

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

FERDINANDO MIGUEL RUIS SALINAS

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE VIGAS COMPOSTAS DE MADEIRA
PARAFUSADAS COM SEÇÃO I**

CAMPO MOURÃO

2023

FERDINANDO MIGUEL RUIS SALINAS

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE VIGAS COMPOSTAS DE MADEIRA
PARAFUSADAS COM SEÇÃO I**

Experimental analysis of screwed timber built-up I Beams

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes.

CAMPO MOURÃO

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

FERDINANDO MIGUEL RUIS SALINAS

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE VIGAS COMPOSTAS DE MADEIRA SERRADA
COM SEÇÃO I**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 21 de novembro de 2023

Jorge Luís Nunes de Góes

Doutorado

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – *Campus Campo Mourão*

Ana Flavia Canales

Mestrado

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – *Campus Campo Mourão*

Fabiana Goia Rosa De Oliveira

Doutorado

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – *Campus Campo Mourão*

CAMPO MOURÃO

2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus familiares pelo incentivo, compreensão e toda positividade durante este trajeto.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes por todo seu empenho, além de excelente orientação, conselhos e amizade.

Aos meus colegas, em especial à minha grande amiga, Débora Kimberly Tavares Santana, por toda amizade, companheirismo, apoio e parceria durante a realização do presente trabalho.

Por fim, gostaria de agradecer ao técnico de laboratório Fábio Kruger por todo auxílio oferecido durante a realização dos ensaios.

RESUMO

No atual cenário mundial, sustentabilidade vem ganhando espaço e notoriedade, levando a madeira a receber posição de destaque, juntamente com os produtos engenheirados, onde a madeira é utilizada de modo racional. As vigas compostas em especial possuem ampla aplicação como material estrutural, tendo como principais vantagens o baixo custo e a facilidade de execução. Este trabalho tem como objetivo avaliar a resistência e rigidez das ligações de vigas compostas de madeira, utilizando parafusos autoatarraxantes inclinados a 45°. Através de corpos de prova de ligação e protótipos de viga em escala natural, avaliou-se de forma experimental a eficiência da ligação por parafusos citada. Os resultados experimentais demonstraram que existe influência da rigidez das ligações no comportamento das vigas compostas. Além disso, se comparada à ligação por pregos, de maneira geral, obteve-se módulo de deslizamento semelhante, já em relação a força de ruptura média, apresentou valores superiores às duas dimensões de pregos apresentados para comparação.

Palavras-chave: peças compostas; rigidez de ligações; vigas de madeira; módulo de deslizamento.

ABSTRACT

In the current global scenario, sustainability is gaining space and notoriety, leading wood to receive a prominent position, along with engineered products, where wood is used in a rational way. Composite beams in particular have wide application as structural material, with its principal advantages being low cost and ease of execution. This work aims to evaluate the resistance and stiffness of composite wooden beam connections, using self-tapping screws inclined at 45°. Using connection test specimens and full-scale beam prototypes, the efficiency of the aforementioned screw connection was experimentally evaluated. The experimental results demonstrated that there is an influence of the stiffness of the connections on the behavior of composite beams. Furthermore, if compared to nails connection, in general, a similar slip modulus was obtained, and when it comes to the average rupture force, it presented higher values than the two nail dimensions presented for comparison.

Keywords: built-up system; fasteners rigidity; wooden beams; slip modulus.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Exemplo de compensado	18
Figura 2 - Exemplo de OSB	19
Figura 3 - Exemplo de MLC e suas respectivas zonas	20
Figura 4 - Exemplo de LVL (Laminated Veneer Lumber)	21
Figura 5 - Exemplo de MLCC (Madeira Lamelada Colada Cruzada)	22
Figura 6 - Exemplos de configuração de seções transversais compostas solidarizadas continuamente	22
Figura 7 - Tipos de vigas compostas	23
Figura 8 - Exemplos de ligações tradicionais em madeira	25
Figura 9 - Soluções de reforço	26
Figura 10 - Exemplo de ligação colada	27
Figura 11 - Exemplos de pregos	28
Figura 12 - Exemplo de parafuso autoatarraxante e diferentes cabeças	29
Figura 13 - Exemplo de parafuso passante com porca	30
Figura 14 - Exemplo de cavilhas	31
Figura 15 - Exemplo de anel metálico	32
Figura 16 - Exemplo de placa metálica	32
Figura 17 - Exemplo de placa dentada	33
Figura 18 - Ligações de elementos de madeira com parafusos de rosca soberba	36
Figura 19 - Comparação entre valores médios experimentais e teóricos da capacidade de carga de parafusos em diversos ângulos parafusos em diversos ângulos.....	44
Figura 20 - Comparação 1.....	45
Figura 21 - Comparação 2.....	45
Figura 22 - Disposição dos parafusos.....	50
Figura 23 - Corpos de prova para ensaio de umidade e densidade	52
Figura 24 - Ensaio de compressão paralela às fibras	53
Figura 25 - Dimensões do corpo de prova	54
Figura 26 - Ensaio de ligação	54
Figura 27 - Ensaio do parafuso	55
Figura 28 - Dimensões do parafuso.....	56
Figura 29 - Montagem do ensaio de flexão estática para caracterização das peças	57
Figura 30 - Ensaio de flexão em peça de alma	57
Figura 31 - Ensaio de flexão em peça de mesa	58
Figura 32 - Montagem da viga composta	59
Figura 33 - Instalação de conectores na viga	59
Figura 34 - Viga após finalização da montagem.....	60
Figura 35 - Esquema de carregamento da viga composta.....	61
Figura 36 - Viga composta posicionada para ensaio	61
Figura 37 - Viga composta após ruptura	62
Figura 38 - Rompimento do corpo de prova	65
Figura 39 - Viga após ensaio destrutivo.....	68
Figura 40 - Deslizamento entre as peças da viga composta	69

Quadro 1 - Modos de falha e equações para ligações de elementos de madeira com pinos	36
Quadro 2 - Modos de falha e equações para ligações de elementos de madeira com pinos	38
Quadro 3 – Dados de projeto das vigas compostas	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de K_{ser} para conectores em N/mm.....	34
Tabela 2 - Resultados dos ensaios de ligação	40
Tabela 3 - Dados de projeto das vigas compostas	50
Tabela 4 - Dimensões dos corpos de prova de umidade e densidade	52
Tabela 5 - Dimensões dos corpos de prova de compressão paralela às fibras	53
Tabela 6 - Resultados dos ensaios umidade	63
Tabela 7 - Resultados dos ensaios densidade	63
Tabela 8 - Resultados dos ensaios de compressão.....	64
Tabela 9 - Resultados dos ensaios de ligação	64
Tabela 10 - Resultados dos ensaios de tração dos parafusos.....	66
Tabela 11 - Módulo de elasticidade das peças individuais das vigas compostas	66
Tabela 12 – Resultado do ensaio de flexão da viga composta 1	67
Tabela 13 - Resultado do ensaio de flexão da viga composta 2	67
Tabela 14 - Comparação de rigidez das vigas	69
Tabela 15 - Comparação de rigidez das vigas	70

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo Geral	15
2.2	Objetivos Específicos	15
3	JUSTIFICATIVA.....	16
4	REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
4.1	Vigas Compostas de Madeira.....	17
4.2	Ligações.....	24
4.2.1	Tipos de Ligação	24
4.2.2	Rigidez de ligações	33
4.2.3	Resistência de ligações.....	35
4.3	Comportamento estrutural de vigas compostas	39
4.3.1	Método analítico de cálculo	46
5	MATERIAIS E MÉTODOS	49
5.1	Descrição dos materiais utilizados.....	49
5.2	Procedimentos de experimentação	51
5.3	Ensaio de caracterização da madeira.....	52
5.4	Ensaio de ligações	53
5.5	Ensaio dos parafusos	55
5.6	Ensaio de flexão estática para caracterização.....	56
5.7	Montagem das vigas compostas	58
5.8	Ensaio das vigas compostas.....	60
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	63
6.1	Ensaio de caracterização da madeira.....	63
6.2	Ensaio de ligações	64
6.3	Ensaio dos parafusos	65
6.4	Ensaio preliminares de flexão estática.....	66
6.5	Ensaio das vigas compostas.....	66
7	CONCLUSÃO	71
	REFERÊNCIAS.....	72

1 INTRODUÇÃO

A madeira é um dos produtos naturais mais notáveis existentes e tem sido usada pelo ser humano há milhares de anos. Com o desenvolvimento das civilizações no mundo antigo, a madeira desempenhou um importante papel na rotina da população, com crescente demanda do material para edificações, combustível, construção de navios, etc (Niemz, Teischinger e Sandberg, 2023).

Atualmente, no âmbito da construção civil, a madeira possui diversas vantagens se comparada a outros materiais, como o fato de ser isolante térmico e acústico, arquitetonicamente atrativa, de fácil manuseio e ligação, entre outros fatores que justificam destaque do material em âmbito comercial (Silva, 2010).

Tamanhas vantagens levaram ao uso desenfreado do recurso natural e como consequência de mudanças ambientais devastadoras, que foram acompanhadas com escassez massiva de madeira, em 1713, Hans Carl von Carlowitz desenvolveu o conceito de sustentabilidade com o replantio de áreas florestais desmatadas para garantir produção de quantidade suficiente de madeira para o futuro (Niemz, Teischinger e Sandberg, 2023).

Aliada a política de reflorestamento, a importância do melhor aproveitamento da madeira recebe notoriedade, levando então a criação de produtos “engenheirados”, onde a madeira é utilizada de modo racional, oriunda preferencialmente de reflorestamento, com índices de crescimento superiores aos das madeiras de lei (Silva, 2010).

No Brasil, a construção civil mostra-se ainda carente de soluções tecnológicas que permitam unir segurança, qualidade, conforto, custo e durabilidade. Em oposição a esta situação, o país é um dos maiores produtores mundiais de mercadorias como madeira compensada, onde são exportados produtos de qualidade para outros países com finalidade de uso na construção civil, enquanto dentro de seu território, a maior utilização deste material se restringe à estruturas provisórias, como formas para concreto, o que leva ao desperdício do grande potencial de estruturas compostas como alternativa para estruturas de madeira maciça, concreto e aço (Stamato, 2002). Contudo, esta temática caminha para ganhar notoriedade em diversas instituições de pesquisa, com o objetivo de gerar subsídios com a finalidade de viabilizar a popularização desta prática entre os profissionais ligados à construção de estruturas de madeira e a população em geral (Magalhães, 2005).

A utilização de peças compostas de madeira, formadas pela união de peças de menores dimensões, tem relevância no setor de estruturas de madeira do país, principalmente por possibilitar a obtenção de maiores seções transversais a partir de peças com dimensões comerciais (Góes, 2002). As vigas com seção transversal “I”, que são objeto de estudo do presente trabalho, destacam-se de vigas de seção retangular por sua geometria resultar em perfis mais leves e com maior relação de resistência por peso, levando à otimização do uso do material. Relação que é ainda maior ao utilizar madeira serrada, que já apresenta esta razão de resistência e peso elevada em relação a outros materiais (Silva, 2010).

Nesse contexto, ligações por pinos metálicos permitem deslizamento entre as peças conectadas, sendo este, função da rigidez da ligação e pode levar a uma redução nas propriedades de resistência e rigidez da peça composta. Portanto, é caracterizada a importância de quantificar a rigidez das ligações para as peças compostas. É sabido que a rigidez é influenciada por diversos fatores, entre eles se menciona o tipo, espaçamento e número de elementos de ligação, além das propriedades físicas, de resistência e elasticidade da espécie de madeira utilizada. Assim, uma compreensão clara do comportamento das ligações é essencial para implementar métodos mais racionais para cálculos estruturais (Góes, 2002).

2 OBJETIVOS

Neste capítulo serão apresentados o objetivo geral e objetivos específicos do presente trabalho.

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como finalidade avaliar a resistência e rigidez de peças compostas de madeira, utilizando parafusos autoatarraxantes inclinados.

2.2 Objetivos Específicos

Para cumprir com o objetivo geral, se estabelecem como objetivos específicos:

- Realizar testes de caracterização das ligações parafusadas em corpos de prova tipo *push-out*;
- Realizar ensaios de flexão em protótipos de vigas de madeira parafusada de seção composta I;
- Comparar os resultados obtidos com os resultados de outros pesquisadores.

3 JUSTIFICATIVA

O atual cenário global requer a busca de proposições que garantam desenvolvimento sustentável, e a madeira, por ser um excelente fixador de carbono, além de verdadeiramente renovável e reaproveitável, possui requisitos de extrema importância para atenuar impactos ambientais causados pela área da construção civil no Brasil e no mundo.

Apesar de os sistemas construtivos baseados no uso da madeira não serem tão desenvolvidos no Brasil, se comparado com países da América do Norte e Europa, são atualmente realizados trabalhos científicos que visam tornar mais acessível e popular esse nobre material na área de estruturas, como solução ecológica, sustentável e eficiente.

As vigas de madeira parafusada de seção composta “I” consistem em um sistema construtivo simples e eficiente, que utiliza materiais amplamente produzidos no País. Esse sistema apresenta uma ótima alternativa para a modernização de estruturas no País, e, para tanto, devem ser utilizados critérios de dimensionamento específicos para essas estruturas.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção será explicado de forma detalhada as características de seções compostas de madeira, suas vantagens em relação a peças maciças, geometrias, e materiais comumente utilizados na montagem destes elementos, além dos variados tipos de conectores, abordando suas características e por fim, o comportamento estrutural de peças compostas, conceituando obras de diversos autores e suas teorias.

4.1 Vigas Compostas de Madeira

A redução considerável dos estoques de madeira e a necessidade de racionalização de seu uso são alguns fatores que estimulam o desenvolvimento de novas soluções estruturais, mantendo a beleza do material original e podendo até mesmo aumentar seu desempenho, evitando o consumo desnecessário. Assim, os produtos derivados de madeira têm propiciado novos campos de aplicação, pois apresentam comportamento compatível com as atuais exigências tecnológicas do mercado da construção civil (Miotto, 2009).

Além disso, as seções de peças de madeira maciça comercialmente disponíveis na atualidade possuem dimensões limitadas, podendo ter esta condição contornada pelo uso de peças compostas, que, ao serem solicitadas atuam como um elemento único, afirma Szücs *et al.* (2015).

Segundo Góes (2002), as vigas compostas são elementos estruturais essencialmente sujeitos a solicitação de flexão, compostos por duas ou mais partes justapostas. As peças compostas têm diversas funcionalidades, o que as torna utilizáveis nos mais diversos tipos de construção. Entre as mais importantes, destacam-se a possibilidade de alcançar grandes vãos com a utilização de peças menores, maior aproveitamento da madeira, menor tempo de secagem em relação a peças maciças e menor probabilidade da ocorrência de defeitos.

Magalhães (2005) apresenta que nos sistemas compostos, a distância entre as mesas proporciona maior rigidez em relação à flexão. As almas possuem função de resistir majoritariamente à força cortante e as ligações possuem função de transmitir os esforços entre as mesas e as almas, resistindo ao cisalhamento, principalmente na direção longitudinal.

As seções transversais podem ser compostas pela madeira em sua forma bruta ou derivados de madeira, processados industrialmente. A Associação de Madeira Engenheirada - APA (2010) apresenta diversos produtos a serem usados nestas seções. Dentre eles estão o compensado, painéis de foco unidirecionados, OSB (Oriented Strand Board), MLC (Madeira Lamelada Colada) e LVL (Laminated Veneer Lumber). Além dos citados acima, Hammad *et al.* (2022) empregam em seu trabalho o uso de vigas compostas de seção I, com mesa em MLCC (Madeira Lamelada Colada Cruzada) e alma em LVL e MLC.

Niemz, Teischinger e Sandberg (2023) apontam que o compensado, demonstrado na Figura 1, em análise quantitativa, é o produto laminado de madeira mais importante no mercado, com sua utilização sendo principalmente na construção civil e fabricação de móveis. É um material constituído por, pelo menos, três folhas empilhadas e revestidas com adesivos, são produzidos sob pressão e normalmente também sob altas temperaturas.

Figura 1 - Exemplo de compensado

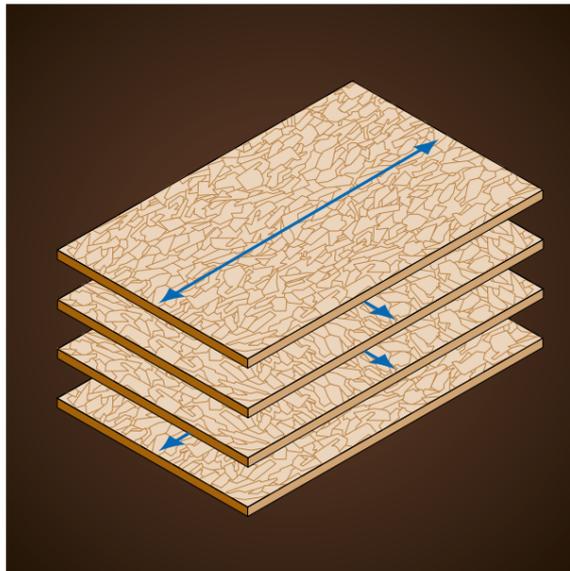


Fonte: APA (2010)

Segundo Porteous e Kermani (2007), O OSB, demonstrado na Figura 2, é um painel estrutural fabricado a partir de múltiplas camadas de fibras finas, flocos ou lascas de madeira que são coladas sob calor e pressão. As fibras nas camadas externas são alinhadas em paralelo ao comprimento e largura do painel, já as camadas internas são geralmente compostas de fibras orientadas aleatoriamente.

A sua resistência deve-se principalmente à sua composição em múltiplas camadas de orientação cruzada. Niemz, Teischinger e Sandberg (2023) dizem que o OSB é normalmente utilizado na construção de edifícios, como revestimento e na composição de elementos pré-fabricados, como vigas, paredes e painéis de telhado.

Figura 2 - Exemplo de OSB



Fonte: APA (2010)

Já o MLC, como relatam Niemz, Teischinger e Sandberg (2023), é um produto engenheirado de madeira, com principal função sendo estrutural, que consiste em múltiplas laminações de seções de madeira serrada pré-processada e de elevada resistência mecânica. Com dimensões padronizadas e grande variedade de seções transversais, perfis, formas, curvaturas e comprimentos, como mostra a Figura 3, que podem ser produzidos com características pré-definidas de resistência, rigidez e aparência. É usada majoritariamente como membro primário no suporte de carga em vários tipos de edifício, assim como incorporada em projetos arquitetônicos com finalidades estéticas.

Em geral, algumas de suas características significativas são capacidade de vencer grandes vãos sem a necessidade de suporte intermediário, utilização eficiente de recursos, capacidade de obter-se elementos com formas curvas e cônicas, capacidade de projetar elementos estruturais com diferentes dimensões e configurações de seção transversal, alta precisão dimensional, estabilidade e capacidade de otimizar o uso da madeira, utilizando material de melhor qualidade nas regiões externas, onde ocorre maior estresse em vigas e material de menor qualidade

nas regiões internas, além de baixa variabilidade nas propriedades físicas devido ao efeito de laminação e homogeneização do elemento.

Figura 3 - Exemplo de MLC e suas respectivas zonas



Fonte: APA (2010)

Segundo Porteous e Kermani (2007), o LVL, demonstrado na Figura 4, é um composto de lâminas de madeira utilizando adesivos como ligante. As lâminas são finas, de maneira semelhante às utilizadas no compensado, porém, estas estão todas orientadas na direção vertical, o que gera propriedades ortotrópicas semelhantes à madeira serrada livre de defeitos. Alguns fabricantes utilizam algumas lâminas na direção perpendicular às demais com objetivo de aumentar a resistência mecânica da peça.

Figura 4 - Exemplo de LVL (Laminated Veneer Lumber)



Fonte: Niemz, Teischinger e Sandberg (2023)

Niemz, Teischinger e Sandberg (2023) afirmam que o MLCC, demonstrado na Figura 5, é também um produto de madeira engenheirada, pré-fabricado predominantemente em forma de placas, que consistem em pelo menos três camadas de madeira serrada unidas ortogonalmente. As camadas cruzadas fornecem alta estabilidade dimensional no plano, com capacidade de suportar grandes carregamentos, enquanto o efeito de homogeneização reduz a variabilidade nas propriedades do material, se comparado à madeira maciça.

É um material fácil de lidar como elemento estrutural, além de ter boas propriedades de resistência e rigidez. Ao oferecer a possibilidade de utilizar-se grandes dimensões, abriu novos mercados para madeira engenheirada, permitindo arquitetos e engenheiros criarem edifícios de madeira economicamente mais viáveis, onde os painéis são pré-fabricados com aberturas para portas, janelas, escadas e tubulações, sendo enviados já prontos ao canteiro de obras, assim tornando o processo mais eficiente.

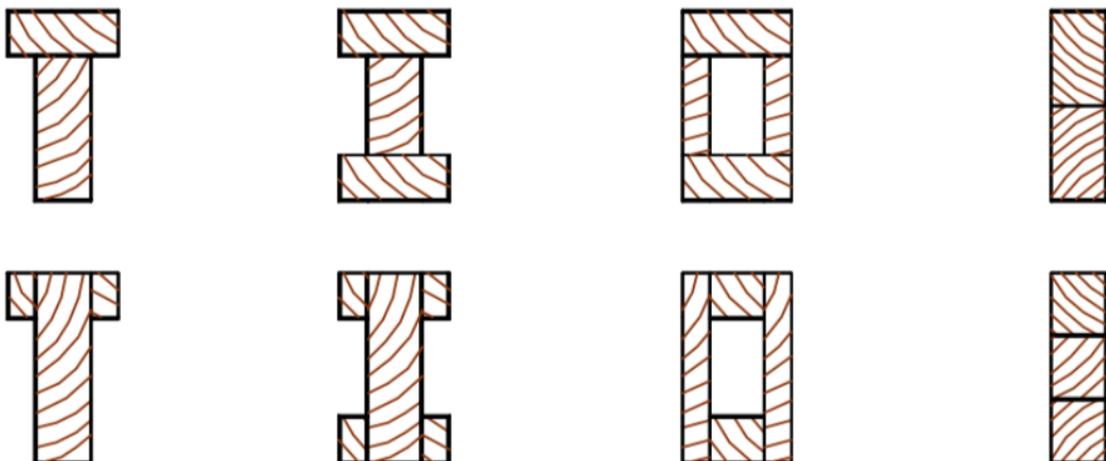
Figura 5 - Exemplo de MLCC (Madeira Lamelada Colada Cruzada)



Fonte: APA (2019)

Góes (2002) afirma que as vigas podem ter várias formas como por exemplo as seções T, I, Caixão, ou retangular solidarizadas continuamente, como na Figura 6. As três primeiras formas de seção transversal são usualmente unidas por pinos metálicos, em especial os pregos ou parafusos. Já as peças de seção retangular utilizam diferentes tipos de conectores, onde os mais recorridos são os anéis metálicos, tarugos metálicos e tarugos de madeira.

Figura 6 - Exemplos de configuração de seções transversais compostas solidarizadas continuamente



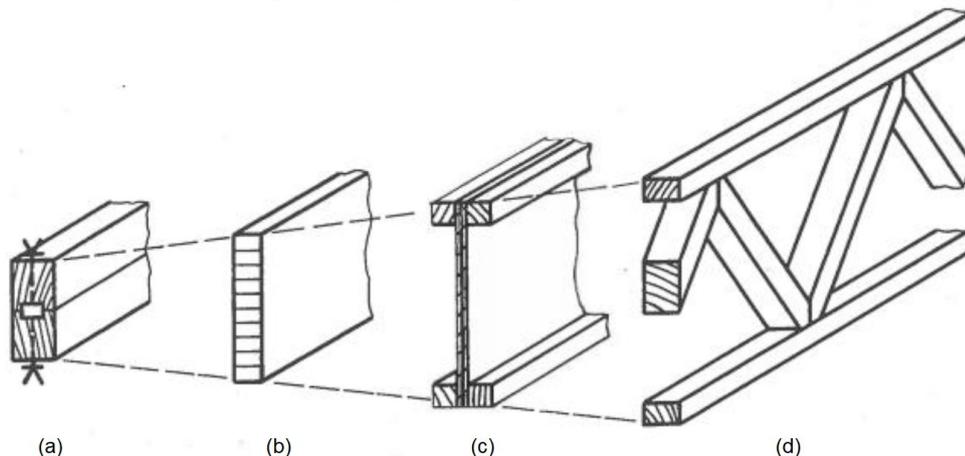
Fonte: Góes (2002)

As vigas em seção I serão justamente as estudadas neste trabalho, e a seu respeito, LEICHTI *et al.* (1990) informam que já em 1920, os pioneiros da indústria aeroespacial discutiam o valor estrutural deste tipo de elemento, e ainda são utilizados em plataformas e outros fins. A revista REMADE (2003) apresenta que na década de 1960, já no ramo da construção civil, empresários norte-americanos colocaram no mercado vigas compostas de madeira em seção I, que representavam um produto capaz de suportar maior carga em relação ao seu próprio peso do que qualquer outro material existente na época. As vendas do produto explodiram rapidamente, e o sucesso foi atribuído à leveza do produto, alta resistência e capacidade de vencer grandes vãos, tornando-o uma alternativa ideal às vigas maciças de madeira.

Silva (2010) destaca alguns benefícios da utilização de vigas compostas de seção I, como ausência de meios pesados de transporte vertical e a possibilidade de serem feitas aberturas nas almas para passagem de tubulação e condutos, além de que em uma comparação com vigas de seção retangular de mesma dimensão, a diminuição de inércia é menor do que a perda de volume de material, portanto é comprovado que a viga em seção “I” é mais leve e eficiente por ter sua relação resistência/peso maior.

Góes (2002) aponta algumas composições de vigas, como mostrado na Figura 7.

Figura 7 - Tipos de vigas compostas



Fonte: Góes (2002)

A viga composta de madeira maciça (Figura 7-(a)), são comumente utilizadas em todas as formas geométricas citadas anteriormente na Figura 7 e serão o objeto de estudo deste trabalho. As que utilizam a madeira lamelada colada (Figura 7-(b)),

possibilita a utilização de diversas dimensões, tendo maior gama de finalidades, além disso, são pré-fabricadas, garantindo ao produto maior confiabilidade e controle de qualidade. As vigas compostas com alma esbelta (Figura 7-(c)) são boas soluções para coberturas em geral, apresentando leveza e facilidade de construção. As mesas geralmente são feitas de madeira serrada, já a alma é confeccionada de diversos materiais como derivados de madeira, compensado e OSB. Vigas em treliça (Figura 7-(d)) tem utilidade recomendada para enfrentar maiores vãos, onde sua composição pode ser de madeira serrada ou MLC e suas ligações adesivas ou mecânicas, tendo como finalidade geralmente o emprego em coberturas.

4.2 Ligações

Neste tópico serão abordados os tipos de ligações, divididas em tradicionais, coladas e mecânicas, demonstrando suas características e a influência que sua rigidez e resistência exercem nas peças compostas de madeira.

4.2.1 Tipos de Ligação

Stamato e Calil (2002) afirmam que devido ao forte desenvolvimento de novos materiais, sistemas construtivos e estruturais, surge a necessidade de estudos a respeito de ligações entre elementos compostos, tendo em vista que as transmissões de esforços e deformações na estrutura dependem em grande parcela do comportamento dessas ligações.

Cruz (2016) ressalta que ao dimensionar uma estrutura de madeira, o cálculo de ligações é sempre o que requer maior atenção e cuidado do projetista. Nessas estruturas existe uma limitação de deformação e rotação, assim sendo, é de grande valia uma boa escolha do tipo de conector adotado, visando economia e viabilidade.

Madsen (1998) aponta alguns requisitos para o uso adequado de ligações em peças de madeira, sendo elas:

- Resistência: As ligações devem ser capazes de transferir os esforços de um elemento a outro. As forças de tração, bem como as de compressão podem ocorrer paralela e perpendicularmente às fibras. Os esforços de cisalhamento também devem ser considerados;
- Deformação: As deformações que ocorrem nas ligações (também chamadas de deslizamento) exigem uma abordagem mais rigorosa,

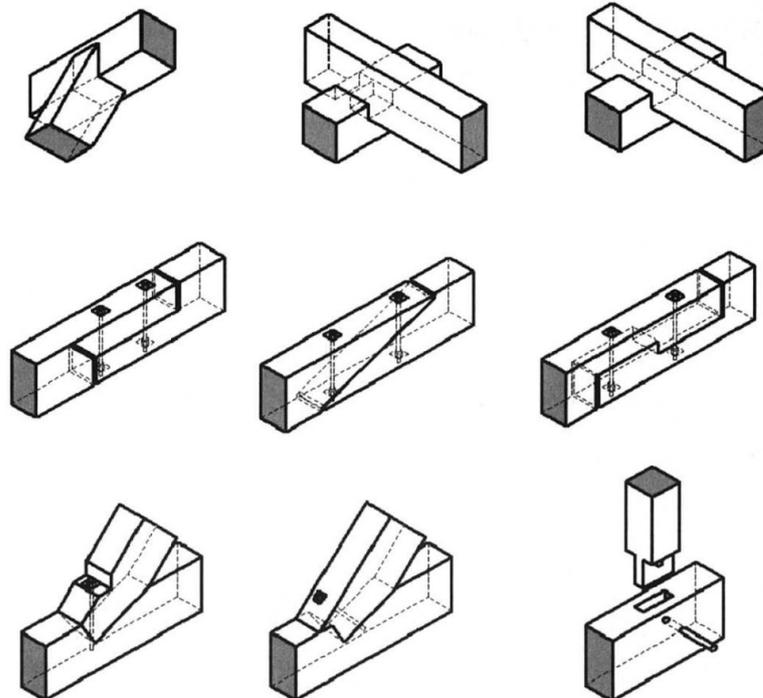
incluindo efeitos de longa duração (fluência). Existem poucas informações sobre fluência em conectores, porém é algo que contribui significativamente para o desempenho geral da estrutura;

- Inversão do sentido de forças: Fenômeno que coloca graves limites sobre os tipos de estrutura que podem ser construídos com métodos de conexão tradicionais, pois a maioria destes suportam esforços apenas em uma direção;
- Modo de ruptura: O modo de ruptura dúctil é preferido em relação a frágil, pois são mais previsíveis e conseguem absorver energia.

Para melhor atender as especificações acima citadas, deve-se distinguir as diferentes soluções de ligação para diferentes tipos de esforços. Cruz (2016) as define como ligações tradicionais, ligações coladas e ligações mecânicas.

Ligações tradicionais são a primeira forma de ligação existente. Elas surgiram com a necessidade da criação de estruturas com maior estabilidade, com transferência adequada de esforços entre elementos.

Figura 8 - Exemplos de ligações tradicionais em madeira



Fonte: Thelandersson e Larsen (2003)

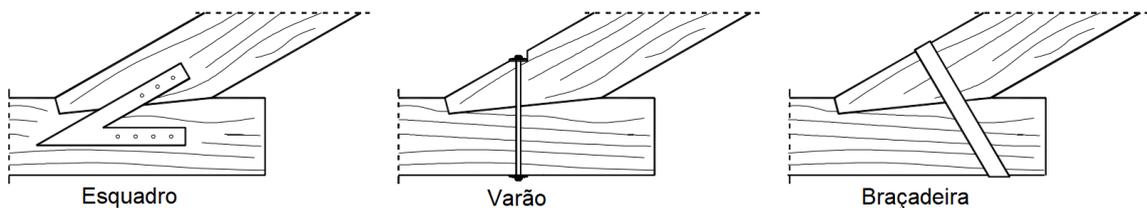
As ligações tradicionais demonstradas na Figura 8, consistem em entalhes em madeira-madeira, possuem certa variabilidade, pois são realizadas por

carpinteiros, dependendo de fatores como profissional, ferramentas, formatos e técnicas utilizadas para o resultado final. Eram comumente utilizadas em coberturas na ligação de asnas, contudo, com seu desenvolvimento, hoje são utilizadas em estruturas de maior porte, vencendo maiores vãos.

A ABNT NBR 7190:2022 aponta que nessas ligações é necessário verificar a resistência à compressão no contato, nos dois elementos, levando em conta a inclinação dessa compressão em cada peça. É necessário também avaliar os esforços de cisalhamento na região das ligações. Se as peças possuírem seções reduzidas pelos entalhes, os esforços solicitantes devem ser verificados levando em conta a redução.

Neste tipo de ligação, é comum o uso de ferragens com finalidade de impedir o deslocamento dos elementos para fora do plano. Na Figura 9 observa-se os tipos de ferragem mais utilizados, sendo eles o esquadro metálico, varão interior e braçadeira metálica.

Figura 9 - Soluções de reforço



Fonte: Thelandersson e Larsen (2003)

Segundo Magalhães (2005) para vigas compostas, esse tipo de ligação não é utilizado, pois existem esforços de tração que não podem ser absorvidos pelo fato da ligação se constituir apenas de contato entre as superfícies das peças.

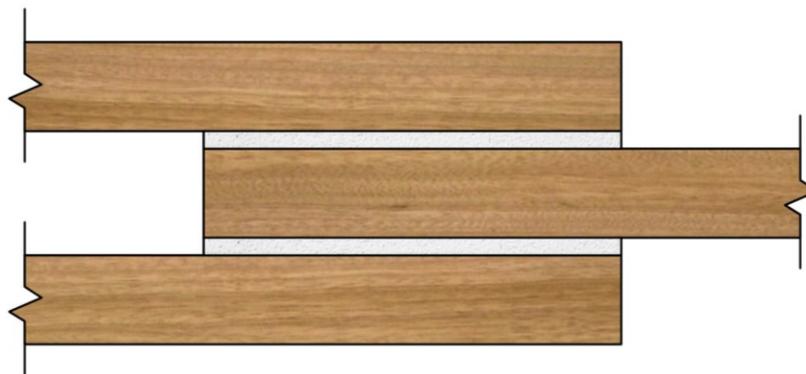
Ligações coladas (Figura 10), como o nome sugere, fazem a transmissão de esforços por meio de adesivos. Silva (2009) aponta algumas vantagens a respeito do uso deste tipo de ligação, como o fato de ser capaz de distribuir a carga aplicada por toda a superfície de contato, e ao ter-se uma maior distribuição de tensões provoca pouco ou até mesmo nenhum dano nos elementos da ligação, adiciona pouco peso à estrutura global, apresenta maior resistência à fadiga em relação a outros tipos de ligação, permite ligar diferentes tipos de ligação e diminuir custos de produção.

Este tipo de ligação possui também algumas limitações de dimensionamento em relação a prever a capacidade de carga da ligação, pois para a análise de

resistência deste tipo de ligação, apesar da existência de algumas fórmulas analíticas, ainda são necessários mais estudos, com objetivo de tornar possível a existência de um dimensionamento correto (Thelanderson; Larsen, 2003). Além disso, existe a necessidade de preparação da superfície para obter-se uma perfeita quando submetida a elevadas temperaturas (Silva, 2009).

As ligações coladas são muito utilizadas em estruturas compostas de madeira, principalmente nos Estados Unidos, onde essas estruturas são industrializadas e catalogadas (Magalhães, 2005).

Figura 10 - Exemplo de ligação colada



Fonte: Thelandersson e Larsen (2003)

Ligações mecânicas são mais estáveis, em relação às anteriores, podendo também ser denominadas como ligações modernas. Neste tipo de ligação utilizam-se conectores metálicos para a transmissão de esforços. Existe uma variada gama de ferragens que podem ser utilizadas, porém, é usual a divisão em dois grupos, do tipo pino e ligadores planos (Cruz, 2016).

Os conectores do tipo pino podem ser colocados paralela, oblíqua e transversalmente às fibras da madeira. A transmissão de esforços é feita por pressão entre o conector e a madeira. Sua resistência é analisada ao esmagamento da peça na zona de contato, sujeita a esforços de cortante e flexão. Dentre o tipo pino, alguns dos mais comuns são os pregos, parafusos autoatarraxantes, parafusos de porca e cavilhas.

A ligação pregada (Figura 11), é o método mais comum entre elementos de madeira, sendo comercializados em diversos tamanhos, formas e diâmetros. A cabeça do prego é comumente circular, porém é também adotada a geometria

quadrada, que possui maior resistência em relação a pregos redondos de mesmo diâmetro.

A ABNT NBR 7190:2022 aponta que em uniões pregadas, deve ser feita pré-furação na madeira, com o diâmetro inferior do prego, com valores de 85% para coníferas e 98% para folhosas.

Em estruturas provisórias, é admitido que não exista pré-furação, desde que utilizem madeiras de densidade menor que 600 kg/m^3 , anulando o risco de fendilhamento, deve-se utilizar pregos com diâmetros de no máximo, $1/6$ da espessura da peça, e que possua espaçamento mínimo de dez vezes seu diâmetro. Se for utilizado sistema mecânico ou pneumático de pregação, também não é necessária a pré-furação.

Figura 11 - Exemplos de pregos



Fonte: Adaptado de Gerdau (2023)

Assim como os pregos, os parafusos autoatarraxantes (Figura 12) são produzidos com grande diversidade. No ramo estrutural, os mais comumente utilizados são cabeça sextavada, tipo torx ou allen.

Possuem diâmetros que variam entre 6 e 20mm e comprimentos entre 25 e 300mm. Os parafusos autoatarraxantes devem ser instalados com pré-furação de aproximadamente 70% do diâmetro do parafuso, conforme disposto na ABNT NBR 7190:2022.

Magalhães (2005) aponta que seções retangulares utilizam os mais variados tipos de ligação, porém, em seções I são normalmente utilizados pinos metálicos, sendo majoritariamente pregos ou parafusos.

Os parafusos autoatarraxentes serão justamente os abordados no presente trabalho, especificamente à 45 graus e para justificar tal angulação, os autores Blass e Bejtka desenvolveram o estudo *Screw with Continuous Threads in Timber Connections* (2001), onde são apresentados resultados de ensaios experimentais com variação do ângulo no qual os parafusos foram inseridos no elemento composto. Na angulação de 90 graus, foram usados parafusos autoatarraxentes de 7,2 mm e comprimento de 182 mm.

Após isso, foram utilizados parafusos inclinados a 60 graus, elevando a resistência da seção em 53% em relação a angulação anterior. Por fim, foram realizados ensaios com a angulação de 45 graus, onde foi demonstrado o melhor desempenho, com a rigidez da ligação sendo cerca de 12 vezes maior em relação à montagem para ângulo de 90 graus, o que representa ganho excepcional, principalmente devido ao fato de que a eficiência de estruturas compostas de madeira depende essencialmente do desempenho de suas conexões.

Figura 12 - Exemplo de parafuso autoatarraxante e diferentes cabeças



Fonte: Rothoblaas (2023)

Os parafusos passantes (Figura 13) possuem usualmente cabeça hexagonal ou semi-esférica e porca hexagonal. Os diâmetros variam entre 12 e 30mm. São utilizados quando a resistência ao corte requerida é maior do que as possíveis com uso de pregos ou parafusos autoatarraxantes (Silva, 2009). Geralmente são utilizados para ligarem três ou mais elementos, porém, podem também ser utilizados para ligações entre dois, sendo os laterais geralmente madeira ou aço. A ABNT NBR 7190:2022 admite que as ligações em madeira com parafusos passantes devem ser realizadas com pré-furação de no mínimo o seu próprio diâmetro, e no máximo 1 mm maior que o mesmo.

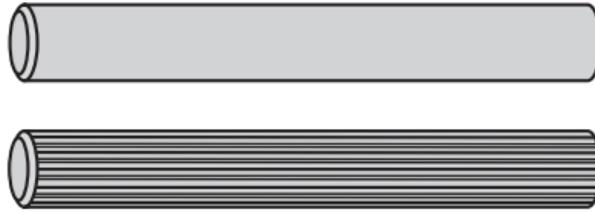
Figura 13 - Exemplo de parafuso passante com porca



Fonte: Belenus (2014)

As cavilhas (Figura 14) são cilindros lisos ou ranhurados utilizados com intenção de se obter estética mais atrativa na ligação. São utilizadas para resistir ao corte, assim como parafusos de porca, porém, não podem ser utilizadas em ligações que transmitem força de arrancamento. A pré-furação deve ser 1mm menor que o da cavilha utilizada, desta maneira introduzindo certa pressão na ligação, aumentando a eficácia na transmissão dos esforços (Silva, 2009).

Figura 14 - Exemplo de cavilhas



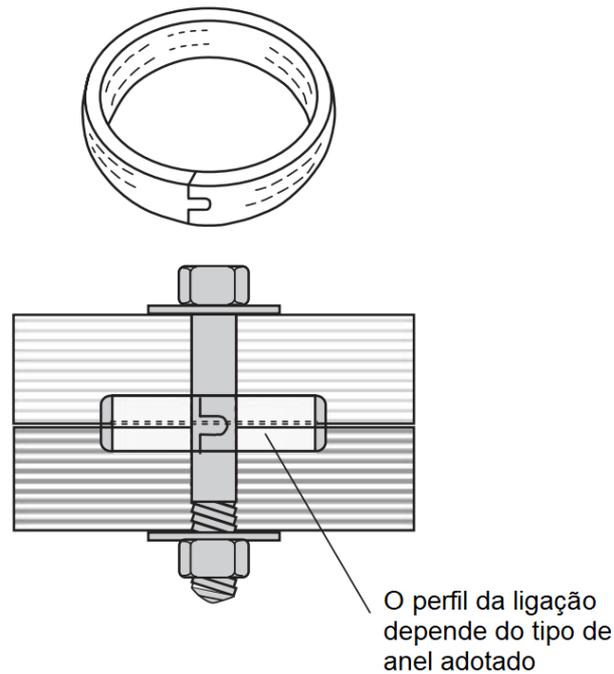
Fonte: Porteous e Kermani (2007)

Os conectores planos, segundo a CEN EN 912:2011, se dividem em quatro classes, sendo elas anéis metálicos, placas metálicas, placas dentadas e outros. Mendes (1994) aponta que estes grupos são distinguidos de modo que os anéis e placas são aplicados utilizando abertura de rasgos, onde nos anéis os rasgos são feitos em ambas as faces da ligação e nas placas os rasgos são abertos em apenas uma. As placas por sua vez utilizam a tecnologia da cravação. Os conectores classificados como outros se diferem dos anteriores devido ao fato de não serem feitos de ligas metálicas.

A ligação feita por anéis metálicos (Figura 15) se resume em um anel de dupla face, constituído por um anel fechado ou seccionado em um ponto da sua circunferência, disposto no interior da peça para as unir, segundo a CEN EN 912:2011. Os conectores são fixados por um parafuso, que não contribui para a resistência lateral da ligação, tendo função de garantir que a posição do conector não seja comprometida (Silva, 2009).

Este tipo de ligação é utilizado especificamente em ligações de madeira-madeira, onde a primeira peça transfere os esforços ao anel, por pressão diametral. A força então atravessa o anel e transmite esforços à segunda peça, também por pressão diametral (Porteous e Kermani, 2007).

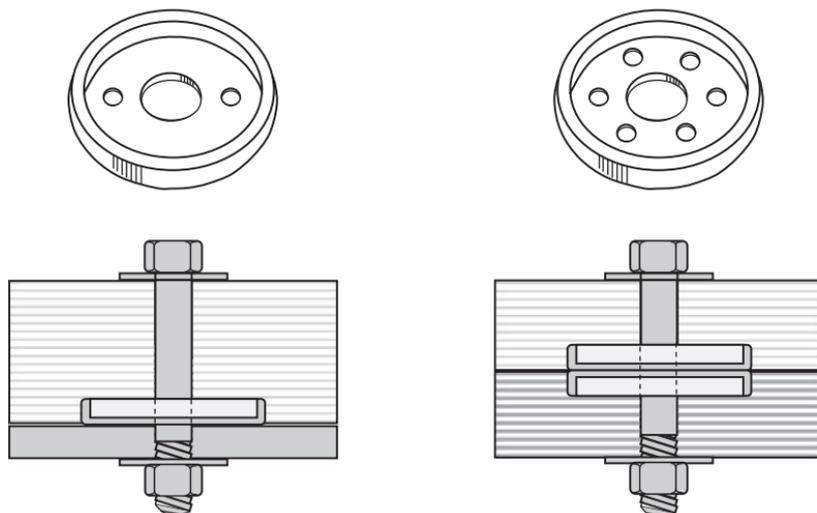
Figura 15 - Exemplo de anel metálico



Fonte: Porteous e Kermani (2007)

De acordo com Silva (2009) as placas metálicas (Figura 16), assim como os anéis metálicos, possuem forma circular, utilizados quando é requerida uma ligação madeira-aço ou madeira-concreto, ou mesmo quando a ligação é desmontável. Neste tipo de conector, a tensão de corte no parafuso é essencial para a transferência de carga lateral através da ligação, porém, como a tensão de corte do parafuso sempre excede a resistência lateral do conector, assim como nos anéis metálicos, o parafuso não contribui para a resistência lateral do conector.

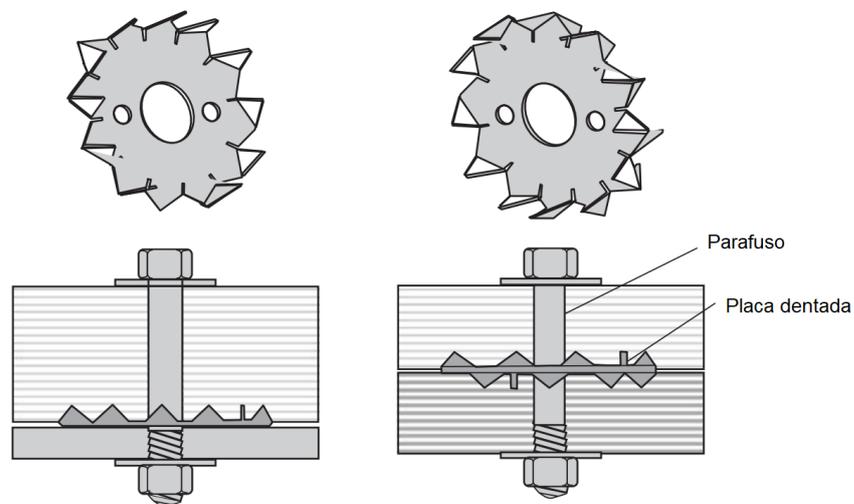
Figura 16 - Exemplo de placa metálica



Fonte: Porteous e Kermani (2007)

As placas dentadas (Figura 17) possuem uma variedade de formas geométricas, como as circulares, octogonais e quadradas, podendo ser divididas em onze classes, partindo do D1 ao D11, de acordo com a CEN EN 912:2011. As partes dentadas podem ser de uma ou duas faces, sendo a primeira utilizada principalmente em ligações de madeira-aço, madeira-concreto, ou até mesmo madeira-madeira que tenham propósito de serem desmontáveis, porém, se não possuírem este intuito, é adotada a parte dentada de duas faces.

Figura 17 - Exemplo de placa dentada



Fonte: Porteous e Kermani (2007)

4.2.2 Rigidez de ligações

Ao serem solicitadas por uma força longitudinal, estando as duas peças de madeira ligadas uma à outra, ocorre transmissão de esforços entre elas, de modo que a ligação sofre um deslocamento devido à deformação do elemento metálico e da madeira na região em torno do furo (Góes, 2002).

A ABNT NBR 7190:2022 apresenta que as ligações podem ser calculadas como rotuladas, rígidas ou semirrígidas, cabendo ao projetista comprovar com base em modelos teóricos ou experimentais, o cálculo de adoção de ligações rígidas e semirrígidas.

Góes (2002) aponta que em geral, o desenvolvimento dos modelos é baseado em algumas hipóteses básicas, sendo elas:

- Atrito entre as peças no comportamento da ligação pode ser desprezado;

- Componentes de tração que surgem no elemento metálico é uniforme, hipótese que ao ser adotada possibilita o estudo dos elementos metálicos individualmente;
- A distribuição de tensões na parede do furo pode ser aproximada por uma distribuição de tensões no plano de ligação. Essa distribuição é considerada uniforme na projeção da largura do furo.

A norma brasileira citada aponta que, para ligações realizadas com pinos metálicos ortogonais em relação peça, a rigidez de serviço (K_{ser}) deve ser utilizada para a verificação de estados-limite de serviço ELS, enquanto para estados-limite últimos ELU, utiliza-se a rigidez última (K_u), calculada conforme Equação 1:

$$K_u = \frac{2}{3} K_{ser} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

K_u = rigidez última;

K_{ser} = rigidez de serviço.

Os valores de K_{ser} para conectores são apresentados conforme a Tabela 1:

Tabela 1 - Valores de K_{ser} para conectores em N/mm	
Conectores	K_{ser}
Pinos	
Parafuso de porca e arruela com ou sem folga	$\rho_{med}^{1,5} \frac{d}{23}$
Parafuso Autoatarraxante	
Prego (com pré-furação)	
Prego (sem pré-furação)	$\rho_{med}^{1,5} \frac{d^{0,8}}{30}$
Anel Metálico	$\frac{\rho_{med} \cdot d_c}{80}$

Fonte: ABNT NBR 7190:2022

Onde:

ρ_{med} = densidade específica média em kg/m³;

d = diâmetro efetivo do pino metálico, expresso em milímetros (mm).

Para ligações com elementos de madeira de diferentes densidades, deve-se calcular a densidade média ρ_{med} conforme a Equação 2:

$$\rho_{,med} = \sqrt{\rho_{1,med} \cdot \rho_{2,med}} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

$\rho_{1,med}$ = densidade do elemento 1 de madeira;

$\rho_{2,med}$ = densidade do elemento 2 de madeira.

4.2.3 Resistência de ligações

A ABNT NBR 7190:2022 apresenta que se pode estimar a resistência característica (R_k) da ligação pela Equação 3:

$$R_k = F_{v,R_k} \cdot n_{sp} \cdot n_{ef} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

n_{sp} = quantidade de seções de corte por pino metálico;

n_{ef} = número efetivo de pinos por ligação;

F_{v,R_k} = resistência característica de um pino, correspondente a uma dada seção de corte.

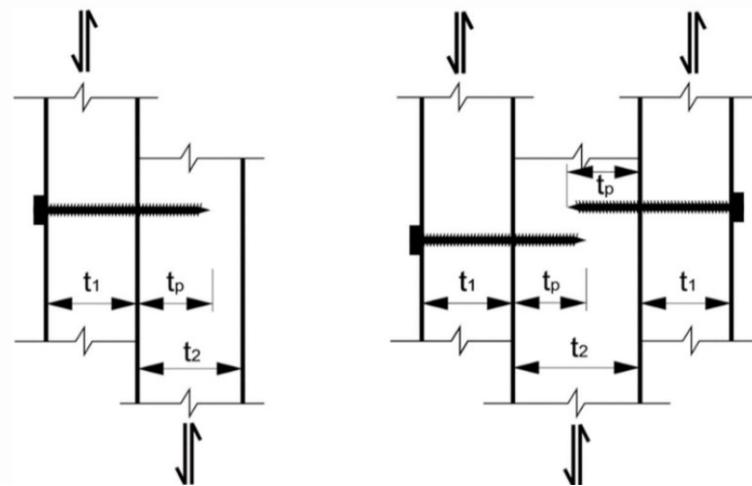
A respeito de parafusos autoatarraxantes, que são objeto de estudo do presente trabalho, para que a ligação possa ser considerada resistente, deve-se atender além das especificações de espaçamento e pré-furação, os seguintes itens:

- O diâmetro efetivo do parafuso não pode ser maior que um quinto da menor espessura dentre as peças de madeira ligadas. É permitido que o diâmetro efetivo do parafuso seja maior que um quarto da espessura da peça de madeira mais delgada, desde que o diâmetro de pré-furação seja igual ao diâmetro efetivo do parafuso, como mostra a Figura 18;
- Em ligações localizadas, a penetração da ponta do parafuso na peça de madeira mais distante de sua cabeça deve ser de pelo menos 6 vezes seu diâmetro ou igual à espessura dessa peça. Em ligações corridas, como em peças compostas ligadas continuamente, esta penetração deve ser limitada ao valor de t_1 .

Onde:

t_1 = menor espessura dentre os elementos de madeira laterais, para os casos em corte simples e corte duplo.

Figura 18 - Ligações de elementos de madeira com parafusos de rosca soberba em corte simples

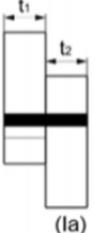
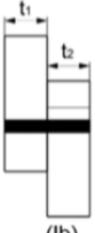


Fonte: ABNT NBR 7190:2022

A resistência característica de uma seção de corte de um pino metálico é dada pelo menor valor entre os resultados obtidos na Tabela 1 e do Quadro 1 ou 2, em função dos diferentes modos de falha, em função da resistência ao embutimento e da espessura dos elementos de madeira interligados, do momento resistente do pino metálico e de seu diâmetro efetivo.

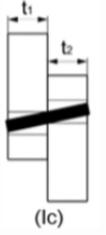
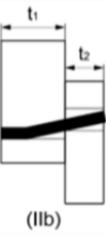
Quadro 1 - Modos de falha e equações para ligações de elementos de madeira com pinos metálicos (uma seção de corte)

(continua)

Modo de falha	Força característica calculada por plano de corte e por pino
 <p>(1a)</p>	$F_{v,Rk1} = f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d$
 <p>(1b)</p>	$F_{v,Rk2} = f_{e1,k} \cdot t_2 \cdot d\beta$

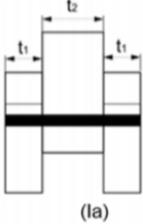
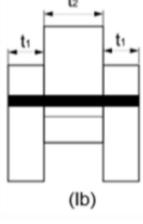
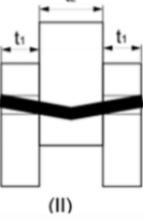
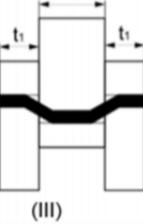
Fonte: ABNT NBR 7190:2022

Quadro 1 - Modos de falha e equações para ligações de elementos de madeira com pinos metálicos (uma seção de corte)

(conclusão)	
 <p>(Ic)</p>	$F_{v,Rk3} = \frac{f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right]} + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$
 <p>(IIa)</p>	$F_{v,Rk4} = 1,05 \frac{f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,k}}{f_{e1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$
 <p>(IIb)</p>	$F_{v,Rk5} = 1,05 \frac{f_{e1,k} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_{y,k}}{f_{e1,k} \cdot d \cdot t_2^2}} \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$
 <p>(III)</p>	$F_{v,Rk6} = 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,k} \cdot f_{e1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$

Fonte: ABNT NBR 7190:2022

Quadro 2 - Modos de falha e equações para ligações de elementos de madeira com pinos metálicos (duas seções de corte)

Modo de falha	Força característica calculada por plano de corte e por pino
 <p>(Ia)</p>	$F_{v,Rk1} = f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d$
 <p>(Ib)</p>	$F_{v,Rk2} = 0,5f_{e1,k} \cdot t_2 \cdot d\beta$
 <p>(II)</p>	$F_{v,Rk3} = 1,05 \frac{f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,k}}{f_{e1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$
 <p>(III)</p>	$F_{v,Rk4} = 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,k} \cdot f_{e1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$

Fonte: ABNT NBR 7190:2022

Onde:

β = Razão entre as resistências de embutimento das peças de madeira interligadas sendo dado por:

$$\beta = \frac{f_{e2,k}}{f_{e1,k}} \quad (\text{Equação 4})$$

$f_{e1,k}$ e $f_{e2,k}$ = resistências ao embutimento dos elementos de madeira 1 e 2;

$M_{y,k}$ = momento característico resistente do pino metálico;

d = diâmetro do pino metálico;

t_1 = menor espessura dentre os elementos de madeira laterais, para os casos em corte simples e corte duplo;

t_2 = maior espessura dentre os elementos de madeira laterais, para os casos em corte simples e corte duplo;

$F_{ax,Rk}/4$ = contribuição do efeito de confinamento provocado pela resistência ao arrancamento no caso de pregos e parafusos de rosca soberba. Para o caso de ligações com parafusos de rosca soberba, o valor de $F_{ax,Rk}$ pode ser estimado pelo menor valor dentre a resistência de tração do parafuso e a resistência ao embutimento da cabeça do parafuso na lateral externa da peça de madeira.

4.3 Comportamento estrutural de vigas compostas

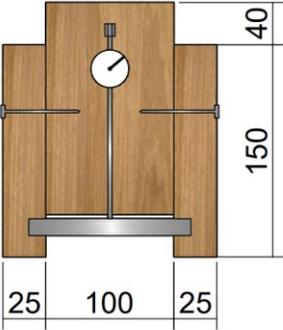
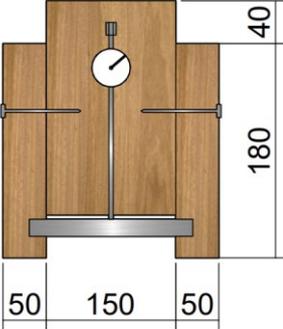
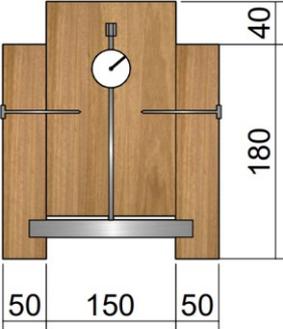
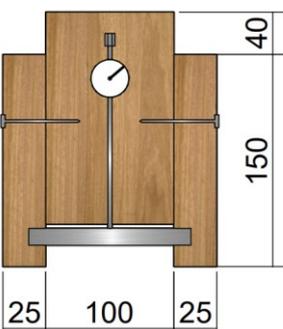
Góes (2002) aponta que, segundo a hipótese de Navier, em uma seção transversal qualquer de uma viga, apresenta-se distribuição contínua de deformações longitudinais ao longo de sua altura. Assim como em uma peça sem nenhum tipo de conector interligando seus elementos, a distribuição de deformações é contínua somente ao longo da altura de cada elemento isolado. Nas superfícies de separação é possível observar descontinuidades decorrentes do comportamento individualizado. Vê-se também nessas interfaces alongamentos e encurtamentos das superfícies dos elementos adjacentes da viga.

Stamato (2002) afirma que quando os elementos de uma viga composta estiverem interligados, os conectores restringem parte dos deslizamentos relativos entre as peças que compõem a seção, devido às deformações nas ligações, devendo então ser levado em conta o módulo de rigidez efetivo $(EI)_{ef}$ em função das propriedades de rigidez de cada elemento da seção, do módulo de deslizamento da ligação, do espaçamento entre os conectores e de sua geometria. Assim, conclui-se que o comportamento intermediário é diretamente influenciado pela rigidez dos elementos de ligação utilizados na solidarização. Considerando que uma ligação “perfeitamente rígida” seja empregada, não surgem deslocamentos relativos entre os pontos da borda, que determinam a zona de contato entre as peças.

Assim, o momento de inércia e o módulo de resistência das peças compostas, unidas por conectores deformáveis, passam a ser uma fração daqueles das peças consideradas maciças, reforçando a importância do estudo a respeito da rigidez das ligações.

Góes (2002) avaliou experimentalmente a resistência e rigidez de ligações pregadas por meio de ensaios do tipo *push-out*. A Tabela 2 apresenta a configuração dos corpos de prova e os resultados médios dos ensaios realizados em cada modelo.

Tabela 2 - Resultados dos ensaios de ligação

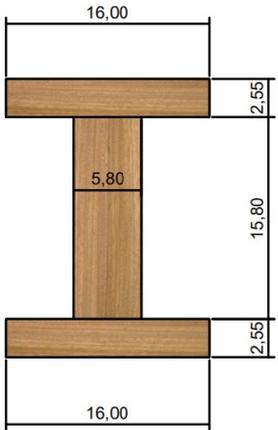
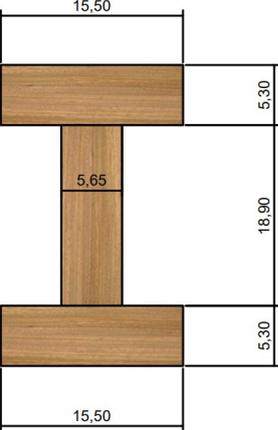
Madeira	Geometria	Prego	Fu (N)	Kser (N/mm)
Pinus		22 x 42	2670	5274
	Pinus		22 x 48	3815
Cedrinho		22 x 48	6613	23863
	Angelim		18 x 30	5727

Fonte: Autoria própria (2023)

Góes (2002) realizou também experimentos a respeito de vigas compostas, com objetivo de analisar o desempenho de vigas compostas, com seção I pregada, utilizando pregos ortogonais à peça. Foram utilizadas três espécies de madeira, Angelim Pedra Verdadeiro (*Dinizia excelsa*), Cedrinho (*Erisma spp*) e Pinus Hondurensis (*Pinus caribea var. hondurensis*). Foram construídos nove protótipos de vigas compostas, com diferentes dimensões para cada madeira, conforme o Quadro 3, que demonstra as dimensões das vigas e dos conectores utilizados.

Quadro 3 – Dados de projeto das vigas compostas

(continua)

Espécie de Madeira	Viga	Geometria da Seção	Ligação	Comp (cm)	Vão ensaio (cm)
Pinus	P1		22x42 C/ 5,0 cm	310	300
	P2		22x48 C/ 5,0 cm	400	390

Fonte: Góes (2002)

Quadro 3 – Dados de projeto das vigas compostas

(conclusão)

Espécie de Madeira	Viga	Geometria da Seção	Ligação	Comp (cm)	Vão ensaio (cm)
	P3		22x48 C/ 2,4 cm		
Cedrinho	C1		22x48 C/ 5,0 cm	400	390
	C2				
	C3				
Angelim	A1		18x30 C/ 5,0 cm	380	370
	A2				
	A3				

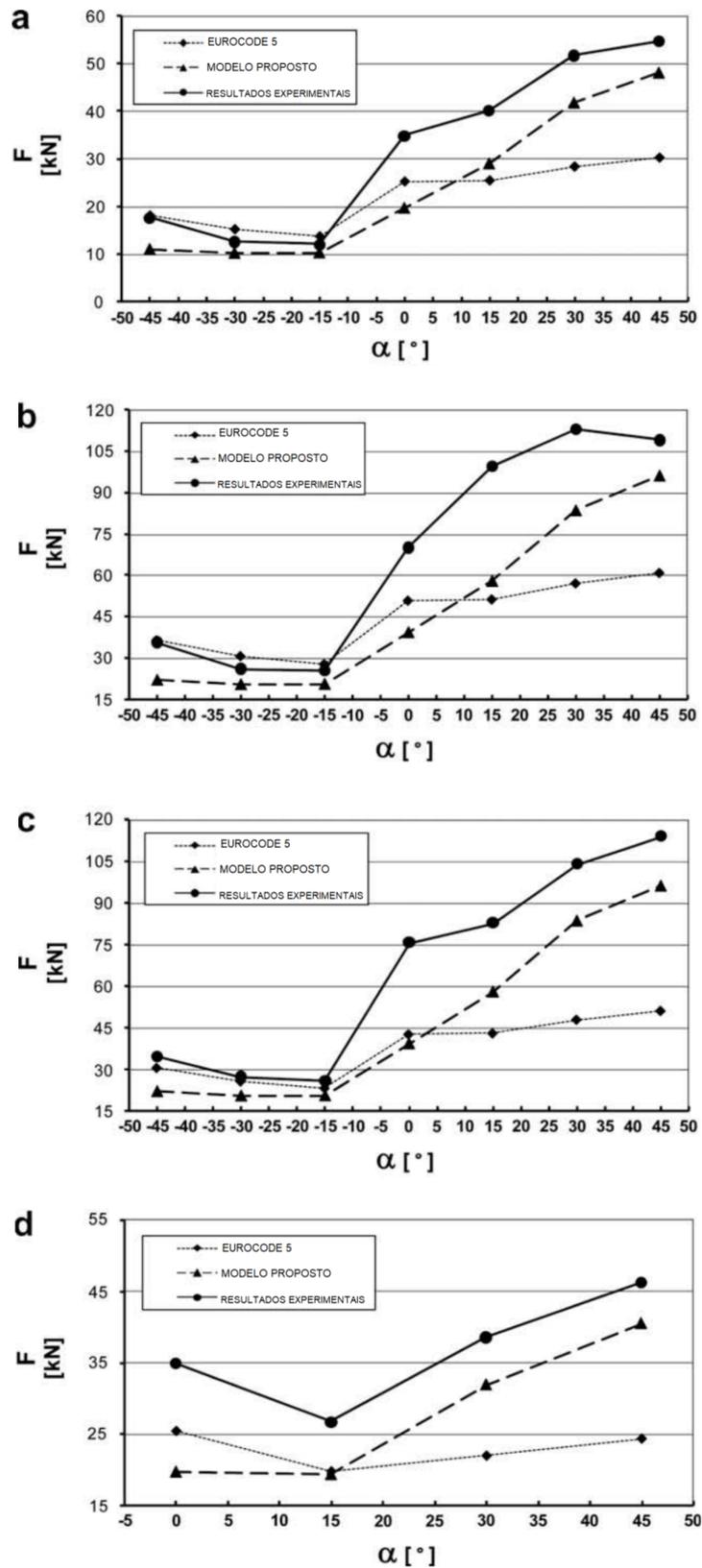
Fonte: Góes (2002)

Dos experimentos realizados, foram obtidos resultados satisfatórios e, de maneira geral, concordantes com a CEN EN 1995-1:2004, porém em alguns fatores, como o de força de ruptura, a viga feita utilizando Angelim chegou a apresentar resultados 175% superiores se comparados ao documento normativo. Também nos ensaios de ligações, os resultados obtidos chegaram a ser em média 100% superiores.

O mesmo autor apresenta em sua conclusão que a formulação empírica da CEN EN 1995-1:2004 conduz à boas aproximações para o cálculo de vigas compostas, porém, são necessárias mais investigações sobre rigidez de ligações. Além disso, à respeito da capacidade das vigas, o documento normativo apresenta forças de ruptura muito abaixo das observadas nos ensaios, o que indica uma reserva de capacidade das vigas, em função da redistribuição de esforços entre os elementos de ligação, devido à rigidez parcial dos mesmos.

Tomasi, Crosatti e Piazza (2010) apresentam trabalho referente à análise teórica e experimental de ligações em seções compostas de madeira, utilizando parafusos inclinados, onde foram realizados ensaios em corpos de prova do tipo *push-out*, utilizando MLCC e parafusos autoatarraxantes, que foram inseridos em ângulos variados, com 0°, 15°, 30° e 45°. Os autores demonstram ao longo do trabalho que o método sugerido pela CEN EN 1995-1:2004 não apresenta resultados satisfatoriamente precisos e, para tal finalidade, utilizaram trabalhos realizados por Bejtka e Blass como base para o auxílio dos cálculos realizados. Foram realizados um total de 64 ensaios de *push-out*, sendo trabalhados à compressão, tração e os dois simultaneamente. Os resultados a respeito da capacidade de carga e fator de segurança, comparando a CEN EN 1995-1:2004, o modelo proposto e os resultados experimentais são demonstrados na Figura 19.

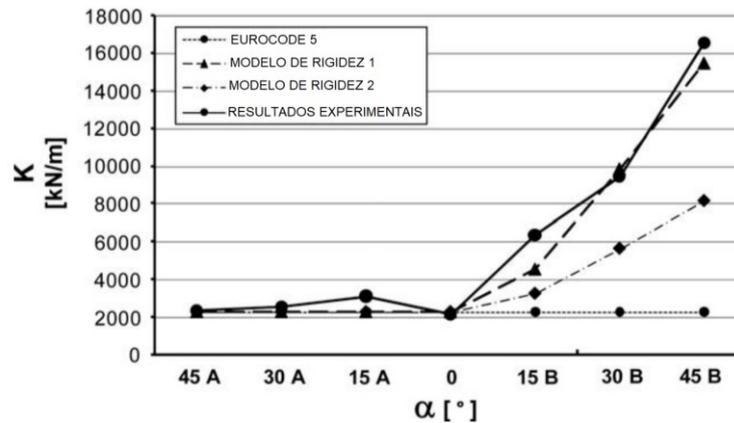
Figura 19 - Comparação entre valores médios experimentais e teóricos da capacidade de carga de parafusos em diversos ângulos parafusos em diversos ângulos



Fonte: Tomasi, Crosatti e Piazza (2010)

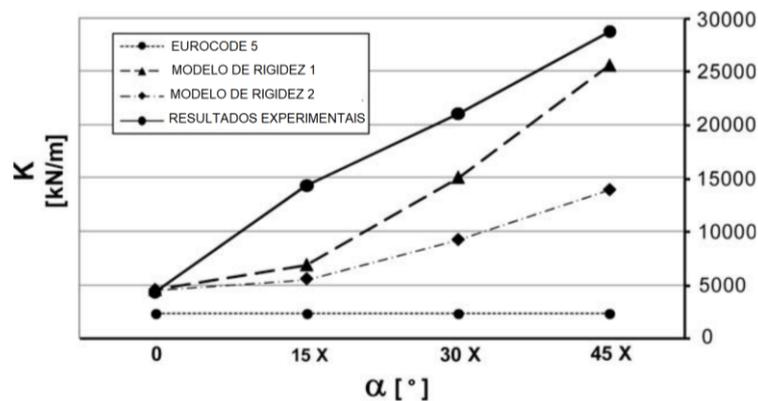
As Figuras 20 e 21 demonstram para vários ângulos dos parafusos, o valor experimental médio da rigidez, os valores teóricos esperados da CEN EN 1995-1:2004 e do método de cálculo proposto, sendo a Figura 20 para parafusos de 190 e 220 mm colocados na mesma inclinação e a Figura 21, com parafusos de mesmo comprimento posicionados em forma de x.

Figura 20 - Comparação 1



Fonte: Tomasi, Crosatti e Piazza (2010)

Figura 21 - Comparação 2



Fonte: Tomasi, Crosatti e Piazza (2010)

Com os ensaios e cálculos realizados, os autores concluíram que o método de cálculo da CEN EN 1995-1:2004 é desfavorável em termos de segurança, principalmente no caso de parafusos submetidos a carga de cisalhamento e compressão. Por conta de o método não levar em conta a inclinação do eixo do parafuso em relação à peça, não é possível medir satisfatoriamente o aumento da capacidade de carga quando a inclinação aumenta.

Os autores também concluem que o método de cálculo proposto no artigo é seguro para todas as configurações geométricas testadas, principalmente para ângulos maiores que 30°, sendo a pior estimativa para parafusos perpendiculares ao plano de cisalhamento.

No que diz respeito a rigidez da ligação, a CEN EN 1995-1:2004 demonstra uma boa estimativa comparada aos valores experimentais apenas quando os parafusos são submetidos a compressão e são perpendiculares ao plano. No caso de parafusos cruzados à tração a fórmula não é adequada, pois subestima significativamente a rigidez da ligação, enquanto o método proposto no artigo fornece uma boa aproximação dos valores obtidos através dos ensaios para todas as configurações geométricas testadas.

4.3.1 Método analítico de cálculo

O método analítico de cálculo é baseado em observações experimentais recebendo diversas contribuições ao longo de décadas, por vários autores no mundo. A partir destas contribuições, foi possível então chegar ao método adotado pela CEN EN 1995-1:2004 e posteriormente pela ABNT NBR 7190 (2022), onde é apontado que o módulo de deslizamento é determinado em função da densidade da madeira e do diâmetro do pino utilizado. Se as peças de forem de madeiras de diferentes densidades, deve-se utilizar densidade equivalente, calculada da seguinte forma:

$$\rho_k = \sqrt{\rho_{k1} \cdot \rho_{k2}} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

ρ_k = densidade equivalente;

ρ_{k1} = densidade da madeira 1;

ρ_{k2} = densidade da madeira 2.

O fator de redução de inércia do conjunto é adotado para o material que apresenta o maior módulo de elasticidade, da seguinte forma:

$$\gamma_i = 1, \text{ para } i = 2 \quad (\text{Equação 6})$$

$$\gamma_i = \frac{1}{\left[1 + \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot A_i \cdot s_i}{K_i \cdot L_{ef}^2}\right]}, \text{ para } i = 1 \text{ e } 3 \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

E_i = módulo de elasticidade de cada elemento da seção transversal;

A_i = área de cada parte da seção transversal;

S_i = espaçamento dos pregos na interface do elemento i com o elemento 2;

K_i = módulo de deslizamento da ligação do elemento i com o elemento 2;

L_{ef} = vão efetivo da viga, sendo para vigas biapoiadas, $L_{ef} = L$ (vão), para vigas contínuas, $L_{ef} = 0,8 L$ e para vigas em balanço, $L_{ef} = 2L$.

A distância entre os centros de gravidade da seção até a linha neutra da peça é calculada conforme a equação:

$$a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot (h_1 + h_2) - \gamma_3 \cdot E_3 \cdot A_3 \cdot (h_2 + h_3)}{2 \sum_{i=1}^3 \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i} \quad (\text{Equação 8})$$

$$a_1 \left(\frac{h_1 + h_2}{2} \right) - a_2 \quad (\text{Equação 9})$$

$$a_3 = \left(\frac{h_2 + h_3}{2} \right) + a_2 \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

a_i = distância do centroide da área de cada elemento que compõe a seção transversal até a linha neutra x-x;

h_i = altura de cada parte dos elementos componentes da seção transversal com h_3 nulo para seção T;

b_i = largura de cada parte dos elementos componentes da seção transversal.

Com isso, é possível calcular a rigidez efetiva considerando a rigidez da ligação, da seguinte maneira:

$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^3 (E_i \cdot I_i + \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i^2) \quad (\text{Equação 11})$$

Onde:

I_i = momento de inércia de cada elemento componente da seção transversal.

$$I_i = b_i \cdot h_i^3 / 12 \quad (\text{Equação 12})$$

Desta mesma forma são realizadas as equações de tensão normal e cisalhante nas peças, assim como a força aplicada nos elementos de ligação, ocasionada pelo deslizamento entre as peças.

Para vigas de geometrias T,I e caixão, as tensões normais devem ser calculadas pelas somas das parcelas, como demonstram as equações:

$$\sigma_i = \gamma_i \cdot E_i \cdot a_i \cdot \frac{M}{(EI)_{ef}} \quad (\text{Equação 13})$$

$$\sigma_{m,i} = 0,5 \cdot E_i \cdot h_i \cdot \frac{M}{(EI)_{ef}} \quad (\text{Equação 14})$$

Onde:

M = momento fletor;

σ_i = tensão normal no centroide do elemento "i";

$\sigma_{m,i}$ = parcela da tensão normal na extremidade do elemento “i”;

E_i = módulo de elasticidade do elemento “i”.

Assim, a máxima tensão normal na peça composta ocorre na extremidade superior ou inferior do elemento e é calculada conforme a equação:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \sigma_i + \sigma_{m,i} \quad (\text{Equação 15})$$

Onde:

$\sigma_{m\acute{a}x}$ = tensão normal máxima na extremidade do elemento “i”.

A máxima tensão cisalhante ocorre onde a tensão normal é nula, esta tensão na alma da viga é calculada conforme a equação:

$$\tau_{2,m\acute{a}x} = (\gamma_3 \cdot E_3 \cdot A_3 \cdot a_3 + 0,5 \cdot E_2 \cdot b_2 \cdot h_2^2) \cdot \frac{V}{b_2 \cdot (EI)_{ef}} \quad (\text{Equação 16})$$

Onde:

V = força máxima de cisalhamento.

A força aplicada no conector (F_i) é dada por:

$$F_i = \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i \cdot s_i \cdot \frac{V}{(EI)_{ef}} \text{ para } i = 1 \text{ e } 3 \quad (\text{Equação 17})$$

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Para compreensão satisfatória do comportamento mecânico de vigas compostas e suas ligações se faz necessária, além de análise teórica, realização de ensaios de laboratório.

Para aferir os modelos teóricos de comportamento das vigas compostas foram realizados ensaios de flexão em protótipos de elementos compostos, em escala natural, a partir de peças de dimensões comerciais, solidarizadas continuamente por parafusos autoatarraxantes.

Também foram realizados testes de caracterização das ligações por parafusos autoatarraxantes em corpos de prova de ligação com finalidade de determinar a rigidez da ligação de forma a comparar com os valores obtidos com a formulação teórica.

Os ensaios de caracterização da madeira foram conduzidos conforme a norma referente aos projetos de estruturas de madeira, ABNT NBR 7190:2022. Os valores de tensão de escoamento e tensão de ruptura do aço dos parafusos foram determinados por ensaios de tração simples segundo as normas referentes ao método de ensaio de tração em arame de aço, ABNT NBR 6207:1982 e determinação das propriedades mecânicas à tração, ABNT NBR ISO 6892:2002.

O programa de ensaios foi desenvolvido no Laboratório de Sistemas Estruturais do Departamento de Construção Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Campo Mourão (UTFPR-CM).

A seguir estão apresentados detalhadamente os procedimentos experimentais adotados para avaliar o comportamento de vigas compostas de madeira serrada com seção I, assim como os procedimentos adotados para a caracterização dos materiais envolvidos.

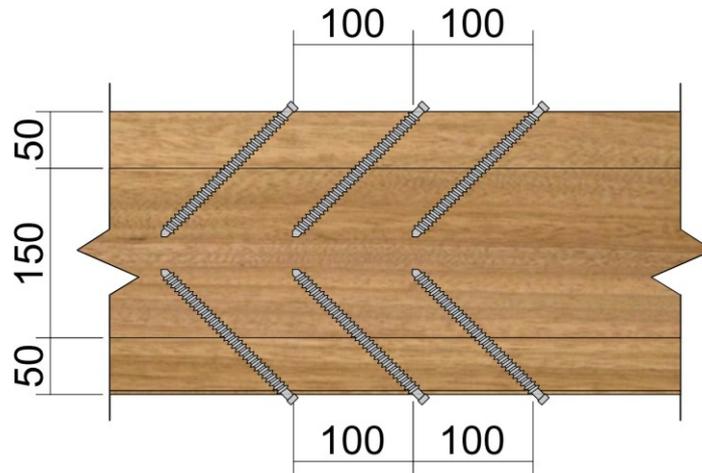
5.1 Descrição dos materiais utilizados

A pesquisa foi realizada com madeira serrada *Apuleia Leiocarpa* (Grapeira). Foram construídos dois protótipos de vigas compostas, de mesmas dimensões, juntamente com seis corpos de prova, para o ensaio de caracterização da ligação.

Os elementos conectores utilizados foram parafusos autoatarraxantes na bitola comercial “6 x 100 mm” inseridos com inclinação de 45 graus, com espaçamento de 10 centímetros entre cada furo, em forma de zigue-zague. Em todas as vigas os

parafusos foram dispostos em duas linhas longitudinais, como demonstrado na Figura 22.

Figura 22 - Disposição dos parafusos



Fonte: Autoria própria (2023)

A Tabela 3 apresenta a geometria da seção transversal, o comprimento e o vão para o ensaio e tipo de ligação para as 2 vigas ensaiadas.

Tabela 3 - Dados de projeto das vigas compostas

(continua)

Viga	Seção transversal (mm)	Comprimento (mm)	Vão (mm)	Conector
V1		4000	3800	Φ 6 mm C/100 mm

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 3 - Dados de projeto das vigas compostas

(conclusão)				
Viga	Seção transversal (mm)	Comprimento (mm)	Vão (mm)	Conector
V2		4000	3800	Φ 6 mm C/100 mm

Fonte: Autoria própria (2023)

5.2 Procedimentos de experimentação

Para auxílio da análise precisa dos resultados, todas as peças de madeira que compõem a seção transversal composta foram previamente testadas por meio de ensaios não destrutivos de flexão estática. Destes ensaios foram obtidos o módulo de elasticidade à flexão de cada peça que está sendo empregada na viga, garantindo maior precisão na análise dos resultados.

Na sequência, foram montadas as vigas compostas, como será apresentado no item 5.4. Após a montagem das vigas, as mesmas foram testadas à flexão com carregamento nos terços e leitura de flechas, por meio de relógios comparadores. Após a avaliação da rigidez das peças compostas, as mesmas foram conduzidas à ruptura. Foram também realizados ensaios de caracterização da ligação nos protótipos destinados, e, por fim, conduzidos ensaios de tração simples em parafusos para a determinação das propriedades do aço empregado segundo as normas ABNT NBR 6207:1982 e ABNT NBR ISO 6892:2002.

5.3 Ensaio de caracterização da madeira

Os ensaios de caracterização das propriedades físicas e mecânicas de cada peça de madeira foram realizados de acordo com as especificações da ABNT NBR 7190:2022, para caracterização simplificada.

Os ensaios levados à análise foram:

- Teor de umidade;
- Densidade aparente;
- Resistência à compressão paralela às fibras;
- Módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras;

Os corpos de prova do ensaio de densidade e teor de umidade da madeira, ilustrados na Figura 23, foram levados para a estufa de secagem a uma temperatura de cerca de $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, de acordo com a ABNT NBR 7190:2022.

Figura 23 - Corpos de prova para ensaio de umidade e densidade



Fonte: Autoria própria (2023)

As dimensões e características dos corpos de prova utilizados para o ensaio de umidade e densidade estão ilustrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Dimensões dos corpos de prova de umidade e densidade

CP	Altura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)
1	49,50	29,50	20,20
2	50,00	30,00	20,50
3	50,00	30,00	20,50
4	50,00	30,00	20,50
5	49,50	30,00	21,00
6	50,00	30,00	20,50

Fonte: Autoria própria (2023)

A Figura 24 apresenta um dos seis corpos de prova durante o ensaio de compressão paralela às fibras, utilizando a máquina universal de ensaios, modelo EMIC DL-30000 e o transdutor de deslocamento.

Figura 24 - Ensaio de compressão paralela às fibras



Fonte: Autoria própria (2023)

As dimensões e características dos corpos de prova utilizados para o ensaio de compressão paralela às fibras estão ilustrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Dimensões dos corpos de prova de compressão paralela às fibras

CP	Face 01 (mm)	Face 02 (mm)
1	49,50	50,50
2	50,50	49,50
3	49,50	50,20
4	49,50	50,20
5	50,50	50,20
6	50,50	49,50

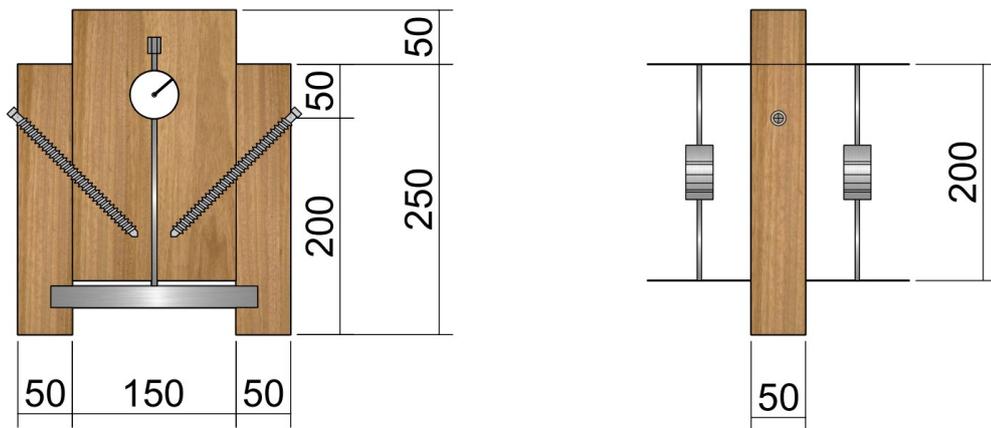
Fonte: Autoria própria (2023)

5.4 Ensaio de ligações

Estes ensaios têm por objetivo avaliar a rigidez da ligação, por meio de ensaios de ligações, para efeito de comparação com os resultados de outros autores. As dimensões dos corpos de prova foram estabelecidas de modo a representar a configuração alma/mesa/diâmetro do pino utilizada em cada viga.

A altura nominal da mesa (h_M) tem dimensão de 5 cm e a largura da alma (b_A), dimensão nominal também igual a 5 cm. Optou-se pela configuração com dois pinos metálicos, com um plano de corte em cada, como a Figura 25.

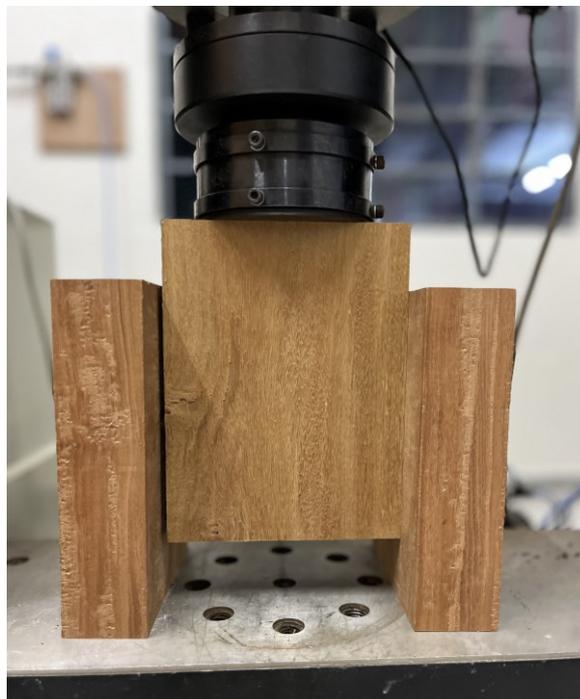
Figura 25 - Dimensões do corpo de prova



Fonte: Autoria própria (2023)

O valor do módulo de deslizamento K foi definido a partir da inclinação da reta secante à curva de força-deslocamento, definida pelos pontos $(F_{10\%}, \delta_{10\%})$ e $(F_{40\%}, \delta_{40\%})$ correspondentes a 10% e 40% da carga máxima suportada pelo sistema, assim como previsto na CEN EN 26891:1991. A Figura 26 demonstra o ensaio de ligação realizado.

Figura 26 - Ensaio de ligação



Fonte: Autoria própria (2023)

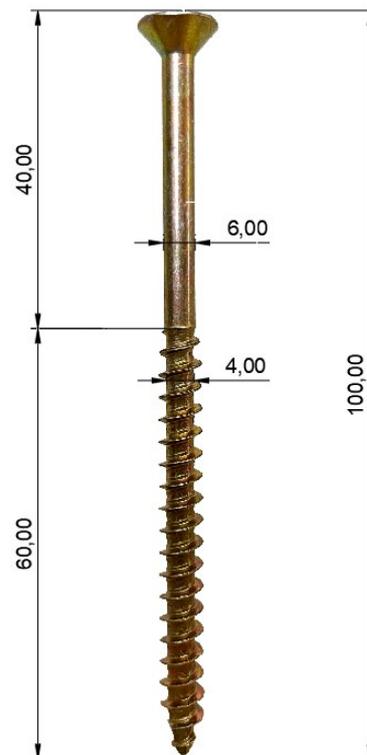
5.5 Ensaio dos parafusos

Os valores da tensão de escoamento e da resistência máxima à tração do aço dos parafusos foram determinados por ensaios de tração simples, e realizados na Máquina Universal de Ensaio EMIC, com capacidade de 300 kN, do Laboratório de Sistemas Estruturais. O ensaio e o parafuso utilizado são representados nas Figuras 27 e 28, respectivamente.

Figura 27 - Ensaio do parafuso



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 28 - Dimensões do parafuso

Fonte: Autorial própria (2023)

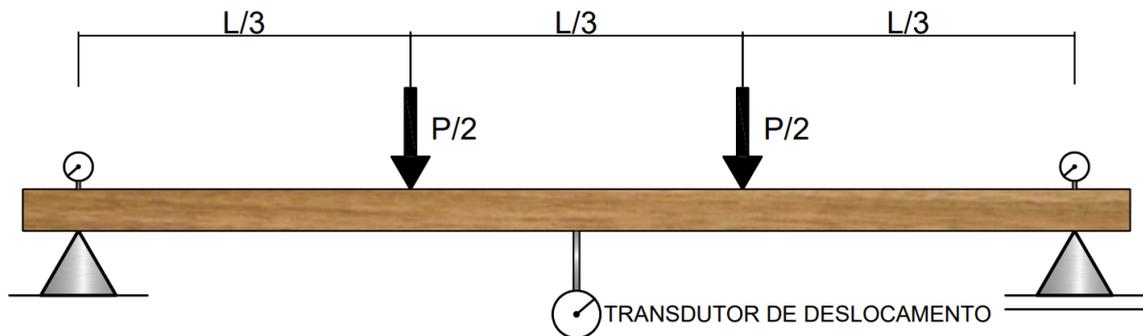
O ensaio foi conduzido com carregamento monotônico crescente com taxa de incremento não superior a 10 MPa/s segundo recomendações da ABNT NBR ISO 6892:2002.

Como o material não apresenta patamar de escoamento no diagrama de tensão x deformação específica, o valor da resistência máxima à tração (f_u) foi determinado pelo valor da máxima tensão suportada pelo corpo de prova até a ruptura, conforme recomendações da ABNT NBR 6207:1982.

5.6 Ensaios de flexão estática para caracterização

Cada peça das vigas (mesa superior, alma e mesa inferior) foi caracterizada por ensaio não destrutivo de flexão elástica para a aquisição do valor do módulo de elasticidade a flexão, que consiste em aplicar um carregamento concentrado nos terços do vão sobre a peça bi-apoiada, medindo a flecha no meio do vão a cada incremento de carregamento, conforme a ASTM D 198 (Figura 29).

Figura 29 - Montagem do ensaio de flexão estática para caracterização das peças



Fonte: Autoria própria (2023)

O módulo de elasticidade à flexão de cada uma das peças utilizadas para compor as vigas foi determinado pela inclinação da reta secante a curva Força x Deslocamento no meio do vão, definida pelos pontos correspondentes a 10% e 40% da carga última de ensaio, que foi definida como $L/200$.

As Figuras 30 e 31 ilustram a configuração dos ensaios de caracterização para uma peça utilizada para compor a mesa e outra peça utilizada para compor a alma de uma seção composta.

Figura 30 - Ensaio de flexão em peça de alma



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 31 - Ensaio de flexão em peça de mesa



Fonte: Autoria própria (2023)

Obtidos os valores de pares de força aplicada e o correspondente deslocamento transversal no meio do vão, foram determinados os módulos de elasticidade a flexão ($E_{M, flecha}$) de vigas bi-apoiadas com cargas concentradas nos terços do vão, conforme a Equação 18.

$$E_{M, flecha} = \frac{23 \cdot L^3 \cdot \Delta F}{1296 \cdot I \cdot \Delta \delta} \quad (\text{Equação 18})$$

Onde:

L = vão;

ΔF = variação da força;

I = momento de inércia na peça;

$\Delta \delta$ = variação da flecha.

5.7 Montagem das vigas compostas

Após os ensaios preliminares de flexão, as peças de madeira foram posicionadas de forma a constituir as vigas compostas. As peças justapostas foram fixadas previamente por grampos, enquanto ocorreu a pré-furação e fixação de alguns parafusos ao longo do elemento para correto posicionamento e alinhamento das peças, conforme a Figura 32.

Figura 32 – Montagem da viga composta



Fonte: Autoria própria (2023)

Após a retirada dos grampos, foi realizada a montagem efetiva dos elementos estruturais, mediante pré-furação e instalação de todos os conectores ao longo das vigas, como demonstra a Figura 33. A Figura 34 ilustra uma das vigas compostas após a finalização da montagem.

Figura 33 – Instalação de conectores na viga



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 34 - Viga após finalização da montagem



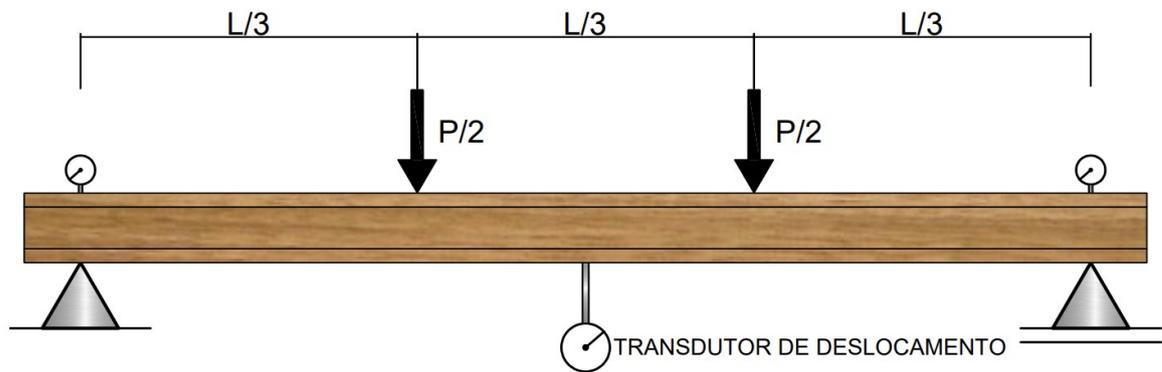
Fonte: Aatoria própria (2023)

O espaçamento e diâmetro dos parafusos utilizados foram previamente indicados no item 5.1. Para a pré-furação serão utilizadas brocas de 5 mm de diâmetro, valor correspondente a aproximadamente 0,85 do diâmetro efetivo dos parafusos utilizados.

5.8 Ensaio das vigas compostas

Os ensaios de flexão em vigas compostas de seção I simétrica, formadas por peças de seções comerciais, solidarizadas continuamente por parafusos autoatarraxantes, foram conduzidos com esquema estático de viga simplesmente apoiada, com aplicação de forças concentradas e iguais, localizadas a mesma distância de suas reações, igual a $L/3$ do vão, conforme Figura 35.

Figura 35 – Esquema de carregamento da viga composta



Fonte: Autoria própria (2023)

De maneira geral, os ensaios consistem no carregamento monotônico da viga e na medida do deslocamento transversal no meio do vão. As medições dos deslocamentos foram feitas por transdutores de deslocamento com exatidão de 0,01 mm. Um deles foi colocado no centro do vão para as medidas de flecha das vigas. Os outros dois foram ajustados entre a mesa superior e a alma no extremo da viga, para registrar os deslocamentos dos apoios, como mostra a Figura 36.

Figura 36 - Viga composta posicionada para ensaio



Fonte: Autoria própria (2023)

Para avaliação da rigidez à flexão foram realizados três ciclos de carregamento, tendo sido registrados os valores observados no último ciclo. Estes carregamentos foram conduzidos até o limite de flecha $L/300$ para todas as vigas, de

forma a não exceder o regime elástico do material. Ao final do terceiro ciclo, após a retirada dos relógios comparadores, as vigas foram conduzidas à ruptura, como mostra a Figura 37.

Figura 37 - Viga composta após ruptura



Fonte: Autoria própria (2023)

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios experimentais, em forma de tabelas e discussões referentes aos respectivos resultados.

6.1 Ensaios de caracterização da madeira

A Tabela 6 apresenta os resultados de teor de umidade de cada corpo de prova ensaiado.

Tabela 6 - Resultados dos ensaios umidade

CP	Massa Úmida (g)	Massa Seca (g)	Teor de Umidade (%)
1	28,829	26,495	8,81
2	28,976	26,337	10,02
3	28,110	25,920	8,45
4	28,661	26,085	9,88
5	28,644	26,089	9,79
6	28,531	25,944	9,97
Média			9,49
Desvio Padrão			0,62
Coef. Variação			6,52%

Fonte: Autoria própria (2023)

A Tabela 7 apresenta os valores de densidade de cada corpo de prova ensaiado.

Tabela 7 - Resultados dos ensaios densidade

CP	$\rho_{12\%}$ (Kg/m ³)
1	872,63
2	841,30
3	816,26
4	832,52
5	820,11
6	828,42
Média	835,21
Desvio Padrão	18,61
Coef. Variação	2,23%

Fonte: Autoria própria (2023)

A Tabela 8 a seguir apresenta os valores de resistência (f_{c0}) e módulo de elasticidade (E_{c0}) encontrados para um total de 6 amostras ensaiadas à compressão paralela às fibras.

Tabela 8 - Resultados dos ensaios de compressão

CP	f_{c0} (MPa)	E_{c0} (MPa)
1	77,83	18599
2	75,41	19632
3	80,54	18743
4	86,06	19071
5	65,75	16881
Média	77,12	18585
Desvio Padrão	6,70	923
Coef. Variação	8,69%	4,97%

Fonte: Autoria própria (2023)

6.2 Ensaio de ligações

Na Tabela 9 são apresentados os valores de módulo de deslizamento de serviço (K_{ser}) e força última (F_u) dos corpos de prova de ligação.

Os ensaios foram conduzidos com carregamento aplicado em dois ciclos de carga e descarga, definido pelos níveis de 10% e 40% da resistência máxima.

Tabela 9 - Resultados dos ensaios de ligação

CP	K_{ser} (N/mm)	F_u (N)
1	18030	15813
2	16599	13161
3	17297	14410
4	16948	15545
5	18269	15803
6	15106	16340
Média	17042	15179
Desvio Padrão	1041	1075
Coef. Variação	6%	7%

Fonte: Autoria própria (2023)

A Figura 38 demonstra a ruptura do corpo de prova de ligação.

Figura 38 - Rompimento do corpo de prova



Fonte: A autoria própria (2023)

Góes (2002) realizou estudo experimental sobre módulo de deslizamento de ligações pregadas. Os resultados indicaram um valor de módulo de deslizamento de 23863 N/mm, com pregos de 22 x 48 (5,4 mm) pregados a 90°, 28,60% maior em relação aos resultados obtidos com parafusos de 6 x 100 mm (4 mm no fuste) inclinados a 45° (17042 N/mm). Foi realizado também ensaio com pregos de 18 x 30 (3,4 mm) e obteve-se valor de módulo de deslizamento de 11726 N/mm, 31% menor em relação ao parafuso.

Em relação à força de ruptura média, o ensaio realizado com pregos de 22 x 48 resultaram em uma média de 6613 N, 56% menor em relação ao parafuso, onde foi-se obtido a média de 15179 N. Os pregos de 18 x 30 apresentaram média de 5723 N, 62% menor em relação ao parafuso.

6.3 Ensaio dos parafusos

Na Tabela 10 estão indicados os resultados de resistência última do aço dos parafusos determinados por ensaio de tração simples seguindo os procedimentos do item 5.8 do capítulo Materiais e métodos.

Tabela 10 - Resultados dos ensaios de tração dos parafusos

CP	f_u (MPa)
1	1050,335
2	874,691
3	997,518
4	1079,432
Média	1000,494
Desvio Padrão	78,34
Coef. Variação	7,83%

Fonte: Autoria própria (2023)

6.4 Ensaios preliminares de flexão estática

Na Tabela 11 são apresentados os resultados dos ensaios preliminares realizados em cada peça individual utilizada para compor as vigas. Foi obtido um valor de módulo de elasticidade à flexão para cada peça. Estes resultados são utilizados para a análise de comportamento de vigas compostas.

Tabela 11 - Módulo de elasticidade das peças individuais das vigas compostas

Peça	Dimensões (b x h) (mm)	P (N)	T.D. esquerdo (mm)	T.D. central (mm)	T.D. Direito (mm)	Δ (mm)	E_m (MPa)
Mesa Sup. V1	151,5 x 49,5	60	0,032	5,000	0,028	4,9685	14860
		410	0,081	20,000	0,123	19,947	
Alma V1	58,0 x 157,0	210	0,089	1,750	0,037	1,687	13363
		4780	0,122	19,680	0,254	19,492	
Mesa Inf. V1	150,0 x 49,0	60	0,002	6,000	0,033	5,983	15075
		400	0,002	21,000	0,163	20,918	
Mesa Sup. V2	152,0 x 49,5	60	0,013	4,000	0,028	3,993	15871
		460	0,059	20,000	0,123	19,968	
Alma V2	57,5 x 153,0	460	0,671	2,100	0,366	1,581	19868
		6270	0,956	19,000	0,694	18,175	
Mesa Inf. V2	160,0 x 49,0	120	0,018	6,000	0,043	5,970	19073
		550	0,018	20,000	0,051	19,966	

Fonte: Autoria própria (2023)

6.5 Ensaios das vigas compostas

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios das duas vigas compostas, nas Tabelas 12 e 13. A primeira coluna representa a viga composta ensaiada, os valores de força aplicada estão representados na segunda coluna. Os valores apresentados nos transdutores de deslocamento estão representados nas colunas T.D. esquerdo, T.D. central e T.D. direito. O valor da flecha é apresentado na coluna Δ (mm). Após certo valor de força aplicada, afim de evitar danos aos

transdutores de deslocamento, os mesmos foram retirados e ao final de cada tabela encontra-se o valor de ruptura das vigas.

Tabela 12 – Resultado do ensaio de flexão da viga composta 1

Viga	P (N)	T.D. esquerdo (mm)	T.D. central (mm)	T.D. Direito (mm)	Δ (mm)
V1	2300	0,157	2,000	0,186	1,829
	3520	0,357	4,000	0,334	3,655
	4840	0,487	6,000	0,472	5,521
	6340	0,580	8,000	0,590	7,415
	8000	0,642	10,000	0,691	9,334
	9800	0,687	12,000	0,773	11,270
	11750	0,708	14,000	0,834	13,229
	13860	0,716	16,000	0,893	15,196
	16010	0,716	18,000	0,950	17,167
	18100	0,716	20,000	1,014	19,135
	19720	0,758	22,000	1,090	21,076
	21240	0,807	24,000	1,173	23,010
	22600	0,855	26,000	1,266	24,940
	23850	0,909	28,000	1,344	26,874
	25310	0,973	30,000	1,432	28,798
	26310	1,030	32,000	1,500	30,735
	27510	1,099	34,000	1,577	32,662
	28760	1,153	36,000	1,654	34,597
	29750	1,208	38,000	1,706	36,543
	30810	1,269	40,000	1,755	38,488
31710	1,327	42,000	1,807	40,433	
32830	1,388	44,000	1,849	42,382	
36710			Ruptura		

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 13 - Resultado do ensaio de flexão da viga composta 2

(continua)

Viga	P (N)	Rel. esquerdo (mm)	Rel. central (mm)	Rel. Direito (mm)	Δ (mm)
V2	3030	0,444	2,000	0,187	1,685
	4880	0,664	4,000	0,365	3,486
	6880	0,824	6,000	0,490	5,343
	9080	0,930	8,000	0,572	7,249
	11410	1,000	10,000	0,645	9,178
	13920	1,080	12,000	0,717	11,102
	16690	1,141	14,000	0,788	13,036
	19550	1,201	16,000	0,857	14,971
	22240	1,270	18,000	0,937	16,897
	24510	1,339	20,000	1,021	18,820
	26400	1,408	22,000	1,118	20,737
	28360	1,487	24,000	1,201	22,656

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 13 - Resultado do ensaio de flexão da viga composta 2

Viga	P (N)	Rel. esquerdo (mm)	Rel. central (mm)	Rel. Direito (mm)	Δ (mm)
	30040	1,566	26,000	1,300	24,567
	31520	1,643	28,000	1,347	26,505
	33240	1,715	30,000	1,492	28,397
	34510	1,792	32,000	1,590	30,309
	52050	Ruptura			

(conclusão)

Fonte: Aatoria própria (2023)

A Figura 39 apresenta uma visão geral da viga composta após ensaio destrutivo, já a Figura 40 demonstra que devido à ruptura dos parafusos da viga, gerou-se deslizamento entre as peças da mesma.

Figura 39 - Viga após ensaio destrutivo**Fonte: Aatoria própria (2023)**

Figura 40 - Deslizamento entre as peças da viga composta



Fonte: Autoria própria (2023)

Na Tabela 14, são apresentados os valores de rigidez das vigas, a coluna EI_{total} ($N \cdot mm^2$) considera a composição total com rigidez infinita, a coluna $EI_{NBR\ 7190}$ ($N \cdot mm^2$) considera o valor de rigidez calculado segundo a ABNT NBR 7190:2022, já a coluna $EI_{EXP.}$ ($N \cdot mm^2$) demonstra os valores obtidos por ensaio de flexão estática das vigas compostas. Os valores de $\alpha_{NBR\ 7190}$ e $\alpha_{EXP.}$ representam a diferença dos valores de $EI_{NBR\ 7190}$ e $EI_{EXP.}$ em relação a EI_{total} .

Tabela 14 - Comparação de rigidez das vigas

Viga	EI_{total} ($N \cdot mm^2$)	$EI_{NBR\ 7190}$ ($N \cdot mm^2$)	$EI_{EXP.}$ ($N \cdot mm^2$)	$\alpha_{NBR\ 7190}$	$\alpha_{EXP.}$	Diferença (%)
V1	$2,658 \cdot 10^{12}$	$1,544 \cdot 10^{12}$	$1,024 \cdot 10^{12}$	0,58	0,39	33,0
V2	$3,120 \cdot 10^{12}$	$1,712 \cdot 10^{12}$	$1,244 \cdot 10^{12}$	0,55	0,40	27,0

Fonte: Autoria própria (2023)

Os resultados que Góes (2002) obteve das vigas compostas ensaiadas são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Comparação de rigidez das vigas

Viga	El_{total} (kN·cm²)	El_{EC5} (kN·cm²)	El_{EXP.} (kN·cm²)	α_{EC5}	α_{EXP.}	Diferença (%)
A1	12389321	10993965	10660463	0,89	0,86	-3,0
A2	12221476	10877689	10355724	0,89	0,85	-4,8
A3	13384421	11837396	11445233	0,88	0,86	-3,3
C1	20779163	15630796	13454931	0,75	0,65	-13,9
C2	21980521	15630796	13743379	0,72	0,66	-13,9
C3	17817781	13465536	12731707	0,76	0,72	-5,5
P1	7733260	5943941	5789292	0,77	0,75	-2,6
P2	28208205	16389020	16527848	0,58	0,59	0,8
P3	20336034	16663170	17017367	0,82	0,84	2,1

Fonte: Autoria própria (2023)

Nos ensaios de Góes (2002), as vigas de Angelim foram as que obtiveram maior coeficiente de rendimento, se comparadas com as de Cedrinho e Pinus, com A1 e A3 apresentando o maior α_{EXP} de 0,86, sendo este resultado 47,7% maior que o obtido no ensaio utilizando parafuso autoatarraxante a 45°, que foi de 0,40. Além disso, a menor diferença apresentada nos ensaios do autor foi de 0,8%, na viga P2, valor significativamente menor que nos ensaios realizados com parafuso, em que o valor mais baixo obtido foi de 27%.

7 CONCLUSÃO

A partir dos estudos realizados na revisão bibliográfica sobre peças compostas, pôde-se concluir que as vigas compostas são de simples fabricação e baixo custo de produção, podendo ser uma ótima solução quando for necessário um acréscimo de inércia sem a disponibilidade de peças para tal função.

Em relação aos resultados obtidos na pesquisa, pôde-se comprovar a influência da rigidez das ligações no comportamento das vigas compostas solidarizadas continuamente por parafusos autoatarraxantes a 45°.

Os resultados demonstraram que o módulo de deslizamento do parafuso autoatarraxante, inserido a 45° foi 31% superior se comparado ao prego de 18 x 30, porém, foi 28,60% inferior quando comparado ao prego de 22 x 48, ou seja, o valor do módulo de deslizamento para o parafuso analisado encontra-se entre esses dois valores.

Com relação ao modo de ruptura observado no ensaio dos corpos de prova de ligação a 45°, observou-se arrancamento e flexão do parafuso como modo de falha, seguindo o padrão para todos os 6 ensaios realizados.

A respeito das vigas compostas com parafusos inclinados a 45°, estas obtiveram valor de rigidez inferior ao estimado pela ABNT NBR 7190:2022. A primeira viga ensaiada apresentou resultado 33% inferior e a segunda 27%.

Em ambas as vigas pôde-se observar que o modo de ruptura ocorreu por tração na fibra inferior da alma, após significativo deslocamento da peça composta. Ao chegar próximo do limite de ruptura das vigas, observou-se grande deslizamento entre as mesas e a alma, configurando uma perda significativa de rigidez dos conectores. Não foi observado ruptura na mesa superior e inferior em nenhuma das duas vigas.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 198**: Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes. West Conshohocken, 2015.
- APA (2010) **A Guide To Engineered Wood Products – C800**. Disponível em: <<https://www.apawood.org/publication-search?q=>>. Acesso em: 02 out. 2023.
- APA (2019) **APA Engineered Wood Construction Guide – E30**. Disponível em: <<https://www.apawood.org/publication-search?q=>>. Acesso em: 02 out. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6207**: Arame de aço - Ensaio de tração. Rio de Janeiro, 1982.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6892**: Materiais metálicos – Ensaio de Tração. Rio de Janeiro, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro, 2022.
- ALVIM, R. C. **A Resistência dos Pilares de Madeira Composta**. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- Belenus (2014). **Catálogo de parafusos e porcas**. Disponível em: <https://belenus.com.br/api/arquivo/download/catalogo_fixadores.pdf>. Acesso em: 02 out. 2023.
- BLASS, H.J.; BEJTKA, I. **Screws with Continuous Threads in Timber Connections**. Disponível em: <http://www.holz.uni-karlsruhe.de/seite_21.html>. Alemanha, 2001. Acesso em: 05 ago. 2003.
- CRUZ, I. S. **Ligações em Estruturas De Madeira**. 2016. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Aveiro, Aveiro, 2016.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **CEN EN 912**: Timber fasteners - Specifications for connectors for timber. Brussels, 2011.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **CEN EN 1995-1**: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings. Brussels, 2004.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **CEN EN 26891**: Timber structures – Joints made with mechanical fasteners – General principles for the determinations of strength and deformation. Brussels, 1991.
- GEHRI, E.(1988). **Zusammengesetzte Träger. In: Autographie Einführung in die Norm 164 (1981)**. Cap. 10, p.285 - 298.
- Gerdau (2023). **Catálogo de pregos**. Disponível em: <https://www2.gerdau.com/sites/gln_gerdau/files/downloadable_files/catalogo-pregos.pdf>. Acesso em: 02 out. 2023.

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.

HAMMAD, M. W., et al. Timber-timber composite (TTC) beams subjected to hogging moment. **Construction and Building Materials**, v. 321, n 12695, Sydney, 2022.

KIDWELL, E. The efficiency of built-up wooden beams. **American Institute of Mining Engineers**. v.27, n 1, p.732-818, 1897.

LEICHTI, R. J.; FALK, R. H.; LAUFENBERG, T. L. Prefabricated wood composite I-beams: A literature review. **Wood and fiber science**, v. 22, n 1, Madison, p. 62-79, 1990.

MADSEN. B. Reliable timber connections. **Progress in Structural Engineering and Materials**, v. 1, n 3, Canada, p. 245-252, 1998.

MAGALHAES, L. N. **Estudo teórico e experimental de vigas" I" de madeira com alma de compensado (VCMC)**. 2005. 178 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

MENDES, P. M. **Ligações em estruturas de madeira - Tecnologia e dimensionamento de acordo com o EUROCÓDIGO 5**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1994.

MIOTTO, J. L. **Estruturas mistas de madeira-concreto: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibras de vidro**. 2009. 325 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

NIEMZ, P.; TEISCHINGER, A.; SANDBERG, D. **Springer Handbook of Wood Science and Technology**. Suíça: Springer Cham, 2023.

PORTEOUS, J.; KERMANI, A. **Structural timber design to Eurocode 5**. Oxford, Blackwell Publishing Ltd., 2007.

REMADE. **LVL**. Edição N°71. Disponível em: http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=329&subject=LVL&title=Pain%C3%A9is%20Laminados%20Estruturais.%20LVL%27s. Acesso em: 22 maio. 2023.

Rothoblaas (2023). **Catálogo de parafusos para madeira e ligações para terraços**. Disponível em: <https://issuu.com/rothoblaas/docs/parafusos-para-madeira-e-ligacoes-para-terraços-pt?mode=embed>. Acesso em: 02 out. 2023.

SANTANA, C. L. O.; MASCIA, N.T. Abordagem Numérica de Vigas de Madeira de Seção Composta com Alma em Chapa de Compensado. **VII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira**. São Carlos, 19 à 21 de Julho de 2000. Anais. São Carlos - EESC.

SILVA, C. C. **Análise teórica e experimental de vigas de madeira de seção transversal "I" para uso em fôrmas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

SILVA, R. F. **Cálculo ao Fogo de Ligações de Madeira**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Aveiro, Aveiro, 2009.

STAMATO G. C. **Ligações em estruturas de madeira compostas por chapas de madeira compensada**. Tese (Doutorado) - Escola Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo - USP, São Carlos, 2002.

STAMATO, G. C.; CALIL JR., C. **Rigidez de nó de pórtico em estruturas de seção composta pregada utilizando chapas de compensado**. Revista Madeira Arquitetura e Engenharia, São Carlos, 2002.

SZÜCS, C. A.; *et al.* **Estruturas de madeira**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

THELANDERSSON, S.; LARSEN, H. **Timber Engineering**. England, Wiley & Sons Ltd., 2003.

TOMASI, R.; CROSATTI, A.; PIAZZA, M. Theoretical and experimental analysis of timber-to-timber joints connected with inclined screws, **Construction and Building Materials**, v. 24, n 9, Trento, p. 1560-1571, 2010.