFIL I**

por

Wilson Fabiano Ribeiro

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 19h00 do dia 28 de maio de 2012 como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO.

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

Prof. Dr. Ronaldo Rigobelo
(UTFPR)

Prof. Dr. Marcelo Rodrigo Carreira
(UTFPR)

Prof. Msc. Valdomiro Lubachevski Kurta
Responsável pelo TCC

Profª Drª Fabiana Goia Rosa de Oliveira
Coordenadora do Curso de Engenharia Civil

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

Dedicatória:

Aos meus pais Airton e Beth,

Aos meus irmãos e eternos amigos Cesar e Giovani,

Aos meus familiares e amigos presentes em minha formação.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que generosamente me concedeu saúde, persistência, disposição, força, sabedoria e todos os dons indispensáveis para a realização desta magnífica experiência e formação. Grandes foram as lutas, maiores as vitórias, e sempre estiveste ao meu lado.

Ao meu orientador Professor Dr. Jorge Luis Nunes de Góes, em especial, pela preciosa orientação e amizade. Os teus conhecimentos e experiência foram, para mim, muito mais do que inspiração. Obrigado pela sua extraordinária dedicação e incessante estímulo à pesquisa.

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

Aos meus irmãos Cesar e Giovani pela imensurável amizade, convivência, conselhos, por sempre estarem juntos e dispostos a ajudar, pelos inesquecíveis momentos em nossa república e toda nossa vida.

Agradeço a Ana Paula Galo, por todo incentivo, compreensão e por estar presente em minha vida neste momento. O tempo em que estivemos juntos foi indispensável para minha felicidade, proporcionando energia para vencer os obstáculos.

A toda minha família, foram essenciais para alcançar este objetivo.

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

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

Aos técnicos do laboratório de Estruturas da UTFPR, em especial ao meu amigo Maiko Cristian Sedoski pela amizade, companheirismo e disposição de sempre.

À empresa COAMO, na pessoa do Sr. Lauro Sedoski pela importante contribuição.

RESUMO

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.

No cenário da produção de edificações sustentáveis, as vigas em perfil I ocupam lugar de destaque, sobretudo da possibilidade de emprego de madeiras provenientes de florestas plantadas. O processamento industrial agrega aos produtos derivados da madeira características antes ausentes na madeira sólida, como apresentar uma estrutura mais homogênea e com defeitos reduzidos, melhores propriedades físico-mecânicas, estabilidade dimensional, dentre outras, melhorando a qualidade e aumentando a confiabilidade das estruturas de madeira. Estas características aliadas ao uso de madeiras de rápido crescimento provenientes de florestas plantadas e homogêneas, e o melhor aproveitamento da tora, tornam estes produtos ecologicamente corretos, garantindo um sólido mercado consumidor. Nesse contexto, observando a grande demanda por parte da indústria da construção civil por novas soluções que se enquadrem nos conceitos de racionalização construtiva, as estruturas de madeira e de derivados de madeira possuem um grande potencial para preencher essa lacuna. As vigas de madeira de seção “I”, também conhecidas como “I-Joists”, são perfis industrializados fabricados através da colagem de mesa superior e inferior, ligadas à alma. O principal desafio para a produção das vigas em perfil I é a ligação. Nesse trabalho foram avaliados de forma experimental quatro diferentes geometrias de ligações mesa/alma e oito resinas estruturais, buscando identificar o modelo mais eficiente de encaixe e a possibilidade de emprego de resinas nacionais a base de epóxi, diminuindo o custo de fabricação. Numa primeira etapa foi feito um estudo da literatura analisando os materiais e as geometrias mais utilizados. Em seguida foram estabelecidos quatro modelos de ligações e então confeccionados 6 corpos de prova de cisalhamento para cada geometria e resinas. Como resultado do trabalho apresenta-se a geometria que obteve o melhor desempenho e as resinas que apresentaram resistência confiável e facilidade de manufatura.

Palavras-chave: Produtos Engenheirados de Madeira. Ligações. Resinas estruturais.

ABSTRACT

RIBEIRO, Wilson. F. **ANALYSIS OF DIFFERENT RESINS AND WEB-TO-FLANGE JOINTS OF WOOD COMPOSITE I-JOIST**. 2012. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2012.

Production of sustainable construction forms a scenario where wood I-joist beam occupy a prominence place, because of the possibility of utilization of wood that comes from reforested trees. The industrial process adds to products derived from wood features absent in solid wood, with more homogeneous structure and reduced defects, improved physical and mechanical properties, dimensional stability stable, Improving quality and increasing the reliability of wood structures. These features combined with using wood from fast-growing plantations and homogeneous and the best use of the log, make environmentally friendly products them, ensuring a strong consumer market. In this context, observing the great demand from the construction industry with new solutions that fit the concepts of constructive rationalization, the structures of wood and wood products have great potential to fill this space. The wood I-beam are manufactured by the industrial profiles bonding flanges and web. A critical part of I-joist is the web-to-flange joint. This study is to evaluate four different geometries of web-to-flange joint and analyze eight different resins shear strain in the specimens with the aim of analyzing the most efficient connection and possibility of using national resins, reducing the manufacturing cost. First was conducted a literature review, where the established geometry and materials used generally, then established four different geometries of web-to-flange joint and produced six specimens for each geometry and resin. As a result of the work shows the geometry that gave the best performance and the resistant resins were reliable and ease of manufacturing.

Keywords: Engineered wood products. Joints. Structural resins.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - PRODUTOS ENGENHEIRADOS DE MADEIRA.....	16
FIGURA 2 - VIGAS "I" DE MADEIRA	19
FIGURA 3 - VIGAS COMPOSTAS COM MESAS EM MADEIRA MACIÇA E LVL E ALMA EM COMPENSADO	21
FIGURA 4 - VIGAS "I" DE MADEIRA	22
FIGURA 5 - MODELO DE FABRICAÇÃO DE VIGAS EM PERFIL "I".....	23
FIGURA 6 - DIMENSÕES DE FABRICAÇÃO DE VIGAS "I".....	24
FIGURA 7 - LIGAÇÃO MESA/ALMA EM VIGA "I"	25
FIGURA 8 - LIGAÇÕES VIGAS "I". (A) LIGAÇÃO COM ALMA DUPLA. (B) LIGAÇÃO COM ALMA SIMPLES.	25
FIGURA 9 - LIGAÇÃO MESA/ALMA VIGA "I" COM RANHURAS.....	26
FIGURA 10 - DIFERENTES TIPOS DE EMENDAS USADAS EM VIGAS "I".....	27
FIGURA 11 - DIFERENTES TIPOS DE EMENDAS UTILIZADAS PELO CWC.....	27
FIGURA 12 - DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA DE LIGAÇÃO.	33
FIGURA 13 - GEOMETRIA DAS LIGAÇÕES, 13-(A) GEOMETRIA (I), RETANGULAR MAIS USUAL - FIGURA 13-(B) GEOMETRIA (II), EM FORMA DE CUNHA COM 7,6° DE INCLINAÇÃO - FIGURA 13-(C) GEOMETRIA (III), COM DOIS SULCOS E GEOMETRIA (IV) – FIGURA 13-(D), DOIS SULCOS INCLINADOS COM 4,6°.....	33
FIGURA 14 - BENEFICIAMENTO DAS MESAS DE PINUS E ALMA EM OSB.....	34
FIGURA 15 - CORTE DAS MESAS.....	35
FIGURA 16 – CORPOS DE PROVA.....	35
FIGURA 17 – CORPO DE PROVA COM LIGAÇÃO EM RESINA À BASE DE EPÓXI.....	36
FIGURA 18 - CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	36
FIGURA 19 – CORPO DE PROVA DE ENSAIO DE LIGAÇÃO.....	37
FIGURA 20 – ARRANJO PARA ENSAIO.....	37
FIGURA 21. RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA, (21-A) ILUSTRA A RUPTURA POR CISALHAMENTO NA ALMA, (21-B) ILUSTRA A RUPTURA NA BORDA DE LIGAÇÃO.	43
FIGURA 22 – DIAGRAMA DE CARGA MÉDIA DE RUPTURA.....	46
FIGURA 23 - DIMINUIÇÃO DA ÁREA DE CISALHAMENTO EM 33,3%.	46

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - MÁXIMA CAPACIDADE DE CARGA, TENSÃO PRINCIPAL MÁXIMA E TENSÃO PRINCIPAL MÁXIMA DE CISALHAMENTO.....	21
TABELA 2 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COLAGEM DO ADESIVO CASCOPHEN RS-216M.	38
TABELA 3 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COLAGEM DO ADESIVO COMPOUND FLUIDO.....	39
TABELA 4 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COLAGEM DO ADESIVO COMPOUND GEL.	39
TABELA 5 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COLAGEM DO ADESIVO RHEOPOX MÉDIA FLUIDEZ.....	40
TABELA 6 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COLAGEM DO ADESIVO MSET – EP (PEGA NORMAL).	40
TABELA 7 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COLAGEM DO ADESIVO MSER – EP (PEGA LENTA).	41
TABELA 8 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COLAGEM DO ADESIVO SIKADUR - 32.....	41
TABELA 9 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COLAGEM DO ADESIVO SIKADUR – 32 (GEL).	42
TABELA 10 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA DA LIGAÇÃO COM GEOMETRIA RETANGULAR.....	43
TABELA 11 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA DA LIGAÇÃO COM GEOMETRIA EM CUNHA.	44
TABELA 12 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA DA LIGAÇÃO COM GEOMETRIA COM SULCOS PARALELOS.	45
TABELA 13 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA DA LIGAÇÃO COM GEOMETRIA COM SULCOS INCLINADOS.....	45

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	12
2.1 OBJETIVO GERAL	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3 JUSTIFICATIVAS	13
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
4.1 PRODUTOS ENGENHEIRADOS DE MADEIRA – (PEM).....	15
4.2 VIGAS DE MADEIRA “I-JOIST”	17
4.3 TIPOS DE LIGAÇÕES	24
4.4 ADESIVOS	28
4.4.1 Adesivo à base de Resorcinol-Formol	29
4.4.2 Adesivos à base de Epóxi.....	29
5 METODOLOGIA	31
5.1 MATERIAIS	31
5.2 ADESIVOS	32
5.3 MÉTODOS.....	32
5.4 CORPOS DE PROVA DE LIGAÇÃO	34
5.5 ENSAIOS EM CORPOS DE PROVA.....	37
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
6.1 ENSAIOS DE RESINAS	38
6.2 ENSAIOS DE LIGAÇÕES.....	42
7 CONCLUSÃO	47
REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

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

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

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

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

Um dos principais desafios da produção das vigas “I-Joist” é a emenda da alma nas mesas, pois a garantia de rigidez e resistência esta diretamente relacionada com os materiais utilizados e uma ligação que consiga transmitir com eficiência os esforços de cisalhamento, principalmente.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliação da eficiência de emendas em vigas de madeira com seção transversal “I”.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Estabelecer diferentes geometrias para emendas em vigas com perfil I.

Analisar de forma experimental quatro diferentes geometrias para ligações mesas/alma e oito resinas estruturais.

Identificar a geometria e as resinas que apresentarem maior praticidade de produção, garantindo qualidade e rigidez das vigas.

3 JUSTIFICATIVAS

Na era do aquecimento global há que se buscar proposições que garantam o desenvolvimento sustentável. A madeira engloba os requisitos fundamentais para diminuir os impactos ambientais causados pelas construções, sendo um material renovável, reaproveitável e de grande abundância em nosso país. Nesse contexto, o processamento industrial agrega aos produtos derivados da madeira características antes ausentes na madeira sólida, como apresentar uma estrutura mais homogênea e com defeitos reduzidos, melhores propriedades físico-mecânicas, estabilidade dimensional, dentre outras, melhorando dessa forma a qualidade e aumentando a confiabilidade das estruturas de madeira.

Essas características aliadas ao uso de madeiras de rápido crescimento provenientes de florestas plantadas e homogêneas, e o melhor aproveitamento da tora, tornam estes produtos ecologicamente corretos, garantindo um sólido mercado consumidor. Desse modo, observando a grande demanda por parte da indústria da construção civil por novas soluções que se enquadrem nos conceitos de racionalização construtiva, as estruturas de madeira e de derivados de madeira possuem um grande potencial para preencher essa lacuna.

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

No Brasil, a aplicação desse nobre material em estruturas permanentes, salvo raras exceções, se restringe basicamente à construção de coberturas de edifícios comerciais e residenciais, de pouca expressão. Muitas vezes, sem um correto planejamento e executada por pessoas sem qualificação, carregam como ônus desta má utilização a imagem de um material que dura pouco, apodrece e é atacado por insetos. Devido à má utilização, de modo geral as edificações em madeira tem sido consideradas como de qualidade inferior ou de função provisória.

No entanto, sabe-se que a madeira quando aplicada com racionalidade, constituiu-se em um dos materiais mais versáteis para a aplicação na construção civil,

competindo diretamente em alguns casos com o aço e o concreto. Como principais vantagens, a madeira apresenta excelente resistência mecânica, inércia química, leveza, estética, baixo gasto energético para sua produção, facilidade e agilidade na execução, conforto térmico e acústico, entre outras.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

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

O consumo cada vez maior de materiais de construção e as crescentes dificuldades para obtenção de madeira 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 (VAZ, 1987, apud STAMATO, 1998).

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

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

4.1 PRODUTOS ENGENHEIRADOS DE MADEIRA – (PEM)

Os PEM (Produtos Engenheirados de Madeira), ou EWPs (*Engineered Wood Products*) são produtos industrializados de madeira que apresentam como características principais a sustentabilidade, controle de qualidade, segurança, estética e usos diversos, nas áreas de instrumentos musicais, indústria naval,

indústria moveleira e construção civil. Na construção civil os PEM podem ser empregados na construção de barracos provisórios até elementos estruturais de pontes (THE ENGINEERED WOOD ASSOCIATION, 2009).

A Associação americana de madeira compensada, APA (*American Plywood Association*), divide os produtos engenheirados de madeira em quatro categorias gerais: 1) os painéis estruturais, incluindo o OSB (*Oriented Strand Board*), o compensado (*plywood*) e painéis compósitos (*Waferboard*); 2) a madeira laminada colada (*glulam*); 3) madeira serrada composta estrutural (SCL), incluindo principalmente folheado de madeira laminada (LVL); 4) as vigas em “I” de madeira, (THE ENGINEERED WOOD ASSOCIATION, 2007). A Figura 1 ilustra alguns tipos de produtos compostos de madeira.



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

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

A geometria básica do cavaco é 100 x 25 x 0,5 mm, sendo diferente da produção de painéis aglomerados comuns. A chapa é formada por 3 a 5 camadas de cavacos orientadas perpendicularmente entre si, utilizando adesivos resistentes a

umidade. Geralmente são produzidos em dimensões de 1220 x 2440 mm com espessuras que variam de 9 a 38 mm. Seu uso é mais difundido em países como os Estados Unidos da América, países da Europa e Japão. No Brasil, a sua produção teve início no ano de 2002 (MENEZZI, 2004).

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

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

Um estudo realizado por Menezzi (2004) cita que a desvantagem do OSB com relação ao compensado é a baixa estabilidade dimensional, pois quando entra em contato com a umidade o mesmo passa por uma transição de inchaço, expandindo mais que o compensado, porém essa desvantagem pode ser convertida utilizando o método de tratamento térmico dos painéis.

4.2 VIGAS DE MADEIRA “*I-JOIST*”

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

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

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

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

A concepção das vigas “I” usando a alma de painéis de madeira e mesas de madeira serrada em mesas/alma coladas ou pregadas surgiu em meados de 1940, na segunda guerra mundial, com o objetivo de se construir aviões de guerra (SANTOS, 2008). No entanto, a empresa americana TJ (Trus Joist Corporation) em 1969 foi a primeira a desenvolver a “*I-Beam*” industrializada, não somente foi a pioneira no desenvolvimento desta indústria, mas tem mantido um papel de liderança no mercado e este produto tornou-se um dos componentes mais usados para as construções de residências na América do Norte (FISSETTE, 2000).

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

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



Figura 2 - Vigas "I" de madeira
Fonte: ENGINEERED WOOD CONSTRUCTION (1999).

Cerca de trezentos e trinta milhões de metros lineares de vigas “I” de madeira são fabricados anualmente (ROSS, 2006). No Brasil, a tecnologia das vigas “I” vem sendo explorada na área acadêmica com vários estudos sobre este elemento estrutural, no entanto, no setor da construção civil ainda é subutilizada.

Para Góes (2002) que estudou peças compostas por madeira maciça com seção transversal “I” e ligadas por conectores metálicos, cita que ligação por pinos metálicos permite deslizamento entre as peças unidas e esse deslizamento é função da rigidez da ligação, causando redução nas propriedades de resistência e rigidez da peça composta. Este sistema de vigas não possibilita emendas longitudinais, restringindo o comprimento da peça e limitando sua utilização, mesmo assim é o sistema mais utilizado no Brasil devido a sua facilidade de aplicação e baixo custo.

Conforme Pedrosa (2003) houve uma pequena variação no teste efetuado com chapas de compensados de Pinus e Eucalipto de mesma espécie, o que não ocorreu com os painéis sarrafeados de Pinus, comprovando a eficácia da classificação das lâminas apenas para a fabricação deste último. Os resultados de ensaios do OSB indicaram propriedades mecânicas elevadas e com pequena dispersão, reforçando a característica de material industrializado e com bom controle de qualidade. Os resultados tornaram evidente a maior contribuição das propriedades das mesas, para a rigidez e resistência a flexão das vigas “I”.

Em Lima (2005) destaca-se um estudo do comportamento estrutural das vigas “I” utilizando mesa maciça em Pinus e alma em OSB, analisou as ligações da alma

nas mesas pregadas, coladas e pregadas e apenas coladas. Constatou-se que o comportamento estrutural é diretamente afetado pelo tipo de ligação mesa/alma.

Uma vez que as vigas ensaiadas pesavam em média 12 kg, observou-se que as vigas “pregadas” atingiram a capacidade de carga de até 90 vezes seu peso próprio, as vigas “coladas” e as vigas “coladas e pregadas” atingiram a capacidade de carga de até 230 vezes seu peso próprio. O autor concluiu que a utilização de adesivo na produção das vigas com seção transversal “I” faz com que a alma e as mesas atuem de forma monolítica, sem deslizamento entre as partes constituintes, apresentando um comportamento elástico linear.

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

SILVA (2010) cita que a melhor combinação é a de mesa em madeira serrada de *Pinus Oocarpa* e alma em compensado laminado.

PRADA (2003) apresentou como melhor geometria de ligação mesa/alma o modelo “*finger-joint*”. Conclui que as emendas apresentaram um perfeito equilíbrio dos entalhes da junção mesa/alma bem como um perfeito funcionamento do adesivo. As vigas compostas por alma em madeira maciça apresentaram resistência de cisalhamento inferior às vigas compostas por mesas de LVL. Verificou-se também que para a utilização de vigas “I” como barrote para lajes, recomenda-se o uso de viga “I” com mesas em madeira maciça. O comportamento estrutural das vigas “I” de madeira é fortemente influenciado pelas características de cada material empregado, bem como nos detalhes de fabricação, como as emendas da alma na mesa.

Um estudo realizado por Jahromi et al. (2006), que avaliaram o desempenho estrutural de nove diferentes vigas de madeira compostas com diferentes seções transversais, conforme Figura 3.

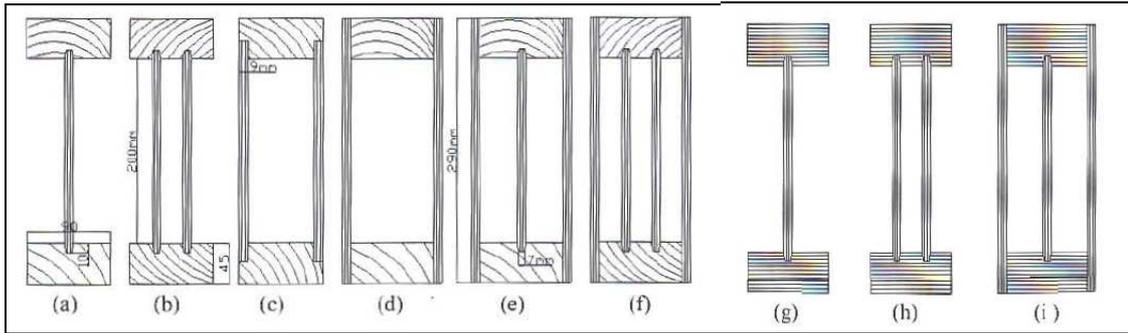


Figura 3 - Vigas compostas com mesas em madeira maciça e LVL e alma em compensado
Fonte: JOURNAL OF THE INSTITUTE OF WOOD SCIENCE (2006).

Cita que devido à abertura na alma a capacidade máxima de carga diminui, porém as múltiplas almas melhoram significativamente o desempenho estrutural das vigas "I". A viga com seção transversal "I" com alma dupla e abertura de 152 mm obteve um resultado de capacidade de carga de 52% maior que a viga "I" comum sem abertura na alma, e a viga com seção "I"/caixão com abertura de 152 mm obteve um resultado de 101% maior que a viga "I" comum. A seção caixão com encaixe, Figura 3 (c) apresentou a menor capacidade estrutural devido à geometria da conexão. A Tabela 1 demonstra as máximas capacidades de carga e tensões máximas das vigas.

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

Seção	Carga Máxima	$\sigma_{t,max}$	$T_{s,max}$
	(kN)	(N/mm²)	(N/mm²)
Seção "I"	25,91	0,13	0,47
Seção "I" Dupla	49,35	0,05	0,20
Seção caixão c /encaixe	27,57	0,13	0,16
Seção caixão	31,86	0,15	0,34
Seção "I" caixão	53,61	0,27	0,52
Seção duplo "I" caixão	74,84	0,10	0,21
Seção "I" LVL	26,44	0,11	0,40
Seção duplo "I" LVL	45,81	0,07	0,18
Seção "I" caixão LVL	62,23	0,31	0,48

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

Diante dos vários modelos construtivos de vigas, Berglund (2005) apresenta uma viga de composto laminado "*Wafer and Flakeboard*" possivelmente utilizada em paredes e piso residenciais ou comerciais. A Figura 4 mostra a viga de composto laminado.



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

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

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

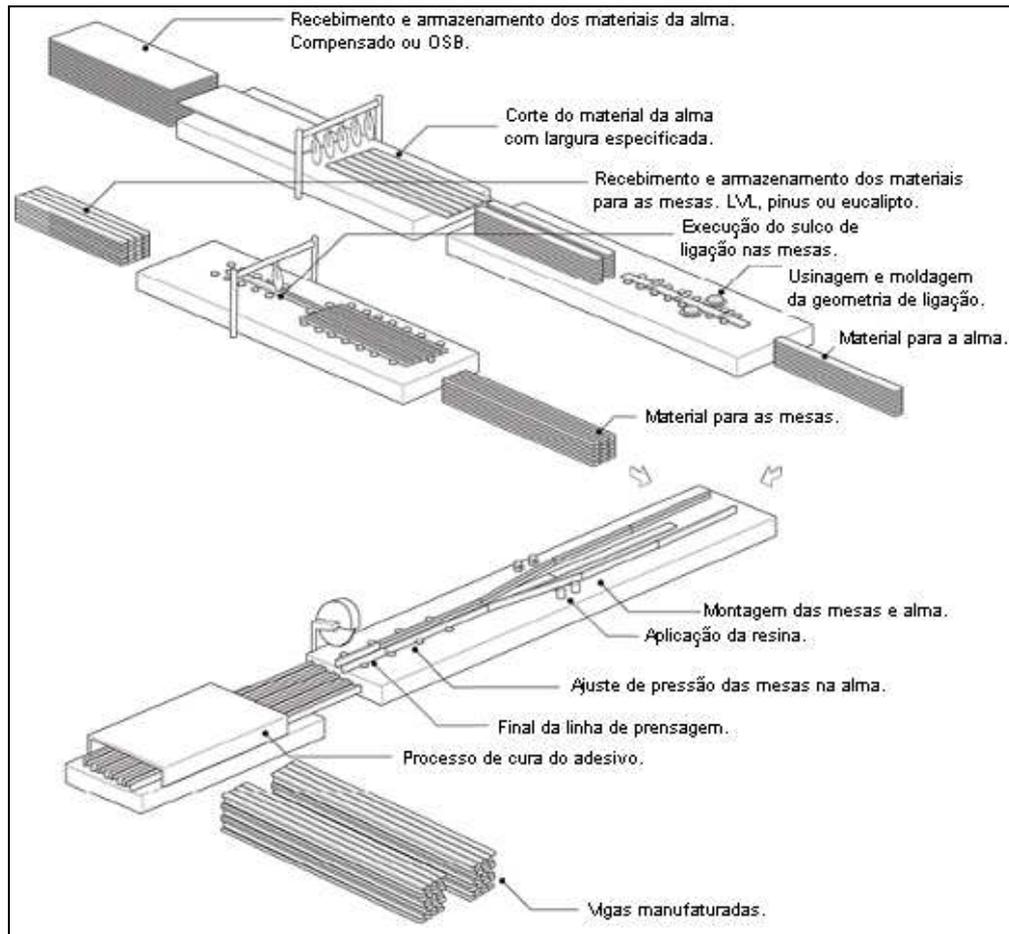


Figura 5 - Modelo de fabricação de vigas em perfil "I"
Fonte: adaptado de Canadian Wood Council (2010).

Cada fabricante estabelece dimensões de fabricação e modelos de utilização das vigas "I". A empresa canadense ALPAJOIST manufatura algumas diferentes dimensões. A Figura 6 demonstra as principais dimensões comercializadas, sendo a série A com aberturas na alma para passagem de tubulações e série B sem aberturas.

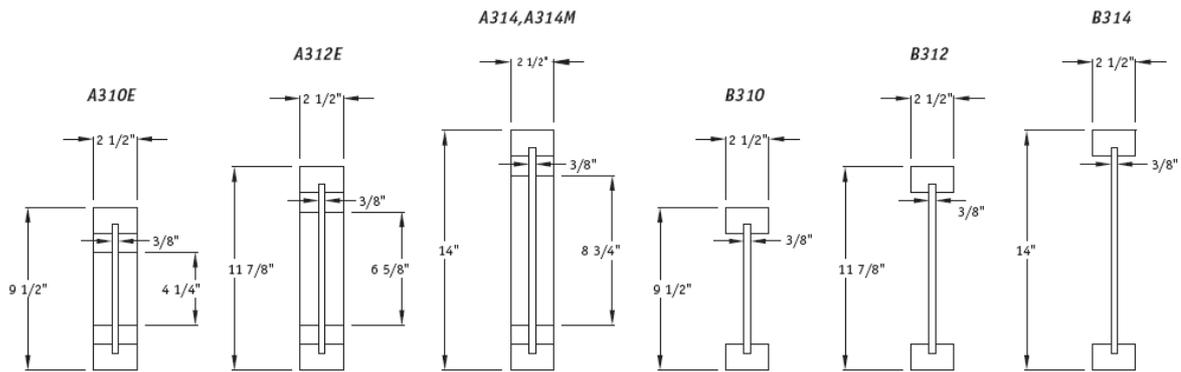


Figura 6 - Dimensões de fabricação de vigas "I"
Fonte: Engineered Wood Association (2010).

4.3 TIPOS DE LIGAÇÕES

Devido ao grande desenvolvimento de novos materiais, sistemas construtivos e sistemas estruturais, a necessidade de estudos das ligações entre os elementos estruturais têm sido importante para o aperfeiçoamento no que diz respeito ao dimensionamento, tendo em vista que a transmissão dos esforços e as deformações na estrutura dependem consideravelmente do comportamento dessas ligações (STAMATO e CALIL, 2002).

As ligações são os principais desafios para produção das vigas "*I-Joist*" e vêm sendo estudadas com frequência em busca de uma geometria de melhor desempenho, resistência, colagem e praticidade de fabricação.

A construção de vigas de madeira com seção transversal "I" surgiu no início do século XIX com o objetivo de desenvolver uma viga composta de madeira que substituísse a equivalente serrada, possibilitando o alcance de comprimentos maiores para a construção de aviões, oferecendo uma maior aplicabilidade do material, melhor relação peso/resistência e diminuindo o enorme desperdício causado pelas vigas maciças. Nesse modelo de viga "I" as mesas e alma são de laminas de madeira colada e sua ligação feita em forma de encaixe (KNIGHT, 1918). A Figura 7 mostra os detalhes da ligação.

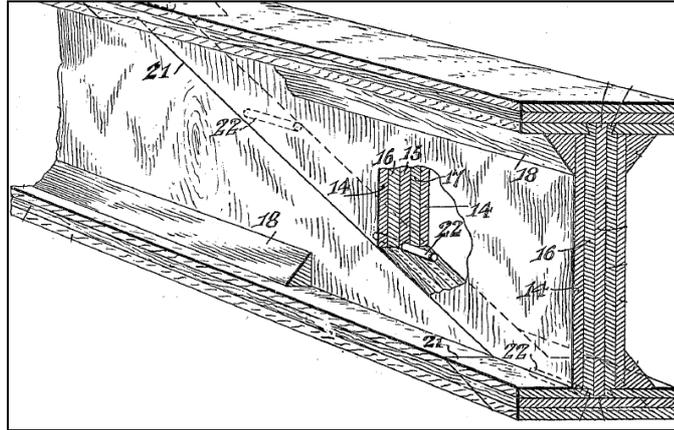
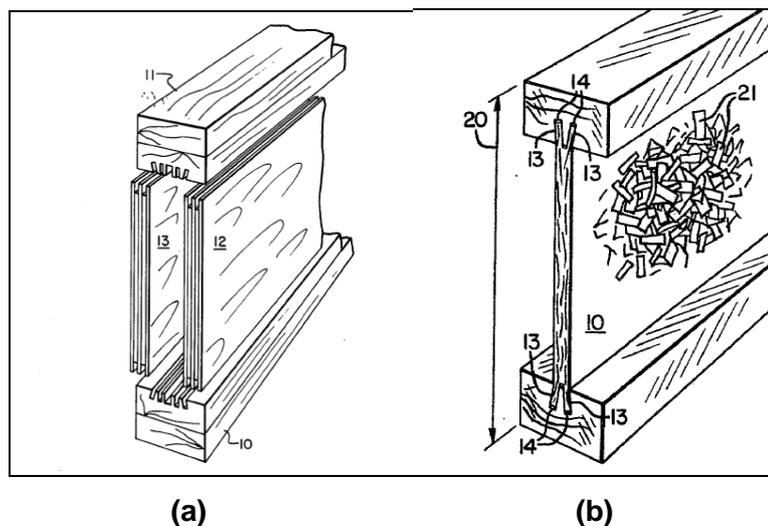


Figura 7 - Ligação mesa/alma em viga "I"
Fonte: UNITED STATE PATENT (1918).

A patente desenvolvida por Keller et al. (1978) apresenta um modelo de ligação mesa/alma na qual utiliza-se alma dupla em compensado e mesa em madeira maciça com uma peça sobreposta a outra. O modelo de ligação com cinco sulcos, sendo o central com espessura dupla para encaixe dos dentes das duas almas juntas e os demais paralelo a este, sendo os laterais ligeiramente inclinados.

O modelo da ligação é mostrado na Figura 8 (a). Já a patente de Keller et al. (1980) apresenta um outro modelo de ligação o qual utiliza-se alma simples em compensado e ligação com dois sulcos ligeiramente inclinados. O modelo da ligação é mostrado na Figura 8 (b).



(a) **(b)**
Figura 8 - Ligações vigas "I". (a) Ligação com alma dupla. (b) Ligação com alma simples.
Fonte: UNITED STATE PATENT (1978a, 1980b).

Estudos desenvolvidos por Haritos e Keller (1980) apresentam a distribuição de tensões para uma gama de geometrias comum, concluindo que o adesivo rígido amplia as tensões de cisalhamento na interface das emendas.

Os efeitos das ligações da alma nas mesas, com relação à resistência e rigidez das vigas, foram estudados por Leichti (1986) e Leichti & Tang (1989) através de ensaios experimentais e análise teórica. Estudaram vigas contínuas de 5,28 metros de comprimento e 25,4 cm de altura e também vigas descontínuas com emendas espaçadas a cada 1,21 metros de distância. Verificaram que as vigas não apresentaram diferenças significativas na rigidez ou capacidade de carga. As diferenças não eram aparentes e analisando as vigas pelo método dos elementos finitos, apresentou cisalhamento nas emendas da alma e também nas mesas.

A patente de Lionel (1987) registra sua ideia para ligação mesa/alma em forma de cunha incluindo ranhuras verticais ao longo do encaixe da alma e ranhuras no sentido longitudinal da mesa. Defende a ideia que tais ranhuras proporcionam um escape do excesso de cola. O inventor também menciona que preferencialmente utiliza-se de painéis de partículas orientadas na alma e mesa de MLC. O exemplo pode ser observado na Figura 9.

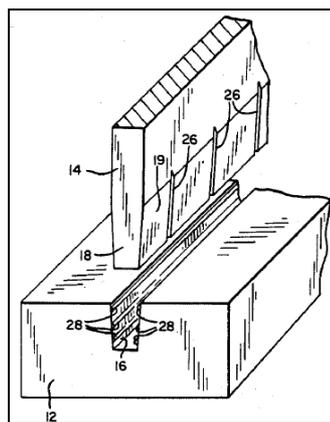


Figura 9 - Ligação mesa/alma viga "I" com ranhuras.
Fonte: UNITED STATE PATENT (1987).

Para Booth (1974) apud Leichti, et al. (1990) as ligações pregadas sofrem um deslocamento conjunto e esse deslizamento é grande o suficiente para ser considerado no projeto. Logo em seguida Leichti, et al. (1990) estudaram alguns

modelos de ligações mesa/alma utilizadas em vigas “I”. As geometrias designadas para a fixação da alma na mesa variam de acordo com cada fabricante. A Figura 10 ilustra algumas das ligações estudadas.

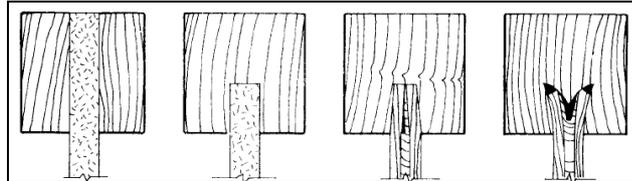


Figura 10 - Diferentes tipos de emendas usadas em vigas "I".
 Fonte: LEICHTI; FALK; LAUFENBERG (1990).

O Canadian Wood Council estabelece alguns modelos de ligações mesa/alma em vigas “I” pré-fabricadas e cita a utilização de OSB ou madeira compensada, a Figura 11 detalha as geometrias das emendas.

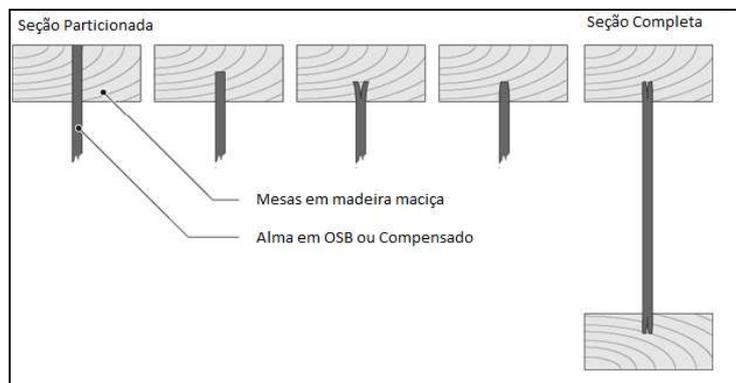


Figura 11 - Diferentes tipos de emendas utilizadas pelo CWC.
 Fonte: Adaptado de Canadian Wood Council (2010).

Em um estudo realizado por Silva (2010), foram analisadas duas geometrias de ligações mesa/alma, em forma de cunha e dentada, e dois diferentes materiais para alma, sendo madeira maciça de pinus e OSB. Nas ligações dentadas as rupturas ocorreram próximo aos dentes, já na ligação em cunha ocorreram na linha de cola, logo, a ligação dentada apresentou desempenho significativamente superior

ao da ligação em cunha quando utilizado alma em madeira maciça. O uso de ligações dentadas em painéis de OSB mostrou-se inviável, pois durante a confecção dos dentes as camadas de laminas de madeira se descolam, provocando um encaixe imperfeito.

4.4 ADESIVOS

Cada fabricante de vigas I estabelece o tipo de adesivo a ser utilizado nas ligações, porém, a resina utilizada deve estar em conformidade com padrões de resistência e durabilidade. As resinas mais utilizadas em vigas I são Fenol-formaldeído e Fenol-resorcinol, embora alguns adesivos de Melanina também podem ser utilizados (LEICHTI, et al. 1990).

MACÊDO (1999) estudou madeiras laminadas coladas utilizando a resina sintética CASCOPHEN RS-216 à base de resorcinol e obteve resultado, quanto à colagem dos corpos de prova, satisfatório para todas as amostras de caracterização de MLC. Recomenda a utilização desta resina para colagens resistentes à água fria ou fervente, diversos solventes orgânicos, a fungos e mofo, ao calor seco ou úmido, etc. Destaca a utilização em barcos, escadas, caixas d'água, hélices, vigas de MLC entre outros, onde a colagem ficará exposta temporária ou definitivamente à ação de intempérie.

BERGULAND (2005) ressalta os principais adesivos para manufatura de madeira composta estrutural como sendo Fenol-formaldeído e Isocianatos.

AZAMBUJA et. al. (2006) estudaram e compararam adesivos poliuretanos frente ao Resorcinol-Formaldeído aplicados em emenda dentada estrutural para espécie de *Eucalyptus Grandis*, sendo eles o poliuretano a base de óleo de mamona, Wonderbond e Purbond, em comparação com o adesivo resorcinol-formaldeído. Os três adesivos testados, apresentaram eficiência de colagem, em termos de desempenho estrutural, de 96%, 106% e 114% respectivamente, em relação ao adesivo Cascophen. A análise mostrou que não houve diferença significativa e pode-se afirmar a viabilidade dos três adesivos.

Um trabalho realizado por Carneiro (2010) cita a utilização de resina a base de epóxi em juntas coladas de topo, biselada e encaixada para diferentes espécies

de madeira. A utilização do Adesivo Compound proporcionou uma boa colagem das juntas apresentando excelente resistência à tração, principalmente nas juntas biseladas que atingiu resistência de aproximadamente 100% para todas as espécies analisadas.

SILVA (2010) cita a utilização do adesivo à base de resorcinol-formol como sendo o mais viável, pois o mesmo mostrou-se mais adequado na utilização em vigas H20, transmitindo os esforços com mais eficiência.

4.4.1 Adesivo à base de Resorcinol-Formol

O adesivo CASCOPHEN RS-216-M é uma resina sintética, à base de Resorcinol-Formol, em solução álcool/água, especialmente recomendada para colagens resistentes a situações de umidade, água fria ou fervente, diversos solventes orgânicos, fungos e mofo, etc. Pode ser aplicado a todos os tipos de madeira, chapas duras e outros materiais semelhantes. É uma resina muito utilizada na indústria naval, na qual a colagem deverá ficar exposta temporária ou definitivamente à ação de intempéries. Fabricado pela HEXION QUÍMICA indústria e comércio Ltda.

A resina Cascophen RS-216-M é obrigatoriamente usada em conjunto com o endurecedor FM-60-M (em pó) na proporção de 20% de endurecedor. O boletim técnico do fabricante cita a utilização de 300 a 500 g/m² de mistura por linha de cola e tempo de utilização após a mistura de até 60 minutos em temperatura de 60°C, 40 minutos em temperatura de 26°C e 25 minutos em temperatura de 32°C.

4.4.2 Adesivos à base de Epóxi

O adesivo Compound Fluido é uma resina epóxi de alta fluidez, que, quando misturada com areia de quartzo o adesivo proporciona alta resistência mecânica e química, impermeável e resistente à abrasão. Pode ser utilizado em concreto, ferro, madeira, entre outros. O fabricante cita a utilização com mistura de duas

composições básicas, resina epóxi e poliamina. Apresenta cura inicial de 24 horas e final de 72 horas.

O adesivo Compound Gel apresenta baixa viscosidade e altas resistências em baixas idades, alta fluidez possibilitando aplicação mesmo em locais de difícil acesso, proporciona rendimento, excelente aderência a vários tipos de substrato, ideal para colagem em concreto, ferro, madeira, pedra, etc. Também é utilizado com dois componentes, resina epóxi e poliamina.

MSET EPPL é um adesivo estrutural bicomponente à base de resina epóxi e de consistência fluida de pega lenta (6 horas) utilizado em recuperação estrutural. Apresenta características como: Alta adesividade; aplicações de concreto sobre concreto; alta resistência química e mecânica; fácil aplicação; liberação em 48 horas. Apresenta rendimento de 0,7 kg/m² e resistência a compressão de 50 MPa em 7 dias.

O MSET EP (pega normal) apresenta características semelhantes ao anterior, podendo ser utilizado em concreto, alumínio, aço, madeira ou cerâmica. Resistência a compressão de 70 MPa em 7 dias e tração de 36 MPa em 7 dias.

O adesivo estrutural Sikadur 32 é uma resina epóxi de média viscosidade, bicomponente e de pega normal. Apresenta características como, endurecimento rápido, excelente aderência a superfícies de concreto, argamassa, madeira, cimento-amianto, pedras, cerâmicas, diversos tipos de metais e outros materiais de construção, impermeável e elevada resistência mecânica à tração e compressão.

O adesivo estrutural Sikadur 32 Gel apresenta características semelhantes ao anterior, porém pode ser aplicado com pincel devido a sua consistência fluida. É composto por resina epóxi e poliamidas.

Rheopox média fluidez é um adesivo à base de epóxi para colagem de superfícies de substratos minerais e metálicos. É uma família de massas epoxídicas bi-componentes, apresenta cura em baixas temperaturas (5 °C) e tolerante à superfícies ligeiramente úmidas. Ideal para fixação de peças de cimento amianto, madeira, mármore, cerâmica e azulejos.

5 METODOLOGIA

Para a avaliação do comportamento mecânico de vigas compostas e análise das ligações, se faz necessária, além de análise teórica, a realização de ensaios de laboratório para aferir os modelos matemáticos e obter parâmetros para serem usados nesses modelos.

Para obter valores e fazer comparativos com modelo teórico foram realizados ensaios em corpos de prova em escala real.

Foram realizados testes de caracterização das ligações coladas em quatro diferentes geometrias e oito resinas estruturais, de forma a determinar as geometrias e resinas que proporcionam melhor comportamento, rigidez e facilidade de produção, possibilitando um menor custo de manufatura.

Os ensaios inerentes à caracterização das espécies de madeira empregadas na pesquisa foram conduzidos conforme o Anexo B da NBR 7190 (1997) “Projeto de estruturas de madeira”.

O programa de ensaios foi desenvolvido no Laboratório de Estruturas da (UTFPR) Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Campo Mourão. A seguir são apresentados detalhadamente os materiais e os procedimentos adotados no programa experimental de ensaios.

5.1 MATERIAIS

As madeiras foram adquiridas em uma empresa da cidade de Campo Mourão e, constatando-se a necessidade de obter madeira com baixo teor de umidade, utilizando um medidor eletrônico de umidade modelo DUC 2050L, selecionou-se o material que apresentou condição de uso imediato para produção dos corpos de prova. Após a seleção da madeira seca, as mesmas passaram por um processo de classificação visual, selecionando as que não apresentaram defeitos aparentes, isentos de trincas, empenas e nós.

Optou-se pela utilização da madeira de *Pinus Taeda* nas mesas por serem provenientes de áreas reflorestadas, baixa densidade, custo acessível, grande disponibilidade e potencial de produção no país e na região de Campo Mourão – PR.

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

5.2 ADESIVOS

A utilização de resinas à base de epóxi possibilita diminuição do custo de fabricação das vigas compostas, para tanto, faz-se necessário à verificação de resistência de ligação, para se identificar aquela que apresentar confiabilidade e facilidade de aplicação. Nesta pesquisa foram analisadas oito diferentes resinas estruturais, sendo elas: Resina estrutural a base de Resorcinol-formaldeído (PRF) CASCOPHEN RS-216M própria para madeira e usualmente utilizada na indústria naval e as resinas a base de epóxi: COMPOUND (fluido), COMPOUND (Gel), RHEOPOX (Média fluidez), MSET EP (Pega normal), MSET EP (Pega lenta), SIKADUR 32 e SIKADUR 32 (Gel).

5.3 MÉTODOS

Os testes de ligações foram realizados com ensaios tipo “*push-out*”, as dimensões para os corpos de prova foram estabelecidas de acordo com a altura da viga de mesa a mesa, ou seja, 241 mm e comprimento de 250 mm. Para avaliação das ligações em vigas compostas, foram produzidos 6 corpos de prova de cisalhamento para cada geometria e resinas, utilizando a resina Cascophen para os ensaios em corpos de prova de geometrias e a geometria retangular para os ensaios em corpos de prova das resinas. A Figura 12 ilustra as dimensões características dos corpos de prova de ligação.

dimensões em milímetros.

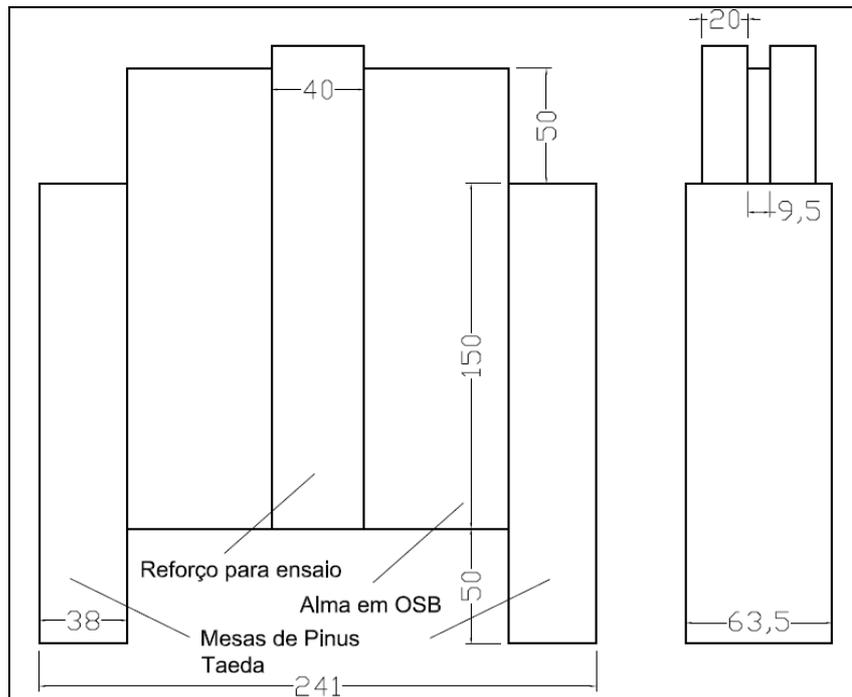


Figura 12 - Dimensões dos corpos de prova de ligação.

As emendas mesas/alma foram analisadas em quatro diferentes geometrias, todas com profundidade de 15 mm, conforme Figura 13.

dimensões em milímetros.

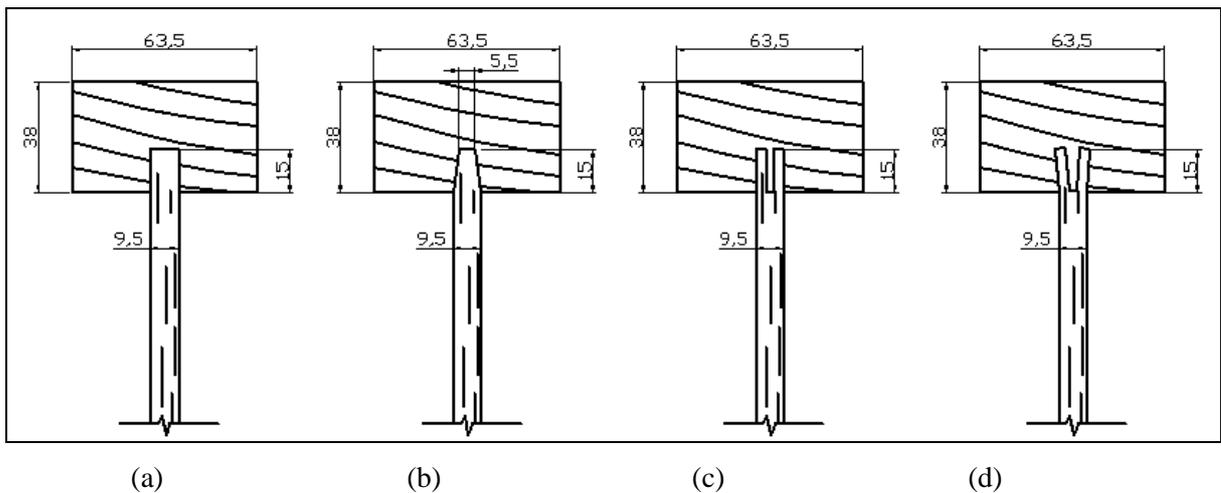


Figura 13 - Geometria das ligações, 13-(a) geometria (I), retangular mais usual - Figura 13-(b) geometria (II), em forma de cunha com 7,6° de inclinação - Figura 13-(c) geometria (III), com dois sulcos e geometria (IV) – Figura 13-(d), dois sulcos inclinados com 4,6°.

Na sequência, foram montados os corpos de prova conforme procedimentos apresentados no item 5.4. Após a montagem, os corpos de prova foram submetidos por ensaio de compressão, verificando o modo de ruptura, cisalhamento na alma ou deslizamento da ligação.

5.4 CORPOS DE PROVA DE LIGAÇÃO

Para o estabelecimento dos métodos de ensaios dos sistemas de ligação, assim como os demais fatores envolvidos, procurou-se a associação das características observadas em diferentes situações relatadas na revisão bibliográfica, uma vez que a NBR 7190 (1997) não apresenta o corpo de prova específico.

Esses ensaios tiveram por objetivo analisar a resistência de ligação quanto à colagem das resinas e desempenho das geometrias, verificando se houve deslocamento na ligação ou ruptura da alma por cisalhamento. Para tanto, foram confeccionados seis corpos de prova – designados CP1, CP2, CP3, CP4, CP5 e CP6 para cada geometria e resinas.

As peças de *Pinus Taeda* que compõem as mesas foram beneficiadas e cortadas, assim como foi feito o corte do OSB na medida especificada para a produção dos corpos de prova, conforme ilustra a Figura 14.



Figura 14 - Beneficiamento das mesas de Pinus e alma em OSB.

Em seguida cortaram-se as mesas e alma para produção dos corpos de prova de ligação conforme dimensões apresentadas no item 5.3. A Figura 15 mostra o corte das mesas.



Figura 15 - Corte das mesas.

A Figura 16 mostra as geometrias dos corpos de prova.



Figura 16 – Corpos de prova.

Na sequência montaram-se os corpos de prova para as quatro geometrias e oito resinas, pressionando as mesas na alma para garantir homogeneização na linha de colagem, conforme indicado pelo fabricante. É ilustrado pelas Figuras 17 e 18.



Figura 17 – Corpo de prova com ligação em resina à base de epóxi.



Figura 18 - Confeção dos corpos de prova.

Para prevenir a ruptura precoce por esmagamento do OSB no momento de aplicação da carga, reforçaram-se ambos os lados da alma com peças de madeira maciça de *Pinus Taeda* coladas com a mesma resina utilizada na ligação. A Figura 19 ilustra o corpo de prova com o reforço e pronto para execução do ensaio.



Figura 19 – Corpo de prova de ensaio de ligação.

5.5 ENSAIOS EM CORPOS DE PROVA

Os ensaios de ligação foram conduzidos com força concentrada nos reforços da alma com carregamento monotônico crescente sem ciclo. A Figura 20 mostra o arranjo para ensaio dos corpos de prova.



Figura 20 – Arranjo para ensaio.

Os resultados obtidos nos ensaios dos 48 corpos de prova são apresentados no item 6 em Resultados e Discussões.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

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

Para o cálculo das tensões foi utilizada a área relativa ao cisalhamento no sentido longitudinal da alma, sendo utilizado o carregamento relativo para cada apoio do corpo de prova.

6.1 ENSAIOS DE RESINAS

Os corpos de prova relativos às resinas foram confeccionados todos com a mesma geometria, sendo utilizado o modelo retangular, uma vez que este ensaio é destinado apenas para verificação quanto à resistência de colagem da ligação.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos no ensaio de resistência à colagem do adesivo Cascophen RS-216M.

Tabela 2 - Ensaio de resistência à colagem do adesivo CASCOPHEN RS-216M.

CASCOPHEN RS-216M	Carga (kN)	MPa	Modo de Ruptura
CP 1	31,10	8,61	Cisalhamento na alma
CP 2	31,30	8,67	Cisalhamento na alma
CP 3	29,60	8,20	Cisalhamento na alma
CP 4	33,50	9,28	Cisalhamento na alma
CP 5	28,30	7,84	Cisalhamento na alma
CP 6	33,10	9,17	Cisalhamento na alma
Média	31,15	8,63	
Desvio Padrão		0,55	
Coef. Variação		6%	

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos no ensaio de resistência à colagem do adesivo Compound Fluido.

Tabela 3 - Ensaio de resistência à colagem do adesivo COMPOUND FLUIDO.

COMPOUND FLUIDO	Carga (kN)	MPa	Modo de Ruptura
CP 1	25,00	6,93	Cisalhamento na alma
CP 2	24,10	6,68	Cisalhamento na alma
CP 3	24,90	6,90	Cisalhamento na alma
CP 4	26,60	7,37	Cisalhamento na alma
CP 5	29,00	8,03	Cisalhamento na alma
CP 6	27,60	7,65	Cisalhamento na alma
Média	26,20	7,26	
Desvio Padrão		0,52	
Coef. Variação		7%	

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos no ensaio de resistência à colagem do adesivo Compound Gel.

Tabela 4 - Ensaio de resistência à colagem do adesivo COMPOUND GEL.

COMPOUND GEL	Carga (kN)	MPa	Modo de Ruptura
CP 1	26,40	7,31	Cisalhamento na alma
CP 2	26,00	7,20	Cisalhamento na alma
CP 3	27,20	7,53	Cisalhamento na alma
CP 4	28,00	7,76	Cisalhamento na alma
CP 5	29,50	8,17	Cisalhamento na alma
CP 6	31,50	8,73	Cisalhamento na alma
Média	28,10	7,78	
Desvio Padrão		0,58	
Coef. Variação		7%	

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos no ensaio de resistência à colagem do adesivo Rheopox média fluidez.

Tabela 5 - Ensaio de resistência à colagem do adesivo RHEOPOX Média Fluidez.

RHEOPOX (Média Fluidez)	Carga (kN)	MPa	Modo de Ruptura
CP 1	24,00	6,65	Cisalhamento na alma
CP 2	27,80	7,70	Cisalhamento na alma
CP 3	26,20	7,26	Cisalhamento na alma
CP 4	26,00	7,20	Cisalhamento na alma
CP 5	26,30	7,29	Cisalhamento na alma
CP 6	21,00	5,82	Cisalhamento na alma
Média	25,22	6,99	
Desvio Padrão		0,66	
Coef. Variação		9%	

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos no ensaio de resistência à colagem do adesivo MSET - EP (Pega normal).

Tabela 6 - Ensaio de resistência à colagem do adesivo MSET – EP (Pega normal).

MSET - EP (Pega normal)	Carga (kN)	MPa	Modo de Ruptura
CP 1	34,60	9,58	Cisalhamento na alma
CP 2	28,00	7,76	Cisalhamento na alma
CP 3	34,40	9,53	Cisalhamento na alma
CP 4	34,60	9,58	Cisalhamento na alma
CP 5	30,50	8,45	Cisalhamento na alma
CP 6	31,40	8,70	Cisalhamento na alma
Média	32,25	8,93	
Desvio Padrão		0,76	
Coef. Variação		8%	

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos no ensaio de resistência à colagem do adesivo MSET - EP (Pega lenta).

Tabela 7 - Ensaio de resistência à colagem do adesivo MSET – EP (Pega lenta).

MSET - EP (Pega Lenta)	Carga (kN)	MPa	Modo de Ruptura
CP 1	24,60	6,81	Descolou na Ligação
CP 2	26,60	7,37	Descolou na Ligação
CP 3	23,00	6,37	Descolou na Ligação
CP 4	25,40	7,04	Descolou na Ligação
CP 5	22,00	6,09	Descolou na Ligação
CP 6	23,10	6,40	Descolou na Ligação
Média	24,12	6,68	
Desvio Padrão		0,48	
Coef. Variação		7%	

A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos no ensaio de resistência à colagem do adesivo SIKADUR - 32.

Tabela 8 - Ensaio de resistência à colagem do adesivo SIKADUR - 32.

SIKADUR - 32	Carga (kN)	MPa	Modo de Ruptura
CP 1	19,80	5,48	Descolou na Ligação
CP 2	22,10	6,12	Descolou na Ligação
CP 3	28,50	7,89	Cisalhamento na alma
CP 4	32,20	8,92	Cisalhamento na alma
CP 5	28,90	8,01	Cisalhamento na alma
CP 6	28,10	7,78	Cisalhamento na alma
Média	26,60	7,37	
Desvio Padrão		1,29	
Coef. Variação		18%	

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos no ensaio de resistência à colagem do adesivo SIKADUR – 32 (Gel).

Tabela 9 - Ensaio de resistência à colagem do adesivo SIKADUR – 32 (Gel).

SIKADUR - 32 (Gel)	Carga (kN)	MPa	Modo de Ruptura
CP 1	29,90	8,28	Cisalhamento na alma
CP 2	28,50	7,89	Cisalhamento na alma
CP 3	33,20	9,20	Cisalhamento na alma
CP 4	29,20	8,09	Cisalhamento na alma
CP 5	32,20	8,92	Cisalhamento na alma
CP 6	29,30	8,12	Cisalhamento na alma
Média	30,38	8,42	
Desvio Padrão		0,52	
Coef. Variação		6%	

Observando a Tabela 7 nota-se que os seis corpos de prova ensaiados descolaram nas ligações, apresentando resultados inferiores aos demais, o que inviabiliza a utilização deste adesivo para manufatura das vigas I.

Analisando a Tabela 8 nota-se que apenas dois corpos de prova não apresentaram resistência confiável, inviabilizando a utilização desta resina nas uniões em vigas I.

6.2 ENSAIOS DE LIGAÇÕES

Neste item são realizadas as avaliações de resistência quanto ao comportamento das diferentes geometrias.

Os corpos de prova relativos às geometrias foram confeccionados todos com a mesma resina, sendo utilizado o adesivo CASCOPHEN RS-216-M, uma vez que este ensaio é destinado apenas para verificação quanto à resistência da geometria de ligação.

Todos os corpos de prova das geometrias retangular e em “V” romperam por cisalhamento na alma, conforme Figura 21(a) e os corpos de prova das geometrias com sulcos paralelos e inclinados, devido à diminuição da área de cisalhamento no entalhe da geometria, romperam na borda de ligação, conforme apresentado na Figura 21(b).



Figura 21. Ruptura dos corpos de prova, (21-a) ilustra a ruptura por cisalhamento na alma, (21-b) ilustra a ruptura na borda de ligação.

A Tabela 10 apresenta os resultados de carga aplicada, resistência, modo de ruptura do ensaio, desvio padrão e coeficiente de variação para os corpos de prova de geometria retangular.

Tabela 10 - Ensaio de resistência da ligação com geometria retangular.

(continua)

RETANGULAR	Carga (kN)	MPa	Modo de Ruptura
CP 1	26,00	7,20	Cisalhamento na alma
CP 2	33,30	9,22	Cisalhamento na alma
CP 3	26,60	7,37	Cisalhamento na alma
CP 4	33,50	9,28	Cisalhamento na alma

(conclusão)

RETANGULAR	Carga (kN)	MPa	Modo de Ruptura
CP 5	28,30	7,84	Cisalhamento na alma
CP 6	34,80	9,64	Cisalhamento na alma
Média	30,42	8,43	
Desvio Padrão		1,08	
Coef. Variação		13%	

A Tabela 11 apresenta os resultados de carga aplicada, resistência, modo de ruptura do ensaio, desvio padrão e coeficiente de variação para os corpos de prova de geometria em cunha com 7,6° de inclinação.

Tabela 11 - Ensaio de resistência da ligação com geometria em cunha.

LIGAÇÃO EM CUNHA	Carga (kN)	MPa	Modo de Ruptura
CP 1	26,60	7,37	Cisalhamento na alma
CP 2	29,60	8,20	Cisalhamento na alma
CP 3	28,50	7,89	Cisalhamento na alma
CP 4	28,70	7,95	Cisalhamento na alma
CP 5	28,10	7,78	Cisalhamento na alma
CP 6	29,30	8,12	Cisalhamento na alma
Média	28,47	7,89	
Desvio Padrão		0,29	
Coef. Variação		4%	

A Tabela 12 apresenta os resultados de carga aplicada, resistência, modo de ruptura do ensaio, desvio padrão e coeficiente de variação para os corpos de prova de geometria com sulcos paralelos de 2 mm de espessura cada.

Tabela 12 - Ensaio de resistência da ligação com geometria com sulcos paralelos.

SULCOS PARALELOS	Carga (kN)	MPa	Modo de Ruptura
CP 1	28,40	7,87	Borda de ligação
CP 2	29,20	8,09	Borda de ligação
CP 3	24,40	6,76	Borda de ligação
CP 4	26,90	7,45	Borda de ligação
CP 5	28,30	7,84	Borda de ligação
CP 6	27,90	7,73	Borda de ligação
Média	27,52	7,62	
Desvio Padrão		0,47	
Coef. Variação		6%	

A Tabela 13 apresenta os resultados de carga aplicada, resistência, modo de ruptura do ensaio, desvio padrão e coeficiente de variação para os corpos de prova de geometria com sulcos inclinados de 2 mm de espessura e inclinação de 4,6°.

Tabela 13 - Ensaio de resistência da ligação com geometria com sulcos inclinados.

SULCOS INCLINADOS	Carga (kN)	MPa	Modo de Ruptura
CP 1	26,20	7,26	Borda de ligação
CP 2	28,90	8,01	Borda de ligação
CP 3	26,50	7,34	Borda de ligação
CP 4	24,60	6,81	Borda de ligação
CP 5	28,70	7,95	Borda de ligação
CP 6	27,10	7,51	Borda de ligação
Média	27,00	7,48	
Desvio Padrão		0,45	
Coef. Variação		6%	

Na Figura 22 é apresentado um comparativo das geometrias analisadas com suas respectivas cargas médias de ruptura.

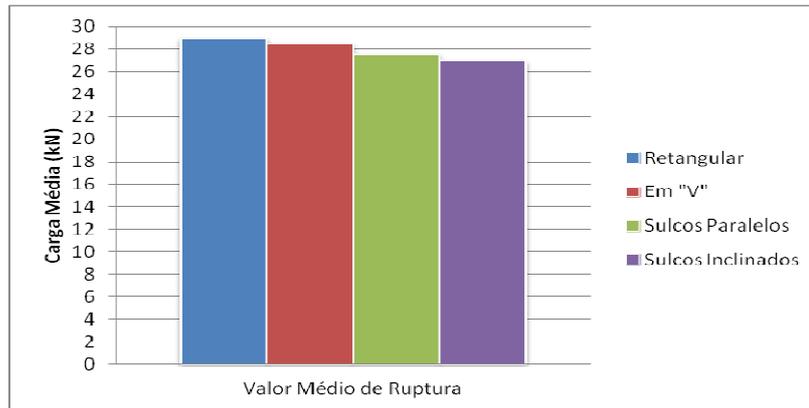


Figura 22 – Diagrama de carga média de ruptura

Analisando-se a Figura 22 nota-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: cisalhamento na alma ou na borda de ligação. Como as ligações apresentaram excelente eficiência de colagem a ruptura das geometrias retangular e em forma de “V” ocorreram por cisalhamento na alma, e, a diminuição da área de cisalhamento nas ligações das geometrias com sulcos paralelos e inclinados, devido ao entalhe dos sulcos, interferiu na resistência dessas emendas rompendo na borda de ligação, conforme Figura 23.

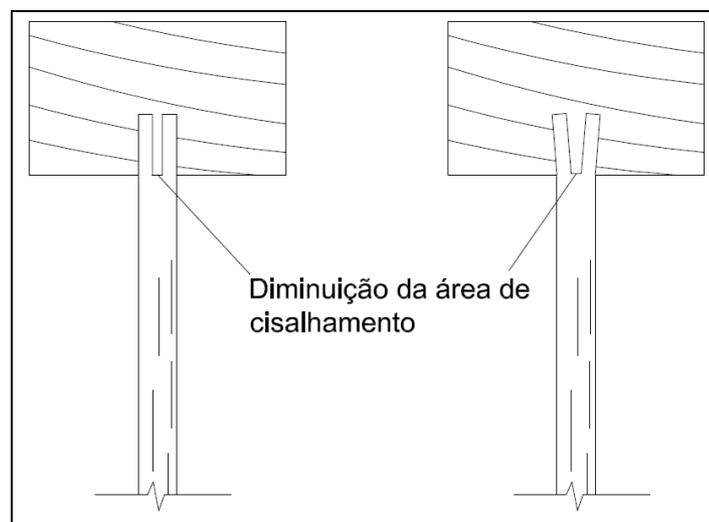


Figura 23 - Diminuição da área de cisalhamento em 33,3%.

7 CONCLUSÃO

Para a avaliação do comportamento mecânico das ligações, se faz necessário a realização de ensaios de laboratório para obter parâmetros de rigidez, resistência das ligações e desempenho de colagem.

Através dos ensaios foi possível identificar a característica de ruptura das peças, sendo a mesma por ruptura de ligação ou por cisalhamento na alma.

Os corpos de prova que romperam na ligação mesa/alma foram os produzidos com as resinas MSET EP (Pega lenta) e SIKADUR 32, pois os mesmos descolaram na emenda não atendendo as necessidades de rigidez nas ligações.

Como o OSB é um produto industrializado, isento de defeitos como nós e outros, suas propriedades estruturais variam pouco, possibilitando uma estimativa de cálculo e resistência das vigas. Assim, os corpos de prova que apresentaram ruptura por cisalhamento na alma obtiveram uma rigidez de ligação confiável e, portanto, as resinas, CASCOPHEN RS-216M, COMPOUND (fluido), COMPOUND (Gel), RHEOPOX (Média fluidez), MSET EP (Pega normal) e SIKADUR 32 (Gel) apresentaram resistência satisfatória;

A trabalhabilidade da resina é fundamental para a produção das vigas e qualidade das ligações. Todos os adesivos com base epóxi apresentaram dificuldades na aplicação, devido à fluidez dos mesmos. A possibilidade de utilização de pincel para aplicação da resina CASCOPHEN tornam essa a melhor opção, garantindo facilidade de confecção dos corpos de prova, mantendo alto desempenho e confiabilidade da ligação.

As geometrias retangular e em forma de “V” apresentaram resultados satisfatórios com ruptura por cisalhamento na alma, força média de 30,42 kN e 28,47 kN e tensão média de 8,43 MPa e 7,89 MPa, respectivamente. As geometrias com sulcos paralelos e inclinados romperam por cisalhamento do OSB próximo a borda de ligação, com força média de 27,52 kN e 27,00 kN e tensão média de 7,62 MPa e 7,48 MPa.

As geometrias retangular e em forma de “V” apresentaram desempenhos superiores às geometrias com sulcos e também, dando destaque a geometria em “V” que apresentou maior praticidade de montagem devido ao formato de encaixe, facilitando a confecção e diminuindo o custo de manufatura em linha de produção.

O reforço feito na alma apresentou importância significativa para os ensaios dos corpos de prova de ligação, impedindo o esmagamento da alma quando solicitado o carregamento e apresentando resultados esperados quanto ao cisalhamento da alma.

REFERÊNCIAS

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

AZAMBUJA, M.; OLIVEIRA JUNIOR, S. F.; DIAS, A. A. **Análise estatística comparativa entre adesivos poliuretanos frente ao resorcinol-formaldeído aplicados em emenda dentada estrutural para espécie eucalyptus grandis**. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, (2006).

BERGLUND, L., ROWELL, M. R. Wood composites. **Royal Institute of Technology, Stockholm**, Sweden and **USDA Forest Products Laboratory**, Madison, WI. p. 283-284. 2005.

CARNEIRO, R. P. **Colagem de junta de madeira com adesivo epoxi**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

ENGINEERED WOOD ASSOCIATION. Engineered Wood System. **APA Understanding Engineered Wood Products – Construction Guide**. Form N° E30. 2007. Disponível em: <http://www.apawood.org/woodu/secure/101/unit_one/1unit1_story.cfm>. Acesso em: 29 de jan. de 2010.

ENGINEERED WOOD ASSOCIATION. Engineered Wood System. **APA Performance rated I-Joist**. Form N° EWS Z725B. 2009. Disponível em: <<http://www.apawood.org/pdfs/managed/Z725.pdf>>. Acesso em: 28 de jan. de 2010.

ENGINEERED WOOD PRODUCTS, **Prefabricated Wood I – Joists**, Canadian Wood Council. Disponível em: <<http://www.cwc.ca/NR/rdonlyres/35C376ED-F20A-43EB-8405-D70C452CAB68/0/EngineeredWoodProducts.pdf>>. Acesso em: 29 de mai. de 2010.

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

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.

HEXION QUÍMICA, **Boletim Técnico RESINA À BASE DE RESORCINOL-FORMOL**. Curitiba, 2011. Disponível em: <http://www.industriabrasileira.com/empresas/hexion_quimica_industria_e_comercio ltda>. Acesso em: 15 março 2011.

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

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

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

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

MACÊDO, A. N., **Estudo de emendas dentadas em madeira laminada colada (MLC): avaliação de método de ensaio – NBR 7190/1997**. Cadernos de Engenharia de estruturas, São Carlos, n.7, p. 1-23, 1999.

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

MENDES, L. M., IWAKIRI, S. I., MATOS, J. L. M., KEINERT Jr., SALDANHA, L. K. Avaliação do sistema de orientação de partículas na produção de painéis OSB. **Cerne**, v.6, n.1, p.1-8, 2000.

MENDES, L. M. et al. OSB – Opção no Mercado. **Revista da Madeira: (ABPM)**, Curitiba, ano12, Edição Especial. p. 82-86, 2003.

MSET, **Boletim Técnico adesivo à base de epóxi**, (2011). Disponível em: <<http://www.mset.com.br/uploads/produtos/fichatecnica/46mset-eppl.pdf>>. Acesso em: 05 maio 2011.

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.

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

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

RHEOSET, **Boletim Técnico adesivo epóxi**, (2011). Disponível em: < <http://www.rheoset.com.br/hotsite/fichas-tecnicas/rheopox.pdf>>. Acesso em: 05 maio 2011.

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

SANTOS, A. M DE L. **Avaliação teórica e experimental de vigas em “I” Pré-fabricadas de madeira com flange de painéis de lâminas paralelas (LVL) e alma de painéis de partículas orientadas (OSB) e compensado.** 2008. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

SANTOS, A. M. L., MENEZZI, C. H. S. DEL., BORTOLETTO, Jr. G. Comportamento teórico e experimental de vigas de madeira em perfil I: Efeito do tipo de alma na resistência, rigidez e deslocamento vertical. **SCIENTIA FORESTALIS**, Piracicaba – SP, v.37, n.82, p. 131-141, jun. 2009.

SIKA Brasil, **Boletim Técnico Adesivo estrutural à base de epóxi**, (2011). Disponível em: < <http://br01.webdms.sika.com/fileshow.do?documentID=47>>. Acesso em: 18 março 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.

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

USPO, United State Patent Office. (Indiana). Knight, Eugene V., Wooden Beam. Pat. No. 1,377,891, 22 mar. 1918, 10 maio 1921.

USPTO, United State Patent and Trademark Office. (Alexandria). Keller, James R., Nickerson William A., Fabricated Wood Beam. Pat. No. 4,074,498, 05 nov. 1976, 21 fevereiro 1978.

USPTO, United State Patent and Trademark Office. (Alexandria). Keller, James R., Nickerson William A., Fabricated Wood Structural Member. Pat. No. 4,195,462, 24 abr. 1978, 01 abril 1980.

USPTO, United State Patent and Trademark Office. (Alexandria). Lionel, L. Brightwell., Wooden Joist with web members having cut tapered edges and vent slots. Pat. No. 4,715,162, 06 jan. 1986, 29 dezembro 1987.

VEDACIT, **Boletim Técnico adesivo estrutural Compound**, (2011). Disponível em: <<http://www.vedacit.com.br/component/content/article/82-adesivos-base-epoxi/35-compound-adesivo-gel?directory=75>>. Acesso em: 05 maio 2011.

WIJMA (**Wood I-Joist Manufacturers Association**), (2001). Disponível em: <<http://www.i-joist.org/benefits.asp>>. Acesso em: 02 junho 2010.