

KARINA TAIZA TOMÉ

ANÁLISE DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DE VIGAS COM PERFIL I EM
MADEIRA COLADA, UTILIZANDO TRÊS DIFERENTES TIPOS DE ADESIVOS

CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
AGOSTO – 2022

KARINA TAIZA TOMÉ

**ANÁLISE DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DE VIGAS COM PERFIL I EM
MADEIRA COLADA, UTILIZANDO TRÊS DIFERENTES TIPOS DE ADESIVOS**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Alfredo Petruski

CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
AGOSTO – 2022

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Taiza Tomé, Karina

Análise do desempenho estrutural de vigas com perfil I em madeira colada, utilizando três diferentes tipos de adesivos / Karina Taiza Tomé; orientador Alfredo Petruski. -- Cascavel, 2022.

121 p.

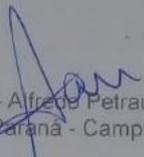
Dissertação (Mestrado Acadêmico Campus de Cascavel) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, 2022.

1. Estruturas de madeira. 2. Vigas com perfil em I. 3. Adesivos. 4. Madeira colada . I. Petruski, Alfredo , orient. II. Título.

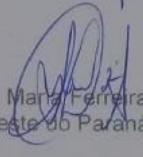
KARINA TAIZA TOMÉ

Análise do desempenho estrutural de vigas com perfil I em madeira colada,
utilizando três diferentes adesivos

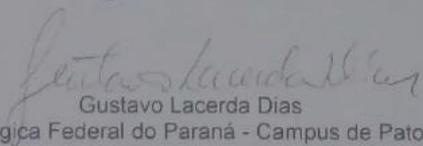
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestra em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Fontes Renováveis e Racionalização de Energia na Agroindústria e Agricultura, APROVADA pela seguinte banca examinadora:


Orientador - Alfredo Petruski

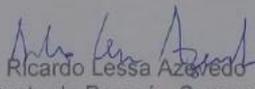
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)


Sandra Maria Ferreira Couri Petruski

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)


Gustavo Lacerda Dias

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus de Pato Branco (UTFPR)


Ricardo Lessa Azevedo

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Cascavel, 19 de agosto de 2022

*“Dedico esta dissertação à minha família,
especialmente à minha mãe, Maria, que
esteve presente em todos os momentos da
minha vida, e que me ensina todos os dias
com seu exemplo de simplicidade e força.”*

*“Walk on, walk on
with hope in your heart
and you'll never walk alone
you'll never walk alone.” (Gerry And The
Pacemakers).*

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Maria e Guilherme, por todo apoio durante o período do mestrado e na vida. Não tenho palavras para descrever o que vocês fizeram e fazem por mim todos os dias, e por todo esforço sem medidas em me ajudar. Obrigada por serem tão pacientes e atenciosos comigo. Espero continuar lhes dando orgulho.

Agradeço à minha avó, Marilde, pelas risadas e por todo incentivo diário. Obrigada pela criação e por estar presente em minha vida todos os dias. Não imagino a minha vida sem a senhora presente em nossa casa.

Ao meu irmão, Gilliard, por todo o carinho e momentos felizes e por fazer parte da minha vida. Pelo companheirismo e amizade que nos acompanha desde quando eu tinha pouco mais de ano de vida.

Ao meu orientador, Professor Alfredo Petruski, exemplo de honestidade e bom caráter. Agradeço pela sua orientação, pelos merecidos puxões de orelha, pelos conselhos, pela amizade e principalmente por tudo que me ensinou. Pelas incansáveis manhãs e tardes no laboratório que agregaram muito em minha vida pessoal e profissional. Obrigada por acreditar em mim e por me orientar.

À minha querida colega de laboratório, Desirè, que se tornou uma grande amiga. Se este trabalho pôde ser finalizado, boa parte foi graças a sua ajuda. Agradeço por sempre estar disposta a ajudar, por todas as conversas enquanto trabalhávamos duro, fazendo com que a jornada fosse mais leve. Conte sempre comigo.

Ao meu namorado, Everton, que me apoiou e ajudou me dando seu carinho e me fazendo se sentir amada. Muito obrigada por ser quem é e por estar ao meu lado.

Aos meus amigos que mesmo distantes sempre me apoiaram durante esta caminhada. Em especial, Thamyres, Alcione, Letícia, Jaqueline e Jéssica. Amizade que faço questão de levar para a vida toda.

Ao laboratorista Maxer, pela disponibilidade, conversas e ajuda na execução de toda a pesquisa.

Por fim, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), pela concessão da bolsa para a realização desta pesquisa.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Composição de uma peça em MLC.	7
Figura 2 - Tipos de emendas.....	7
Figura 3 - Vigas laminadas de seção retangular: (a) uma lâmina por camada; (b) duas lâminas por camada; (c) viga I laminada; (d) viga I com alma de compensado; (e) e (f) viga celular ou viga-caixão, com alma de compensado.	9
Figura 4 - Comparação da economia de madeira na viga de seção I em relação à retangular.	10
Figura 5 - Tipos de emendas mesa/alma.	11
Figura 6 - Representação das forças de adesão e coesão entre dois substratos unidos por um adesivo.....	14
Figura 7 - Serra circular (a) e desempenadeira (b).	20
Figura 8 - Representação em planta do corte das tábuas de 30 x 300 (a) e tábuas de 25 x 300 (b) (medidas do desenho em metros).....	21
Figura 9 - Lâminas empilhadas.	22
Figura 10 - Limpeza das lâminas (a), aplicação do adesivo na lâmina de madeira (b) e prensagem dos corpos de prova (c).....	23
Figura 11 - Representação do corpo de prova para ensaio de compressão.....	25
Figura 12 - Representação do corpo de prova para ensaio de cisalhamento perpendicular ao plano de cola (a); paralelo ao plano de cola (b).....	26
Figura 13 - Corpo de prova para ensaio de resistência ao cisalhamento paralelo a linha de cola (esquerda) e perpendicular a linha de cola (direita).....	26
Figura 14 - Execução dos ensaios de cisalhamento (a), compressão (b) e flexão (c).	27
Figura 15 - Corpo de prova para ensaio de resistência de juntas coladas (dimensões em mm).	28
Figura 16 - Corpo de prova para ensaio de resistência de juntas coladas.....	29
Figura 17 - Seção transversal da viga (medidas em cm).	32
Figura 18 - Representação da aplicação das cargas na viga (cotas em centímetros).	33
Figura 19 - Ligação entre mesa e alma da viga Fonte: Autor, 2022.....	38
Figura 20 - Gabarito de prensagem	39

Figura 21 – Cantoneira instalada na mesa inferior à esquerda e travamento de madeira instalada na mesa superior à direita.....	40
Figura 22 – Alma posicionada na balança para mensuração do adesivo na face superior da alma (a), aplicação do adesivo (b) e espalhamento do adesivo na face inferior da alma (c).	41
Figura 23 - Aplicação de pressão com auxílio com torquímetro digital.	42
Figura 24 - Viga posicionada na laje de reação.	43
Figura 25 - Pontos de aplicação de carga (medidas em cm).	43
Figura 26 - Disposição dos aparatos para o ensaio.	44
Figura 27 - Relógio instalado no meio do vão.	44
Figura 28 - Histograma da quantidade de tábuas pela densidade aparente do lote.	46
Figura 29 – Boxplot da densidade aparente do lote de madeira.	47
Figura 30 - Viga V18 após o ensaio, detalhe do efeito da torção.	60
Figura 31 – Viga V21 após a ruptura.....	60
Figura 32 – Vigas V14 (a), V10 (b) e V12 (c) após a ruptura.	61
Figura 33 – Detalhe do defeito na alma da viga V4 e fibras da lâmina superior sofrendo esmagamento.....	62
Figura 34 – Viga V4 após a ruptura.....	62
Figura 35 – Viga V5 após a ruptura.....	62
Figura 36 - Detalhe da ruptura por compressão na mesa superior da viga V2.	64
Figura 37 - Viga V2 após a ruptura.	64
Figura 38 - Viga V3 após a ruptura.	65
Figura 39 - Viga V7 após a ruptura.	65
Figura 40 - Viga V8 após a ruptura.	65
Figura 41 - Viga V13 após a ruptura. Fonte: Autor, 2022.....	65
Figura 42 - Viga V19 após a ruptura.	66
Figura 43 - Viga V16 após a ruptura.	66
Figura 44 - Detalhe do defeito na viga V1.	68
Figura 45 - Viga V1 após a ruptura.	68
Figura 46 - Detalhe da ruptura da viga V6.	69
Figura 47 - Viga V6 após a ruptura.	69
Figura 48 - Detalhe do defeito da viga V9.	70

Figura 49 - Viga V9 após a ruptura.	70
Figura 50 - Viga V11 após a ruptura.	70
Figura 51 - Viga V15 após a ruptura.	71
Figura 52 - Viga V17 após a ruptura.	71
Figura 53 - Detalhe de esmagamento por compressão das fibras da mesa superior da viga V20.	72
Figura 54 - Viga V20 após a ruptura.	72
Figura 55 - Diagrama carga x deslocamento das vigas coladas com mamona.	76
Figura 56 - Diagrama carga x deslocamento das vigas coladas com PUR.	77
Figura 57 - Diagrama carga x deslocamento das vigas coladas epóxi.	78
Figura 58 - Diagrama carga x deslocamento para as vigas coladas com os três adesivos.	79
Figura 59 - Cargas de ruptura para cada série de vigas.	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Delineamento experimental do adesivo PUR.....	30
Tabela 2 - Delineamento experimental do adesivo epóxi.....	31
Tabela 3 - Planejamento experimental das vigas.....	37
Tabela 4 - Temperatura e umidade relativa do ar nos dias de colagem.....	41
Tabela 5 - Resultados da caracterização física e mecânica da madeira de Pinus sp	48
Tabela 6 - Resultados da resistência ao cisalhamento de juntas coladas com adesivo	50
Tabela 7 - Valores médios das resistências em função da pressão e da gramatura das juntas coladas com adesivo PUR.....	50
Tabela 8 - Resultados da resistência ao cisalhamento de juntas coladas com adesivo epóxi.....	52
Tabela 9 - Valores médios das resistências em função da pressão e da gramatura das juntas coladas com adesivo epóxi.....	53
Tabela 10 - Resultados da caracterização física e mecânica da madeira de Pinus sp.	54
Tabela 11 - Valores de resistências das vigas coladas com adesivo de mamona. ...	59
Tabela 12 - Valores de resistências das vigas coladas com adesivo PUR.	63
Tabela 13 - Valores de resistências das vigas coladas com adesivo epóxi.	67
Tabela 14 - Resistências apresentadas pelas vigas	73
Tabela 15 - Correlação entre massa e resistência das vigas.....	73
Tabela 16 - Valores de deslocamentos médios (cm) para carga de 6 kN.....	75
Tabela 17 - Valores médios de cargas de ruptura (kN) em função do tipo de adesivo.	80
Tabela 18 - Valores médios de cargas (kN) em função de cada tipo de adesivo, associados às flechas normativas.....	82
Tabela 19 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade na compressão.	90
Tabela 20 - Resultados do ensaio de compressão paralela às fibras.	91
Tabela 21 - Resultados do ensaio de tração na flexão	91
Tabela 22 - Resultados do ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.....	92

Tabela 23 - Resultados do ensaio preliminar de cisalhamento de juntas coladas com adesivo PUR	93
Tabela 24 - Resultados do ensaio preliminar de cisalhamento de juntas coladas com adesivo epóxi	98
Tabela 25 - Resultados do ensaio de cisalhamento à compressão de juntas coladas com adesivo de mamona	101
Tabela 26 - Resultados do ensaio de cisalhamento de juntas coladas com adesivo PUR.....	102
Tabela 27 - Resultados do ensaio de cisalhamento de juntas coladas com adesivo epóxi.....	103
Tabela 28 - Análise de variância das juntas coladas com adesivo PUR	104
Tabela 29 - Resultado do teste Tukey para variável independente Pressão	104
Tabela 30 - Resultado do teste Tukey para variável independente Consumo	104
Tabela 31 - Análise de variância das juntas coladas com adesivo epóxi	105
Tabela 32 - Análise de variância do desdobramento da pressão dentro dos níveis de consumo.....	105
Tabela 33 - Resultado do desdobramento da pressão dentro do nível 500 de consumo	105
Tabela 34 - Resultado do desdobramento da pressão dentro do nível 500 de consumo	105
Tabela 35 - Análise de variância do desdobramento do consumo dentro dos níveis de pressão	106
Tabela 36 - Resultado do desdobramento do consumo dentro do nível 10 de pressão	106
Tabela 37 - Resultado do desdobramento do consumo dentro do nível 7 de pressão	106
Tabela 38 - Análise de variância da resistência apresentadas pelas vigas.....	106
Tabela 39 - Análise de variância dos carregamentos para flechas limite L/200	107
Tabela 40 - Análise de variância dos carregamentos para flechas limite L/350	107

TOMÉ, Karina, Taiza. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, julho de 2022. **Análise do desempenho estrutural de vigas com perfil I em madeira colada, utilizando três diferentes tipos de adesivos.** Professor orientador Dr. Alfredo Petrauski.

RESUMO

Pesquisas em diversos setores têm focado na substituição das matérias primas oriundas de combustíveis fósseis por materiais de origem natural e renovável. Nesse sentido, estudos voltados para o uso da madeira na construção civil e agrícola têm sido incentivados e desenvolvidos. A madeira pode ser utilizada como estrutura definitiva, a exemplos de vigas e pilares, ou estruturas temporárias, como em escoras e formas. Ainda, o estudo de elementos compostos em madeira tem recebido significativa atenção de indústrias e pesquisadores. Sendo assim, o presente estudo teve como objetivo produzir e avaliar o desempenho estrutural de vigas com perfil em I de madeira laminada colada utilizando madeira de *Pinus sp.*, com três diferentes tipos de adesivos, sendo eles: adesivo bicomponente à base de óleos vegetais, adesivo monocomponente à base de poliuretano e adesivo à base de resina epóxi. Foi realizada a caracterização da madeira para obter suas propriedades físicas e mecânicas, bem como ensaios preliminares para definir a pressão de colagem e consumo para a utilização do adesivo PUR e epóxi. Por meio dos resultados obtidos nos ensaios e análise estatística, definiu-se que o consumo do adesivo PUR seria de 250 g/m² e pressão de colagem de 0,7 MPa, e para o adesivo epóxi, consumo de 300 g/m² e pressão de colagem de 1,0 MPa. Para o adesivo à base de óleos vegetais utilizou-se consumo de 300 g/m² e pressão de 0,8 MPa, com base em estudos já realizados. Confeccionou-se 21 vigas com mesa superior de 8,3 cm e mesa inferior de 5,2 cm de largura e 2 cm de espessura e alma com 12 cm de altura e 2 cm de espessura. Adotou-se comprimento de 2,50 m, com vão livre entre os apoios de 2,30 m. Quanto às resistências, as vigas coladas com adesivo à base de óleos vegetais obtiveram uma maior carga média de ruptura, sendo de 20,45 kN, enquanto as vigas coladas com PUR alcançaram 18,82 kN, e as vigas coladas com adesivo epóxi tiveram média de 16,40 kN. Quanto à rigidez, as estruturas atingiram os limites normativos para carregamentos totais na ordem de 3 kN para flecha admissível de L/350, e 5 kN para flecha normativa de L/200. Além disso, observou-se que as vigas coladas com adesivo de mamona apresentaram maior rigidez média quando comparadas aos demais adesivos. Com relação aos deslocamentos teóricos destas flechas, as vigas exibiram valores maiores. Quanto à análise estatística das resistências e flechas limites, observou-se que não houve diferença significativa ao nível de 5% entre os adesivos.

PALAVRAS-CHAVE: desempenho estrutural; adesivos poliuretanos; adesivo epóxi.

“O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001”

TOMÉ, Karina, Taiza. State University of West Paraná, July 2022. **Analysis of I-profile beams in glued wood, using three different types of adhesives.** Advisor Professor Dr. Alfredo Petruski.

ABSTRACT

Researches in several sectors has focused on replacing raw materials from fossil fuels with materials of natural and renewable origin. In this sense, studies focused on the use of timber in civil and agricultural construction have been encouraged and developed. Timber can be used as a definitive structure, examples of beams and pillars, or temporary structures, as in struts and forms. Still, the study of composite elements in timber has received significant attention from industries and researchers. Therefore, the present study aimed to produce and evaluate the structural performance of I-beams of glued laminated timber and made of *Pinus* sp. timber, with three different types of adhesives, namely: two-component vegetable oils-based adhesive. The timber characterization was carried out to obtain its physical and mechanical properties, as well as preliminary tests to define the gluing pressure and consumption for the use of PUR and epoxy adhesive. Through the results found in the tests and statistical analysis, it was defined that the PUR adhesive consumption would be 250 g/m² and bonding pressure of 0.7 MPa; for the epoxy adhesive, consumption of 300 g/m² and pressure of gluing of 1.0 MPa. For the vegetable oil-based adhesive, a consumption of 300 g/m² and a pressure of 0.8 MPa were used, based on studies already carried out. Twenty one beams were made with an upper flange of 8.3 cm and a lower flange of 5.2 cm in width and 2 cm in thickness and a web with 12 cm in height and 2 cm in thickness. A length of 2.50 m was adopted, with a free 2.30 m span between the supports. As for the strengths, the beams glued with vegetable oil-based adhesive had a higher average rupture load of 20.45 kN, while the beams glued with PUR reached 18.82 kN and the beams glued with epoxy adhesive had an average of 16.40 kN. As for stiffness, the structures reached the normative limits for total loads in the order of 3 kN for allowable deflection of L/350 and 5 kN for normative deflection of L/200. In addition, it was observed that the beams glued with castor oil had higher average stiffness when compared to the other adhesives. Regarding the theoretical displacements of these arrows, the beams showed higher values. As for the statistical analysis of the strengths and limit deflections, it was observed that there was no significant difference at the 5% level between the adhesives.

KEYWORDS: Structural performance; Polyurethane adhesives; Epoxy adhesive.

"This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001"

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	2
1.1.1	Objetivos específicos	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	O USO DA MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL	3
2.2	A MADEIRA LAMINADA COLADA	5
2.3	VIGAS COM PERFIL I	8
2.4	ADESIVOS.....	13
2.4.1	Adesivo monocomponente à base de poliuretano	15
2.4.2	Adesivo bicomponente à base de óleos vegetais	15
2.4.3	Adesivo à base de resina epóxi	16
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	18
3.1	SECAGEM E CONTROLE DE MASSA.....	19
3.2	CLASSIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA	22
3.2.1	Densidade aparente	24
3.2.2	Caracterização da madeira.....	24
3.2.3	Resistência das juntas coladas.....	28
3.2.4	Ensaio preliminares.....	29
3.3	VIGA COM PERFIL I	31
3.3.1	Estimativa da carga de ruptura	33
3.3.2	Solicitações normais na flexão simples	33
3.3.3	Solicitações tangenciais de cisalhamento.....	35
3.3.4	Estado Limite de Utilização.....	36
3.4	CONFECÇÃO DAS VIGAS	37
3.5	ENSAIO DAS VIGAS.....	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1	CARACTERIZAÇÃO DAS PEÇAS DE MADEIRA	46
4.1.1	Densidade aparente	46
4.1.2	Caracterização da madeira.....	48

4.1.3	Análise da gramatura e pressão de colagem do adesivo poliuretano monocomponente.....	49
4.1.4	Análise da gramatura e pressão de colagem do adesivo à base de resina epóxi 51	
4.1.5	Resistência ao cisalhamento de juntas coladas	54
4.2	ESTIMATIVA DA CARGA DE RUPTURA DAS VIGAS	55
4.2.1	Solicitações normais na flexão simples	56
4.2.2	Solicitações tangenciais de cisalhamento.....	57
4.3	VERIFICAÇÃO PARA O ESTADO LIMITE DE SERVIÇO	58
4.4	RESULTADOS DA ANÁLISE EXPERIMENTAL DAS VIGAS	58
4.4.1	Resistências apresentadas pelas vigas coladas com adesivo à base de óleos vegetais.....	58
4.4.2	Resistências apresentadas pelas vigas coladas com adesivo poliuretano monocomponente.....	63
4.4.3	Resistências apresentadas pelas vigas coladas com adesivo à base de resina epóxi	66
4.4.4	Análise geral da resistência apresentada pelas vigas	72
4.4.5	Rigidez apresentada pelas vigas	74
4.4.6	Rigidez apresentada pelas vigas coladas com adesivo à base de óleos vegetais 75	
4.4.7	Rigidez apresentada pelas vigas coladas com adesivo poliuretano monocomponente.....	77
4.4.8	Rigidez apresentada pelas vigas coladas com adesivo a base de resina epóxi 78	
4.4.9	Rigidez média apresentada pelas vigas	79
4.4.10	Análises estatísticas	80
5	CONCLUSÕES	83
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
7	APÊNDICES.....	90
	APÊNDICE A	90
	APÊNDICE B	104

1 INTRODUÇÃO

É crescente a preocupação e estudos relacionados à utilização de materiais oriundos de fontes renováveis. Diversos setores, como o elétrico, mecânico, construção civil, entre outros, têm realizado pesquisas acerca da substituição de matérias primas provenientes de combustíveis fósseis por materiais sustentáveis.

A construção civil é tida como um dos setores de maior importância para a sociedade, no entanto, é uma das atividades que mais geram resíduos e conseqüentemente impactos ambientais. Gasques *et al.* (2014), citam que cerca de 75% da matéria prima disponível no ambiente é consumida por este setor, além de ser responsável por 1/3 da emissão de gases de efeito estufa.

Nesse sentido, ressurge o interesse no uso da madeira, que é considerado um recurso natural, renovável e encontrado em abundância no Brasil. Além disso, a madeira tem capacidade de fixação de carbono, fazendo com que seu uso reduza emissão desse gás na atmosfera. Apesar da abundância de madeira no Brasil, seu uso para fins estruturais ainda é considerado baixo, quando comparado a países da Europa e da América do Norte. No Brasil, seu uso está reduzido a tramas de telhados, pontes rurais ou peças para estruturas temporárias, como formas e escoras provisórias em obras de concreto armado. Os principais motivos disso são a falta de tecnologias, pouca divulgação especializada de estudos, como também o preconceito, que parte principalmente do consumidor (PELLIS, 2015).

Um das técnicas mais utilizadas nos países europeus e norte-americanos é a da madeira laminada colada. Tal técnica proporciona versatilidade arquitetônica, possibilidade de confecção de peças de grandes dimensões e diferentes formas, além de ser indicado para praticamente todo tipo de construção, inclusive para ambientes considerados quimicamente agressivos.

Diferentes estruturas podem ser obtidas utilizando a técnica de união de peças de madeira com adesivos. As vigas de madeira laminada colada podem ser confeccionadas com seções transversais retangulares e em perfil I, além disso, podem ser retas, curvadas, com seções constantes ou com variação da seção ao longo do comprimento (PFEIL e PFEIL, 2003).

Segundo fornecedores da cidade de Cascavel – PR, as vigas disponíveis para

o uso estrutural são de madeira serrada com seções retangulares e de madeira maciça. Com isso, despertou-se o interesse em realizar um estudo sobre a viabilidade de se utilizar vigas coladas com seções em I, visando obter peças com maior resistência e rigidez, economia de material, peças com menor incidência de defeitos e melhor distribuição das lâminas de madeira em regiões de maiores solicitações.

1.1 OBJETIVOS

Avaliar o desempenho estrutural de vigas produzidas em madeira laminada colada com perfil em I utilizando *Pinus sp.* e três diferentes adesivos.

1.1.1 Objetivos específicos

Tem-se como objetivos específicos:

- Realizar a caracterização da madeira *Pinus sp.*;
- Produzir vigas em madeira laminada colada utilizando três diferentes tipos de adesivos, sendo esses: bicomponente à base de óleos vegetais, monocomponente à base de poliuretano e à base de resina epóxi;
- Avaliar o desempenho das vigas quanto a sua resistência;
- Avaliar o desempenho das vigas quanto à rigidez;
- Avaliar estatisticamente a influência do adesivo na resistência e rigidez das vigas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados conceitos importantes em relação ao uso da madeira em sistemas estruturais, principalmente na forma de madeira laminada colada.

2.1 O USO DA MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A madeira está presente na vida humana desde o início de sua existência e atuando de diferentes formas, como fonte energética, sustento ou abrigo. Por ser um material versátil e resistente, a madeira contribuiu para o desenvolvimento das civilizações fazendo com que os homens buscassem conhecimento e, com isso, fosse possível dominar técnicas de manipulação para utilizar o material nos mais diversos setores (JÚNIOR, SILVA e SOARES, 2017).

De acordo com Calil Júnior e Dias (1997), a madeira apresenta propriedades de alta resistência em relação ao seu peso, bem como baixo consumo de energia para sua produção, tornando-a assim, um produto vantajoso para fabricação de elementos estruturais. Os autores afirmam ainda, que a madeira apresenta uma relação de densidade/resistência aproximadamente três vezes maior que o aço e quase dez vezes maior que o concreto.

Outra característica positiva da madeira é de que as peças estruturais possuem boa resistência ao fogo, ao contrário do que se é difundido popularmente. As peças de madeira quando expostas ao fogo agem como combustíveis, porém, quando a camada externa é carbonizada, a madeira passa a agir como isolante térmico, evitando que a temperatura em seu interior aumente, o que faz com que se mantenha a resistência proporcionando aumento do tempo de fuga. Além das vantagens citadas, a madeira é também considerada um material biodegradável, renovável e contribui para a fixação do carbono, assim como possui propriedades de isolamento acústico (CALIL JUNIOR e DIAS, 1997; AUGUSTIN, 2008).

Entretanto, apresenta algumas desvantagens, como a anisotropia, retratibilidade e inchamento, que podem causar rachaduras, variações em suas

propriedades mecânicas, que dependem do teor de umidade e da duração da carga, degradação biológica por fungos e insetos. Apesar disso, tais desvantagens podem ser minimizadas com o auxílio de tecnologias que já são utilizadas em países desenvolvidos (IPT, 2003; AUGUSTIN, 2008; PERTILE, 2018).

A madeira pode ser utilizada na forma de madeira roliça natural ou madeira serrada. A madeira roliça é representada pelo uso da madeira em seu estado próximo ao natural, ou seja, o processamento das peças é mínimo e a forma da peça segue a estrutura original da árvore, com aproveitamento total do fuste. Para este fim, a madeira é descascada, secada e pode receber tratamento de preservativos antes de ser destinada para uso estrutural. As principais aplicações da madeira roliça são em pontes e torres de eletrificação (ZANGIÁCOMO, 2007). De outro modo, madeira serrada se dá basicamente pelas etapas de plantio da floresta, colheita e processamento mecânico. Sendo este caracterizado pelo processo de desdobro, tratamento e secagem, e se apresenta em forma de peças retangulares ou quadrangulares, e usada como pranchas, tábuas, caibros, vigas, ripas, entre outros, sendo a forma mais utilizada no Brasil. (GAVA, 2005; MELLO, 2007).

Em relação ao uso da madeira no setor da construção civil no Brasil, o material é destinado para diversas finalidades. Tais finalidades podem ser de caráter temporário, como escoramentos, andaimes e formas para estruturas de concreto armado. Ou ainda, de caráter definitivo em estruturas de coberturas, estacas e pontes. Além disso, é amplamente utilizado na fabricação de itens residenciais, como esquadrias, mobiliário, painéis e divisórias, lambris, forros e pisos (MELLO, 2007).

Nos países do hemisfério norte, principalmente em países norte-americanos e europeus, a madeira começou a ser estudada e aplicada de maneira industrializada desde a época da Segunda Guerra Mundial. Nesses países são empregadas técnicas de construções leves, como Light Wood Frame, e técnicas baseadas nos princípios de colagem de lâminas, como os painéis de Cross Laminated Timber (CLT), Laminated Veneer Lumber (LVL) e Glued Laminated Timber (GLT) ou Glulam, conhecida nacionalmente por Madeira Laminada Colada (MLC) (OLIVEIRA, 2018).

Shigue (2018) em sua tese buscou identificar quais são as dificuldades na propagação do uso da madeira no mercado nacional da construção civil. O autor chegou à conclusão de que as principais estão ligadas diretamente à falta de

conhecimento, tais como o preconceito em relação à madeira, carência de mão de obra qualificada e pouco conhecimento sobre o material no que diz respeito a sua adequada aplicação e disponibilidade de tecnologias. O estado do Paraná foi protagonista por várias décadas na cultura do uso da madeira, porém, teve seu desenvolvimento e estudos descontinuados devido à ascensão do concreto. Contudo, há indícios de crescimento favorecendo o uso de materiais de fontes renováveis e que gerem menores impactos ambientais associados a processos industriais e de pré-fabricação, o que não significa a substituição do concreto ou do aço, mas sim a combinação desses materiais visando o aproveitamento das propriedades de cada um.

2.2 A MADEIRA LAMINADA COLADA

O primeiro indício do uso de madeira laminada colada foi em 1893 na cidade de Basel, Suíça, para a construção de um auditório. O sistema foi patenteado e ficou conhecido como Hertzner System, por ter sido obtido por Otto Karl Frederich Hertzner na Alemanha. Entretanto, o adesivo utilizado era à base de leite, caseína, e não era à prova de água fazendo com que a utilização do sistema se limitasse apenas a ambientes secos. Posteriormente, durante a Segunda Guerra Mundial, houve a necessidade de se obter estruturas para construir edifícios militares, incentivando assim o interesse pela madeira laminada colada, e como consequência disso a busca por adesivos à prova de água (MOODY e HERNANDEZ, 1999).

Ainda conforme Moody e Hernandez (1999), em 1934 nos Estados Unidos da América surgiu o primeiro arco em madeira laminada colada. A estrutura foi projetada para o Laboratório de Produtos Florestais em Madison, Wisconsin. A tecnologia foi trazida da Alemanha para o país e, a partir disso, outras empresas passaram a investir na técnica dando início a diversas construções como celeiros, igrejas, fábricas e ginásios. O aumento da indústria juntamente com o progresso das pesquisas favoreceu o surgimento do American Institute of Timber Construction (AITC) no ano de 1952. Instituto formado por fabricantes de MLC, os quais contribuíram financeiramente para que no ano de 1963, fosse possível desenvolver a primeira

norma norte-americana de MLC.

A madeira laminada colada é um produto considerado versátil e fabricado de maneira industrializada, sendo utilizada principalmente para confecção de vigas, arcos e pórticos. Entende-se como madeira laminada colada o ato de colar peças de madeira, as chamadas lamelas ou lâminas, de maneira curvada ou reta e paralelamente no sentido longitudinal da peça. O arranjo das peças se dá por diferentes formas adequando-se às exigências projetuais, atentando-se à espessura das lâminas da qual é recomendado não ultrapassar 50 mm (MIOTTO, 2009).

Para a produção das peças de MLC são utilizadas espécies de coníferas e dicotiledôneas de baixa densidade, e para que seja possível realizar a colagem é indicado que a madeira apresente baixo teor de resina e extrativos. Esse método de colagem de peças de madeira resulta em estruturas de baixo peso específico, fazendo com que seja permitido vencer grandes vãos como também diminuir o número de ligações (BERTOLINE, 2015). Segundo Magalhães (2018), a capacidade de produção dos equipamentos de prensagem, bem como o içamento e transporte, são os principais condicionantes das peças estruturais em MLC, tornando o método com excelente vantagem.

Com relação aos componentes que fazem parte de uma peça de madeira laminada colada, representados na Figura 1, Magalhães (2018) traz as seguintes definições:

- Lamela: peça que possui variação entre 1 cm e 5 cm conforme o projeto;
- Linha adesiva: formada por um adesivo que seja compatível com a madeira e sua finalidade;
- Emendas longitudinais: utiliza-se quando se deseja produzir peças de maior comprimento;
- Emendas transversais: utiliza-se quando se pretende produzir peças de maior largura.

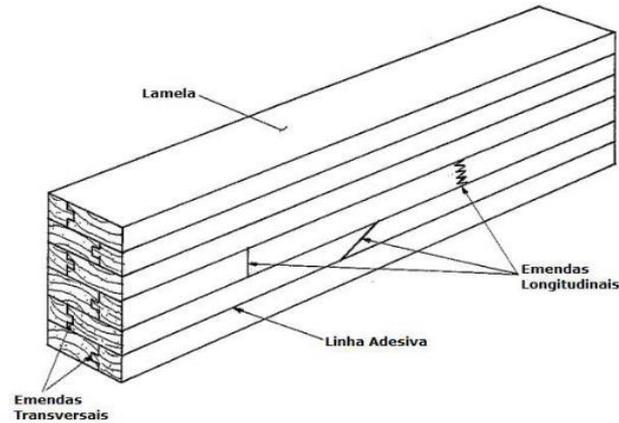


Figura 1 - Composição de uma peça em MLC.

Fonte: Magalhães, 2018.

A disposição das lâminas em relação ao carregamento da viga pode ser feita de maneira perpendicular ou paralela. Dependendo do tamanho exigido em projeto, as peças podem conter emendas longitudinais e emendas transversais. As vigas horizontalmente laminadas recebem carregamento no plano normal ao plano das lâminas, neste caso, não há necessidade de colar as emendas transversais visto que a resistência não afetará na resistência da viga. Entretanto, nas vigas coladas verticalmente, o plano paralelo ao plano das lâminas é quem sofrerá atuação do carregamento, neste caso, a colagem das emendas transversais é importante, uma vez que pode influenciar a resistência ao cisalhamento (APRILANTE, 2010).

No que concerne aos tipos de emendas, as mais comumente utilizadas são as de topo, as biseladas e as dentadas, representadas na Figura 2.

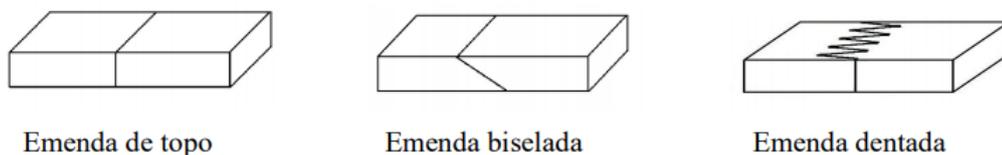


Figura 2 - Tipos de emendas.

Fonte: Teles, 2009.

De acordo com Fiorelli (2005), as emendas do tipo topo são consideradas fáceis de serem executadas, entretanto, a colagem é considerada pouco eficiente em termos de resistência. Para suprir as limitações relacionada à resistência das

emendas de topo foram desenvolvidas as emendas biseladas, porém, esse tipo de emenda é mais oneroso, pois, para que se obtenha resistência desejada é necessária baixa inclinação na peça de madeira e com isso maior quantidade de madeira e uso de adesivo. Por fim, as emendas dentadas são mais promissoras no ponto de vista de fabricação, bem como fornecem características ótimas de resistência.

Com relação aos aspectos que influenciam na resistência da madeira laminada colada, observa-se que há semelhança com os mesmos fatores que afetam as madeiras sólidas estruturais. As principais características observadas por pesquisadores são: espécie da madeira, número de nós presente na peça, direção das fibras, emendas longitudinais e transversais, espessura da lâmina bem como sua quantidade, qualidade e disposição das lâminas, o tipo de adesivo utilizado, tipo de tratamento, módulos de elasticidade e geometria da peça (MANTILLA, 1989; APRILANTE, 2010).

Algumas das vantagens da madeira laminada colada em relação à madeira serrada são: versatilidade arquitetônica e diferentes formas, aplicação de contra flechas, redução de defeitos como rachaduras, possibilidade de melhorar a disposição das lâminas e reforçar regiões de maiores solicitações, racionalização do uso da madeira, maior resistência e rigidez. Apesar disso, possui algumas desvantagens como custo da produção, uma vez que para obtenção da MLC é necessária a transformação da madeira em lâminas, realizar a secagem, colagem e acabamentos finais. Ademais, para sua confecção faz-se necessário o uso de equipamentos especiais, adesivos e mão de obra especializada e controle de todas as etapas do processo para garantir qualidade (MIOTTO e DIAS, 2009).

2.3 VIGAS COM PERFIL I

As vigas são elementos estreitos com capacidade de suportar cargas aplicadas de maneira perpendicular em relação ao seu eixo longitudinal. Através da aplicação de cargas, as vigas apresentam forças de cisalhamento e momento fletor que variam ao longo do seu eixo (HIBBELER, 2004).

As vigas de madeira podem ser produzidas em diferentes formatos, sendo

eles: de madeira roliça, madeira lavrada, madeira serrada, em madeira laminada colada, vigas compostas por peças maciças por entarugamento e vigas compostas de peças maciças com interfaces contínuas, compostas com alma descontínua e compostas com placas de madeira compensada (PFEIL e PFEIL, 2003).

Ainda conforme Pfeil e Pfeil (2003), as vigas de madeira laminada coladas podem apresentar seções transversais variadas, como mostrado na Figura 3. Além disso, têm a possibilidade de apresentar variação da seção ao longo de seu comprimento conforme às distribuições dos esforços, podendo também serem retas ou curvas.

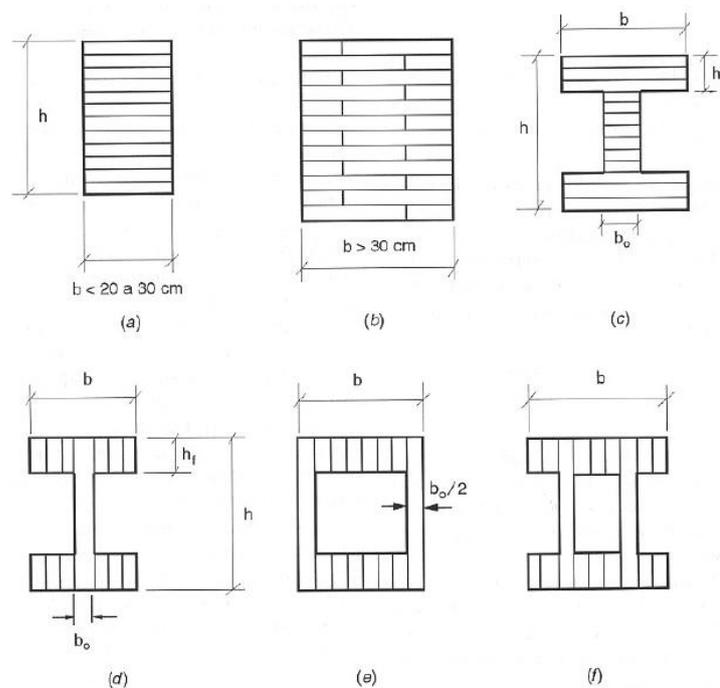


Figura 3 - Vigas laminadas de seção retangular: (a) uma lâmina por camada; (b) duas lâminas por camada; (c) viga I laminada; (d) viga I com alma de compensado; (e) e (f) viga celular ou viga-caixão, com alma de compensado.

Fonte: Pfeil e Pfeil, 2003.

Na década de 1970, as vigas de madeira com seção I passaram a ser utilizadas pela construção civil oferecendo ótima alternativa às vigas de madeira maciça. Essas estruturas foram inicialmente desenvolvidas para satisfazer clientes que buscavam vencer vãos de maiores extensões em seus projetos arquitetônicos

(LAM, 2001). Com a evolução das técnicas construtivas e o melhoramento dos adesivos, houve o desenvolvimento de indústrias de vigas com perfil em I pré-fabricadas, também conhecidas como “I-beams” ou “I-joists”. Tais vigas fazem parte da segunda geração dos produtos engenheirados de madeira. Nos EUA, este elemento estrutural é amplamente utilizado em estruturas de piso e telhado de habitações residenciais e em edifícios comerciais (SANTOS, 2008).

As vigas em I são formadas por duas mesas, também conhecidas como flanges, e uma alma. Como os flanges estão localizadas nas extremidades das seções, são elas que sofrem as maiores tensões decorrente de momentos fletores, e devido a isso recebem maior atenção. No flange superior, a viga está sujeita à maior taxa de compressão, enquanto a flange inferior está sujeita à tração. A geometria da seção confere economia de material, como apresentado na Figura 4, uma vez que não é necessário que a alma tenha grandes espessuras (FISSETTE, 2000).

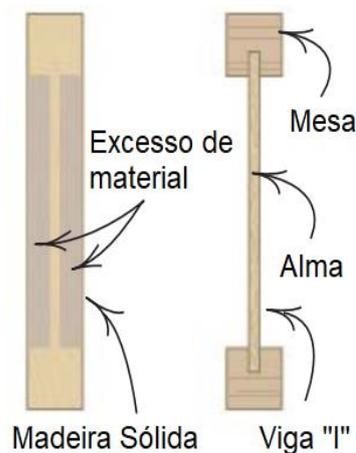


Figura 4 - Comparação da economia de madeira na viga de seção I em relação à retangular.

Fonte: Fisette, 2000.

As vigas em I conferem algumas vantagens tais como: peso próprio reduzido; montagem rápida; solução econômica; uso de peça com menores dimensões; melhor aproveitamento da tora; eficiência da estrutura; facilidade para instalar e manusear; possibilidade de abertura para passagem de tubulação e condutos, conforme especificações; possibilidade de desmontar e diminuição do tempo de construção. Ao

comparar uma viga de seção transversal retangular a uma de seção I, com mesma dimensão, observou-se que a diminuição da inércia é menor que a perda de material. Sendo assim, confirma-se a afirmação de que a viga I apresenta maior leveza e eficiência por apresentar relação resistência/peso maior (SILVA *et al.*, 2008).

Com relação à fixação da alma às mesas, estas podem variar conforme o fabricante, devendo ser coladas com adesivos que resistem à umidade. Os flanges podem ser pregados ou colados na alma (Figura 5 a), podem apresentar um sulco na mesa para unir a alma (Figura 5 b), pode apresentar uma alma com as extremidades afiladas e coladas à mesa com sulco (Figura 5 c), ou ainda, a alma com extremidades rachadas unida à mesa sulcada (Figura 5 d). As emendas mesa/alma influenciam na resistência final da viga, em especial as vigas I (USDA, 1999; SILVA, 2010).

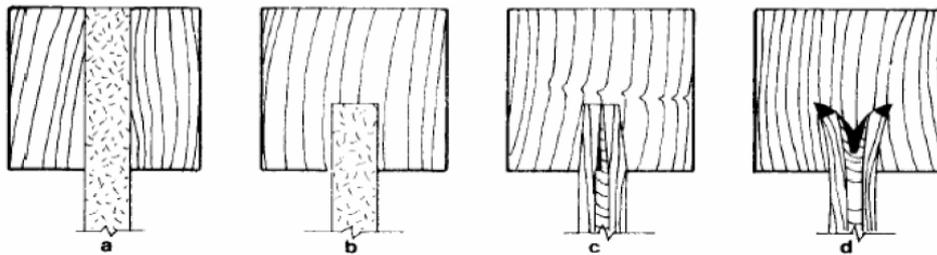


Figura 5 - Tipos de emendas mesa/alma.

Fonte: USDA, 1999.

Segundo Rache *et al.* (2005), os principais desafios na concepção de vigas I de madeira são as emendas, tanto no sentido longitudinal das mesas e da alma quanto na ligação da mesa com a alma. Com isso, estudos vêm sendo desenvolvidos com o propósito de encontrar a melhor geometria, resistência e facilidade de produção.

Prada (2003) realizou um estudo teórico-experimental do desempenho estrutural de vigas de madeira laminada colada com perfil em I, cujo objetivo era também difundir um método sistematizado de produção. Utilizou almas com placas do tipo Blackboard, com seção de 34 x 175 mm, e dois tipos diferentes de materiais para as mesas. Desse modo, foram produzidas vigas com mesas de madeira maciça de *Pinus taeda* e mesas de *Laminated Veneer Lumber* (LVL), com seção de 40 x 80 mm e emenda mesa/alma do tipo “*finger-joint*”. O pesquisador chegou à conclusão de que ambas as vigas com perfil em I são viáveis, tanto econômica quanto estruturalmente,

para o uso como elemento estrutural definitivo, bem como para uso estrutural provisório.

Pedrosa (2003), estudou o desempenho estrutural de vigas com seção I, compostas por painéis PLP e Compensados de *Pinnus taeda* e *Eucalyptus dunnii* e Painel de Partículas Orientadas (OSB) de Pinus. O autor buscou estudar as propriedades dos materiais utilizados de maneira individual para que pudesse obter a contribuição de cada um no desempenho final da estrutura, além de realizar as combinações com dois tipos de mesas e três tipos de almas. Os resultados obtidos mostraram que houve intercorrência entre chapas produzidas da mesma espécie, enquanto não houve alteração nos painéis de PLP. Em contrapartida, o OSB apresentou homogeneidade em suas propriedades, o que é explicado pela mecanização e processo contínuo de produção. Além disso, foi possível observar que a variação da espécie influenciou mais nas mesas do que nas almas. Por fim, através das análises estatísticas, comprovou-se que qualquer combinação entre os materiais apresenta comportamento estrutural satisfatório, bem como demonstrou que as mesas são as que mais contribuem para a rigidez e resistência das vigas.

Lima (2005) também estudou o comportamento estrutural de vigas com perfil I utilizando mesas em madeira serrada de Pinus e alma em OSB, sendo elas pregadas, coladas e pregadas e coladas. O pesquisador submeteu as vigas a ensaio de flexão de 4 pontos, modelou-as utilizando o Método de Elementos Finitos no software SAP2000, e utilizou o método da homogeneização da seção para análise teórica das vigas. A partir dos resultados experimentais, teóricos e numéricos, foi concluído que vigas com esse tipo de perfil são viáveis para utilizar na construção civil, pois apresentam capacidade de resistência e facilidade de manuseio. Demonstrou que há diferença significativa entre os diferentes tipos de ligação. Enquanto as vigas pregadas aguentaram 90 vezes seu peso, as coladas e pregadas e apenas coladas suportaram cargas acima de 230 vezes o seu peso próprio, o qual era de 12 kg. Isso porque as vigas coladas trabalham de maneira homogênea comportando-se como uma peça única, indicando comportamento linear.

Silva (2010) avaliou a resistência e elasticidade de vigas com seção em "I", as quais são utilizadas para sustentar painéis de formas para estruturas de concreto armado, e como estruturas definitivas. Foram utilizadas vigas comercialmente

conhecidas como H20, por apresentarem altura padrão de 20 centímetros, sendo constituídas por mesa em madeira serrada, almas em compensado sarrafeado, laminado ou em madeira serrada. Além disso, foram utilizados dois tipos de adesivos, sendo eles, o adesivo de poliuretano e o resorcinol-formol. A pesquisadora buscou resultados que atendessem à norma europeia EM 13377/2002, e chegou à conclusão de que a combinação alma de compensado, emenda dentada e colada com adesivo resorcinol-formol atendeu às exigências mínimas da norma.

2.4 ADESIVOS

O ato de colar peças de madeira para obter variadas formas e tamanhos é considerado uma arte antiga. A utilização de adesivos, como forma de unir peças de pequenas dimensões, viabilizou o avanço dos produtos engenheirados os quais são considerados alternativas aos produtos já existentes de madeira sólida, além de possibilitarem diferentes resultados para o uso da madeira em seu estado natural e bruto (APRILANTI, 2010). Para Petrauski (2012), o desempenho das peças ou estruturas de madeira estão intrinsecamente ligados à escolha do adesivo utilizado. Sendo importante, portanto, que a eleição do adesivo seja de acordo com as características que contribuam com a resistência na união, estabilidade e durabilidade.

O adesivo tem como função promover aderência entre duas superfícies, bem como diminuir a distância entre as juntas a serem coladas através da fluência e preenchimento de espaços vazios, fazendo com que aconteça a interação entre adesivo e substrato por meio da adesão e da coesão, conforme a Figura 6. O fenômeno físico-químico é responsável pela adesão no processo de colagem da madeira. Tal fenômeno providencia mecanismos para que haja interação entre as superfícies sólidas, a aderente e a adesiva. (BIANCHE, 2014). Já a coesão acontece entre as moléculas das quais surgem forças atrativas entre elas, fazendo-as se manter unidas, formando um corpo único (CARNEIRO, 2010).

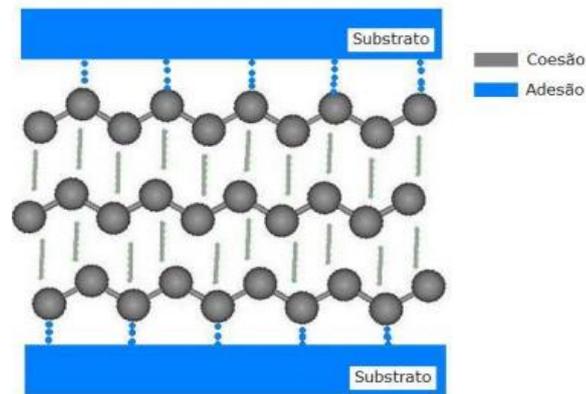


Figura 6 - Representação das forças de adesão e coesão entre dois substratos unidos por um adesivo.

Fonte: Silva, 2006.

O mecanismo de adesão pode ser feito de maneira mecânica ou química. A adesão mecânica se dá através da aplicação do adesivo em sua forma líquida sobre duas superfícies porosas, as quais fazem com que os poros promovam aderência e posteriormente a adesão das partes por meio do processo de endurecimento da cola, ou seja, a cura. A adesão química se dá pelas ligações químicas primárias, que são forças básicas entre o adesivo e o aderente. Tais forças são responsáveis pela resistência e duração da ligação do adesivo. Ambos os mecanismos dependem da estrutura da superfície dos substratos, da pressão e da viscosidade (AZEVEDO, 2009).

A classificação dos adesivos pode ser dada por diferentes parâmetros, como a sua origem. Nesse sentido, os adesivos podem ser naturais, semissintéticos e sintéticos. Os adesivos naturais são oriundos de fontes animais (peixes, ossos, entre outros), vegetais (milho, arroz, entre outros), ou inorgânicos (fosfatos, silicatos, por exemplo). Enquanto os adesivos semissintéticos são de origem natural, porém com modificações químicas, como o poliuretano derivado de óleo de mamona. Por fim, os adesivos sintéticos que são provenientes de reações de poliadição e policondensação, como o PVA (MARQUES, 2009; CARNEIRO, 2010).

O adesivo comumente utilizado, para a madeira laminada colada, é o resorcinol-formaldeído, no entanto, pesquisas recentes têm buscado alternativas a este adesivo, visto que possui em sua composição componentes cancerígenos e mutagênicos, sendo prejudiciais à saúde humana. Tem-se pesquisado o emprego de

adesivos poliuretanos, com destaque para Purbond HB530, um adesivo monocomponente. Outro adesivo que tem se destacado nas pesquisas é o biocomponente conhecido como melamina-ureia-formaldeído (MUF), destacando-se pelo seu curto tempo de cura e cor da linha de cola transparente. No mesmo grupo de poliuretanos encontra-se o adesivo originado com base no óleo de mamona, desenvolvido pelo Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo. Este adesivo surge como uma alternativa promissora quanto a utilização de fontes renováveis como base, sendo possível a substituição dos adesivos derivados de petróleo (MARQUES, 2009; MIOTTO, 2009).

2.4.1 Adesivo monocomponente à base de poliuretano

A empresa Puorbond, localizada na Suíça, desenvolveu um adesivo que possui pré-polímeros de isocianato como matéria-prima, e que passou a ser conhecido como 1C-PUR (PETRAUSKI *et al.*, 2010). O adesivo monocomponente à base de poliuretano (PUR), é um adesivo considerado reativo. Este tipo de adesivo não necessita da adição de um segundo componente para iniciar o processo de cura, ou seja, a cura inicia-se logo após a aplicação do adesivo à superfície. Isto porque o adesivo reage com a umidade presente no ar ou nas partículas da madeira. Parte do isocianato reage com a água presente na superfície da madeira e libera dióxido de carbono (CO₂), e com isso forma uma amina. A estrutura reticulada, como as formadas pelos adesivos bicomponentes, se dá pela reação entre a amina formada em contato com outro isocianato (HENKEL, 2009).

O adesivo poliuretano monocomponente, apresenta vantagens como: linha de cola incolor, fácil aplicabilidade, processo de endurecimento rápido, e ainda, que não é necessário utilizar formaldeído ou solventes, visto que as reações químicas acontecem com a umidade (PETRAUSKI *et al.*, 2010).

2.4.2 Adesivo bicomponente à base de óleos vegetais

Segundo Silva (2006), o desenvolvimento de materiais não poluentes e biodegradáveis utilizando matérias-primas de fontes renováveis, tem despertado o

interesse pelas pesquisas com uso de óleos vegetais para substituição de componentes derivados do petróleo, com destaque para o óleo de mamona (igualmente conhecido como óleo de rícino). O óleo de mamona tornou-se comercialmente um dos mais importantes, dentre os óleos disponíveis, por ser um dos poucos triglicérides que se aproxima a um composto puro, visto que apresenta quase 90% de ácido ricinoleico em sua composição. Dessa forma, apresenta hidroxilas e ligações duplas em sua estrutura, os quais fazem com que não seja necessário realizar modificações químicas (TREVINO e TRUMBO, 2002).

Para ser aplicado na forma de adesivo, mistura-se o poliálcool e o pré-polímero, neste caso à base de mamona. A mistura pode ser feita a frio e a reação entre os dois componentes resulta no poliuretano, sendo possível variar a porcentagem do poliálcool conforme a aplicação e necessidades técnicas (JESUS, 2000).

Ainda conforme Jesus (2000), a resina à base de mamona mantém-se estável física e quimicamente em ambientes agressivos, além disso, apresenta alta resistência mecânica até a sua ruptura. Além dessas vantagens, destaca-se também por ser fácil de manusear, podendo ser utilizada em temperatura ambiente, e por ser derivado de uma matéria-prima que é fácil de ser encontrada no Brasil.

2.4.3 Adesivo à base de resina epóxi

As resinas epóxi são encontradas na forma de líquido viscoso ou sólido quebradiços, com alta massa molecular em sua composição. As resinas líquidas de epóxi passam pelo processo de endurecimento por meio de agentes de reticulação com objetivo de obter polímeros termorrígidos (COSTA, 2001; CARNEIRO, 2010). Portanto, um dos parâmetros mais importantes das resinas líquidas é a viscosidade (FIORELLI, 2002). As principais aplicações da resina epóxi são em: vernizes protetores, placas de circuito impresso, pavimentos e calçamento, adesivos e colas, entre outros (KERSTING, 2004).

Para a utilização em estruturas de madeira, utiliza-se compostos do tipo bicomponente, tendo a resina epóxi como agente principal e um catalisador. Os catalisadores, ou endurecedores, quando em contato com a resina formam ligações cruzadas, e são essas ligações que promovem o bom desempenho e propriedades

dos sistemas epóxi (CARNEIRO, 2010; VALENÇA, 2010).

Segundo Monteiro *et al.* (2006), a resina epóxi apresenta boa versatilidade como termorrígido. São consideradas fáceis de manusear em temperatura ambiente, devido à sua boa fluidez antes da cura, além disso, não apresentam grande retração após a cura.

3 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi conduzida nas dependências do Laboratório de Estruturas e Materiais de Engenharia – LEME e no Laboratório de Tecnologia e Estruturas de Madeira – LATEM, do Centro de Ciências Exatas e Tecnológica – CCET da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, campus de Cascavel – PR.

Os materiais que foram utilizados nesta pesquisa são a madeira de *Pinus sp.*, e três tipos de adesivos, sendo eles: adesivo monocomponente à base de poliuretano (1C-PUR), adesivo bicomponente à base de óleos vegetais e adesivo à base de resina epóxi.

A madeira foi adquirida no comércio local da cidade de Cascavel - PR, onde foi possível escolher, com alguma limitação, as tábuas mais adequadas para o estudo em um lote de aproximadamente 200 tábuas. Procurou-se evitar peças com defeitos que pudessem influenciar na resistência da estrutura, como incidência de nós, medula e trincados. Como as tábuas não eram isentas de defeitos, pode-se escolher aquelas que apresentassem menor incidência de defeitos. Sendo assim, o lote destinado a esta pesquisa foi composto por 30 tábuas de seção transversal de aproximadamente 25 cm x 2,5 cm, e 14 tábuas de seção transversal aproximada de 30 cm x 2,5 cm, com comprimento de três metros para ambas as seções. Portanto, o lote é composto por 44 tábuas e foi entregue ao LATEM no dia 13/04/2021, com umidade variando entre 16,8% e 36,1%. A umidade foi obtida por meio do ensaio conforme a NBR 7190 (ABNT, 1997). Após isso, realizou-se o acompanhamento da variação da massa de uma amostra de madeira a cada semana, até que fosse possível observar uma umidade variando entre 10% e 20% no lote.

O adesivo à base de óleos vegetais, foi adquirido na empresa KEHL® Indústria e Comércio, localizado na cidade de São Carlos – SP. Este adesivo é composto pelo polioli e o isocianato. Já o adesivo monocomponente à base de poliuretano (PUR) foi adquirido na empresa Rendicolla. Por fim, o adesivo à base de resina epóxi foi adquirido na forma de dois componentes (A e B) através de distribuidor da empresa Vedacit Pro.

O processo de colagem, tanto nos corpos de prova quanto na montagem das vigas, consistiu na aplicação do adesivo em uma das faces sendo espalhado com auxílio de uma trincha.

Para o adesivo à base de óleos vegetais, foi utilizada a proporção de 1:1,5 de isocianato e polioli, com consumo de 300 g/m², com base no estudo realizado por Petrauski (2012). O tempo em fechado considerado foi inferior a 30 minutos. Após a colagem, foi realizada a aplicação de pressão de 0,8 MPa, a qual era controlada por meio de um torquímetro digital. Passado um período de 30 minutos, aferiu-se a pressão. Por fim, as peças permaneceriam no mínimo 12 horas na prensa.

Foram realizados ensaios prévios para obter a pressão de colagem e a gramatura adequada para os adesivos PUR e epóxi. A descrição destes ensaios, está detalhada na seção referente à resistência de juntas coladas.

Conforme os objetivos propostos para esta pesquisa, dividiu-se a metodologia em etapas para melhor entendimento, sendo descritas nas seções a seguir. Vale destacar que a metodologia deste trabalho foi escolhida em conformidade com a disponibilidade de materiais e equipamentos no local da pesquisa.

3.1 SECAGEM E CONTROLE DE MASSA

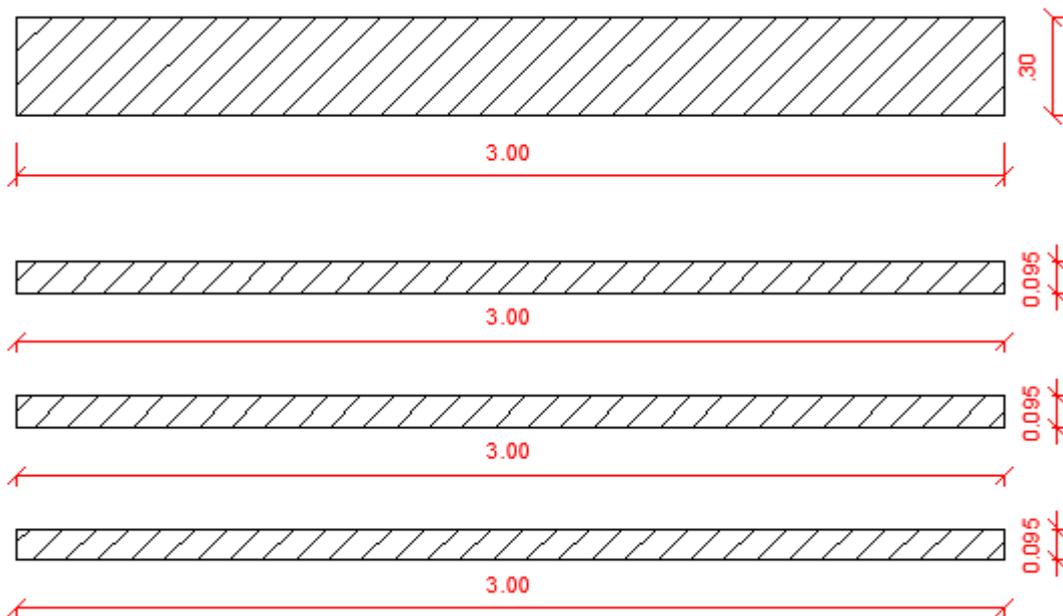
Para auxiliar o processo de secagem da madeira, optou-se por realizar o desdobramento das tábuas com o auxílio das máquinas desempenadeira e serra circular, mostradas na Figura 7.



Figura 7 - Serra circular (a) e desempenadeira (b).

Fonte: Autor, 2022.

Foi realizado o planejamento de corte levando em consideração as larguras previstas das mesas e das almas das vigas, as quais serão descritas de maneira detalhada nas seções seguintes. Para a tábua de 30 x 300 cm, foram retiradas três lâminas com larguras de 9,5 cm cada. Já para as tábuas de 25 x 300 cm, retirou-se uma lâmina de 16,5 cm de largura e outra de 8,5 cm. Obteve-se no total 37 lâminas de 9,5 cm de largura, 30 lâminas de 16,5 cm e 30 lâminas de 8,5 cm. A representação do plano de corte em planta pode ser observada na Figura 8.



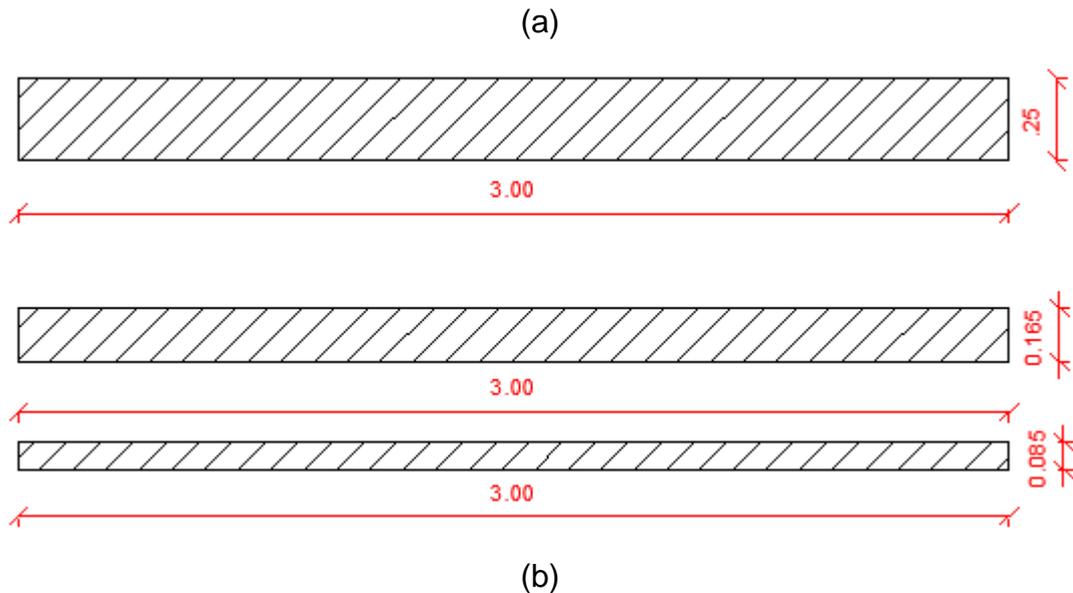


Figura 8 - Representação em planta do corte das tábuas de 30 x 300 (a) e tábuas de 25 x 300 (b) (medidas do desenho em metros).

Fonte: Autor, 2022.

Após esse processo, as peças de madeira foram separadas em dois grupos, sendo um de maior e o outro de menor largura, e foram empilhadas com espaçamento entre as camadas para que houvesse passagem de ar, a fim de dar continuidade no processo de secagem ao ar. Na Figura 9 constam as pilhas de madeira.

Após um período de cinco meses de secagem ao ar, iniciou-se o processo de caracterização das peças de madeira, uma vez que as peças de madeira apresentavam umidade média de 11,13%.



Figura 9 - Lâminas empilhadas.

Fonte: Autor, 2022.

3.2 CLASSIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA

Realizou-se ensaios para determinar as propriedades físicas e mecânicas da madeira da espécie de *Pinus sp.*, a fim de classificar e caracterizar as peças de madeira.

Selecionou-se as peças de madeira de acordo com a densidade aparente, isso para que fosse possível se ter uma análise que melhor representasse o lote. Além disso, realizou-se a classificação visual, na qual foi analisada cada peça, quantificando os defeitos (como nós, rachaduras, medula). Separou-se 22 peças das lâminas anteriormente desdobradas para determinar suas propriedades. Destas, extraiu-se trechos de 50 cm.

Para a obtenção de algumas propriedades da madeira, foi necessário realizar a colagem de duas ou três lâminas, isto para a caracterização quanto para a análise de resistência das juntas coladas. O procedimento de colagem para a confecção dos corpos de prova foi executado em ambiente que permitiu um aceitável controle de sua temperatura. Neste período a temperatura do ambiente variou entre 22,1°C a 23,3°C

e a umidade relativa do ar variou entre 47,5% e 66,2%. Na Figura 10 está ilustrando o procedimento.

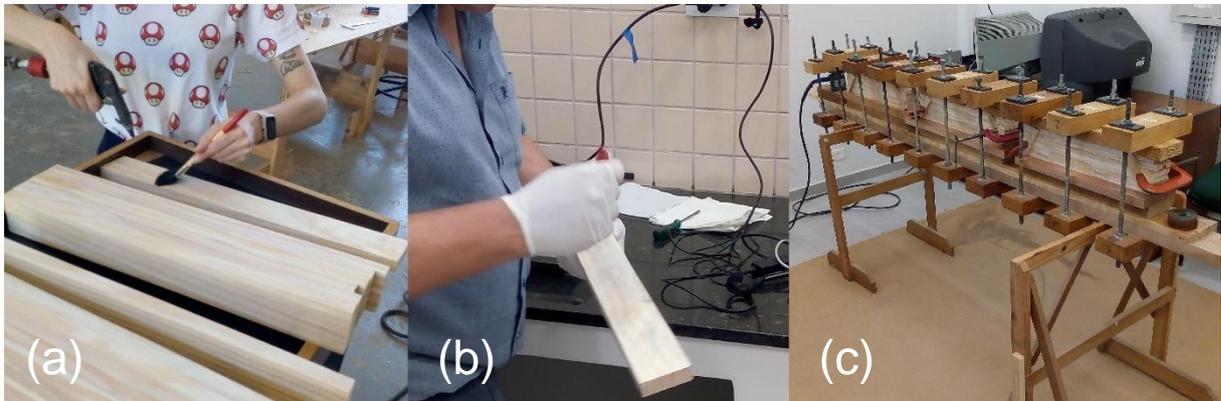


Figura 10 - Limpeza das lâminas (a), aplicação do adesivo na lâmina de madeira (b) e prensagem dos corpos de prova (c).

Fonte: Autor, 2022.

A NBR 7190 (ABNT, 1997), recomenda que seja realizada a correção de todos os resultados das propriedades de resistência e rigidez da madeira para a umidade padrão de 12%, a qual corresponde a classe de umidade 1. Para isto, utilizou-se a Equação 1 para a correção de resistência e a Equação 2 para corrigir a rigidez.

$$f_{12} = f_{U\%} \left[1 + \frac{3(U\% - 12)}{100} \right] \quad (1)$$

Onde:

f_{12} = resistência correspondente a 12% de umidade (MPa);

$f_{U\%}$ = resistência correspondente a U% de umidade (MPa);

U% = teor de umidade (%).

$$E_{12} = E_{U\%} \left[1 + \frac{2(U\% - 12)}{100} \right] \quad (2)$$

Onde:

$E_{12\%}$ = rigidez correspondente a 12% de umidade (MPa);

$E_{U\%}$ = rigidez correspondente a U% de umidade (MPa).

3.2.1 Densidade aparente

A densidade aparente é dada pela relação entre massa e o volume da madeira seca ao ar. Com a finalidade de obter o volume, foram medidas as peças de madeira nas três direções. Para que fosse possível conseguir um volume mais preciso, foi utilizado o paquímetro para medir a largura e a espessura. E por fim, todas as peças foram pesadas com o auxílio de uma balança para obtenção da massa. De posse das densidades, foi possível classificar o lote de madeira em baixa, média e alta densidade.

3.2.2 Caracterização da madeira

Realizou-se a caracterização mecânica da madeira de acordo com as recomendações da NBR 7190 (ABNT, 1997), nas quais foram realizados ensaios para obter as seguintes propriedades:

- Compressão paralela às fibras;
- Resistência à tração na flexão;
- Cisalhamento paralelo às fibras;
- Módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras.

A NBR 7190 (ABNT, 1997) admite que a resistência à tração paralela às fibras

seja igual a resistência à tração na flexão. Dessa maneira, foi realizado o ensaio de flexão ao contrário do ensaio de tração, tendo em vista a facilidade de se confeccionar os corpos de prova.

Segundo a NBR 7190 (ABNT, 1997), recomenda-se que sejam confeccionados no mínimo 6 corpos de prova para realizar a análise de resistência de espécies usuais. Entretanto, para que possa ser realizado estes ensaios, as peças de madeira devem estar com a umidade variando entre 10 e 20%, visto que a umidade é um fator que afeta as propriedades da madeira. Após, faz-se a correção para o teor de umidade padrão de 12%.

Nesse sentido, foram produzidos 12 corpos de prova para os ensaios de compressão paralela às fibras. Para o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras foram confeccionados 24 corpos de prova, e para o ensaio de tração na flexão foram ensaiados 14 corpos de provas para obtenção da tração na flexão.

A norma especifica que os corpos de prova tenham espessura de 5 cm, porém, a madeira adquirida para a pesquisa possuía espessura aproximada de 2,5 cm. Devido a isso, foram coladas três lâminas de densidades próximas para compor os corpos de prova, com exceção do ensaio de tração que possui outra geometria para ensaio (ABNT, 1997). Para a colagem das lâminas utilizou-se o adesivo à base de óleos vegetais, com gramatura de 300 g/m² e pressão de colagem de 0,8 MPa.

Na Figura 11 estão representadas as dimensões dos corpos de prova que foram produzidos para os ensaios de compressão e na Figura 12 estão representados os corpos de prova para o ensaio de cisalhamento. Para o ensaio de cisalhamento, foram confeccionados corpos de prova que promoviam o cisalhamento perpendicular ao plano de colagem e também paralelo ao plano de colagem.

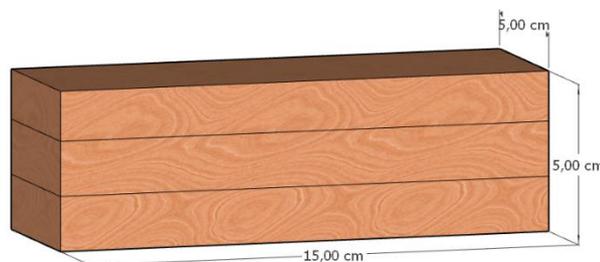


Figura 11 - Representação do corpo de prova para ensaio de compressão.

Fonte: Autor, 2022.

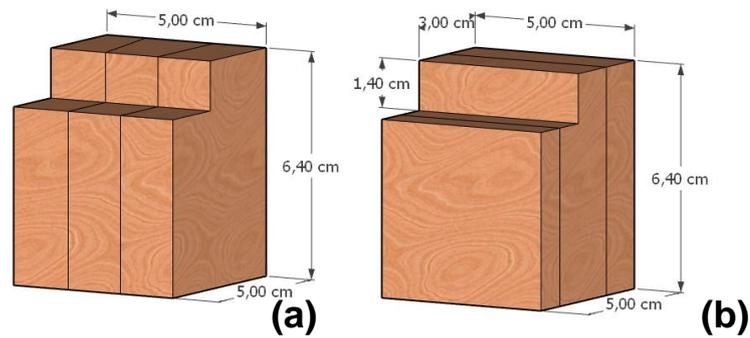


Figura 12 - Representação do corpo de prova para ensaio de cisalhamento perpendicular ao plano de cola (a); paralelo ao plano de cola (b).

Fonte: Autor, 2022.

Foram retiradas das tábuas 140 peças com dimensões de 2,5 x 6,0 x 50 cm para serem selecionadas para compor os corpos de provas. Após a extração das peças de madeira, determinou-se as suas densidades. Os corpos de prova foram confeccionados com o auxílio da desempenadeira, serra circular, e da plaina desgrossadeira. Os corpos de prova de cisalhamento da madeira sólida, estão ilustrados na Figura 13.

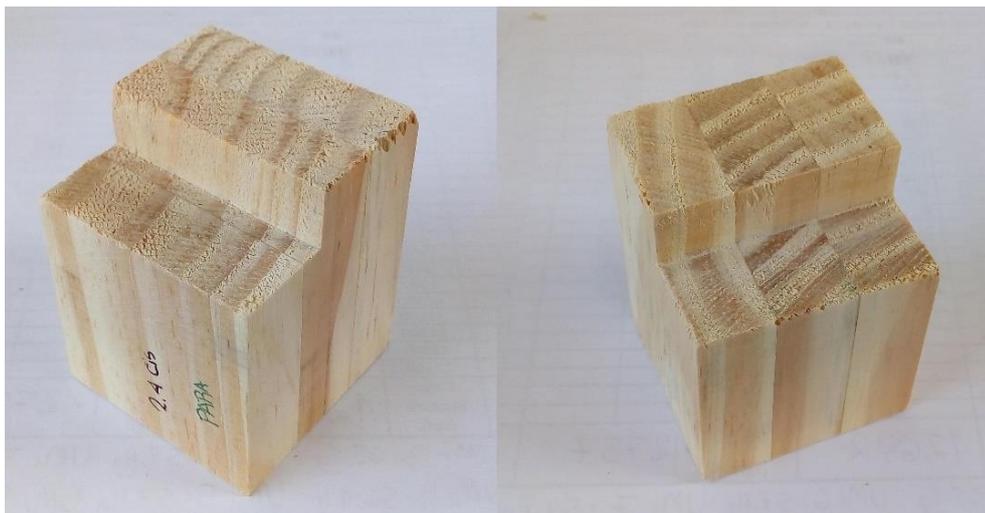


Figura 13 - Corpo de prova para ensaio de resistência ao cisalhamento paralelo a linha de cola (esquerda) e perpendicular à linha de cola (direita).

Fonte: Autor, 2022.

Com relação ao ensaio de flexão, os corpos de prova foram confeccionados com seção transversal retangular de 2 x 2,5 cm e comprimento de 49 cm, o qual permitiu que houvesse um vão livre de 45 cm entre os apoios. Aplicou-se a carga em dois pontos, com distâncias de 15 cm entre elas. A resistência da madeira à flexão foi calculada conforme a Equação 3. Na Figura 14 estão ilustrados os ensaios de cisalhamento, compressão e flexão.

$$f_M = \frac{M_{m\acute{a}x}}{W_e} \quad (3)$$

Onde:

f_M = resistência da madeira à flexão (N/m²);

$M_{m\acute{a}x}$ = máximo momento aplicado ao corpo de prova (N.m);

W_e = módulo de resistência elástico da seção transversal (m³).

Tendo em vista que a finalidade da caracterização é a obtenção dos valores de resistências médias da madeira, foi empregado apenas um tipo de adesivo para a colagem das peças. Posto isso, utilizou-se o adesivo à base de óleos vegetais para a colagem dos corpos de prova.

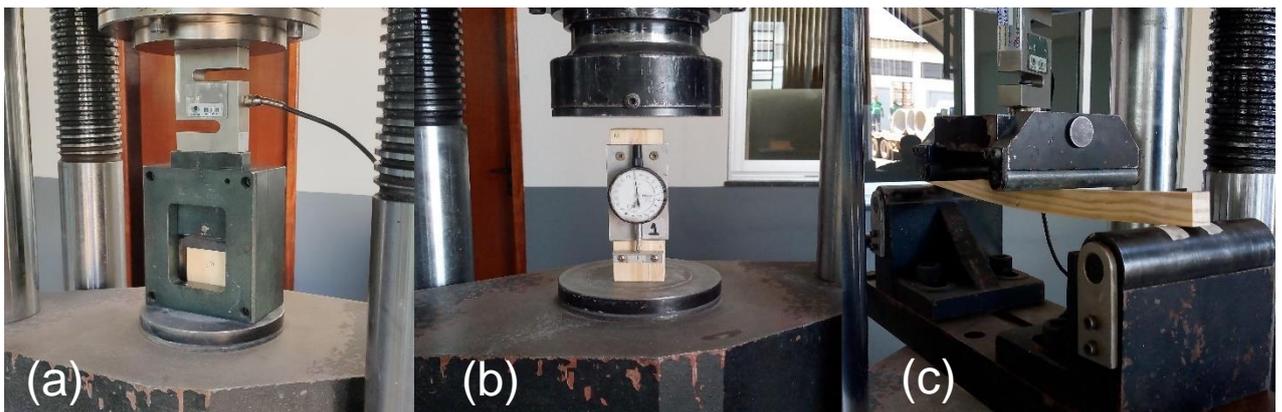


Figura 14 - Execução dos ensaios de cisalhamento (a), compressão (b) e flexão (c).

Fonte: Autor, 2022.

3.2.3 Resistência das juntas coladas

A fim de se analisar o comportamento dos três tipos de adesivos quanto à adesão com a madeira de *Pinus sp.*, foi realizado o ensaio seguindo recomendações da norma *American Society for Testing and Material – ASTM D 905 (2013)* para verificar a resistência ao cisalhamento na compressão de juntas coladas.

Conforme especificado na norma ASTM 905 (2013), devem ser confeccionados no mínimo 20 corpos de prova para serem ensaiados. Para este trabalho optou-se pela confecção de 40 corpos de prova para cada tipo de adesivo, totalizando 120 corpos de prova. As juntas foram coladas com as fibras paralelas entre si. A forma e as dimensões do corpo de prova estão demonstradas na Figura 15.

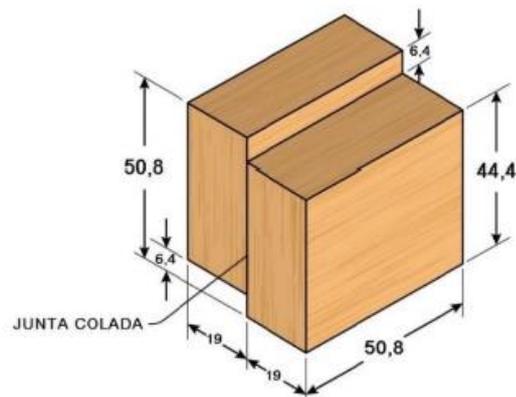


Figura 15 - Corpo de prova para ensaio de resistência de juntas coladas (dimensões em mm).

Fonte: Possa, 2021.

Para a confecção dos corpos de prova, retirou-se peças de 2,5 x 6,0 x 50 cm. Seguindo as prescrições da norma D-905 (ASTM, 2013), as peças com defeitos não foram utilizadas, além disso, as peças que foram coladas deveriam apresentar um teor de umidade variando entre 10 e 20%.

As peças utilizadas para a confecção foram selecionadas de maneira que melhor represente a variabilidade da densidade dentro do lote. Em seguida, registrou-se a massa e o volume das peças para obter a densidade aparente de cada uma, para que fossem confeccionadas juntas com lâminas de densidades similares entre elas.

As peças passaram pelo processo de usinagem e limpeza para então dar

início ao procedimento de colagem. A colagem seguiu o mesmo procedimento descrito no início deste capítulo. Os corpos de provas, nas dimensões requeridas por norma, foram extraídos após completar no mínimo 5 dias de cura. Na Figura 16 estão ilustrados os corpos de prova nas dimensões estabelecidas pela ASTM D 905 (ASTM, 2013).

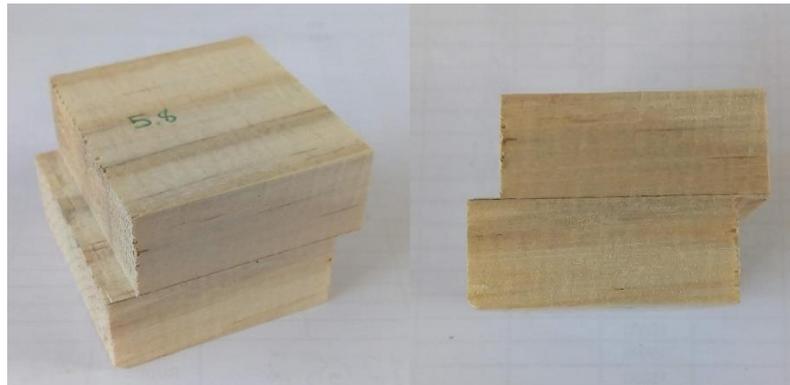


Figura 16 - Corpo de prova para ensaio de resistência de juntas coladas.

Fonte: Autor, 2022.

A norma ASTM D 905 (ASTM, 2003), indica que a resistência das juntas coladas deve ser igual a resistência média da madeira ao cisalhamento, no mínimo. A norma NBR 7190 (ABNT, 1997), também segue esta mesma indicação, no entanto, utiliza o conceito de resistência característica.

3.2.4 Ensaios preliminares

Para a confecção das juntas coladas com adesivo PUR e epóxi, foi necessário realizar ensaios preliminares para a obtenção da gramatura e pressão de colagem adequada. Para isso, foram executados ensaios de resistência de juntas coladas para ambos os adesivos. Estes ensaios foram executados a fim de se obter evidências sobre a influência de tais fatores.

3.2.4.1 Juntas coladas com adesivo poliuretano monocomponente

Adquiriu-se um novo lote de madeira de pinus para a realização do teste

prévio do adesivo PUR. O lote foi composto por 12 tábuas cujas dimensões eram de 12 cm x 2,3 cm x 300 cm. O fabricante do adesivo recomenda um consumo entre 100 g/m² e 200 g/m². Partindo-se do recomendado, optou-se por abranger três níveis de gramatura, sendo um entre os limites, um no limite superior e outro consumo acima do limite recomendado. Além disso, não havia informações referentes à pressão de colagem e, em vista disso, foram aplicados dois níveis de pressão.

O delineamento experimental das juntas coladas com o adesivo PUR está descrito na Tabela 1. Foram confeccionadas 36 juntas, aplicados 2 níveis de pressão e 3 níveis de consumo, com 6 repetições para cada tratamento. Foram ensaiados 5 corpos de cada junta, o que totalizou 30 corpos de prova por tratamento e 180 corpos de prova no total.

Tabela 1 - Delineamento experimental do adesivo PUR.

Tratamento	Gramatura (g/m ²)	Pressão (MPa)
T1	150	0,7
T2	150	1,0
T3	200	0,7
T4	200	1,0
T5	250	0,7
T6	250	1,0

Fonte: Autor, 2022.

Foram coladas 9 juntas por dia, sendo posicionadas 3 juntas em cada pilha na prensa. Em média, levou-se 8 minutos para realizar a colagem de três juntas. As juntas foram coladas em ambiente controlado, cuja temperatura média nos dias de colagem foi de 25,1 °C e umidade relativa do ar de 32,25%.

3.2.4.2 Juntas coladas com adesivo à base de resina epóxi

Para as juntas coladas com o adesivo bicomponente à base de resina epóxi, foi utilizada madeira de pinus disponível no laboratório. O fabricante recomenda o consumo de 1,5 kg/m²/mm de espessura, e não há informações quanto a pressão de colagem.

Antes de realizar a colagem das juntas, testou-se a gramatura indicada e percebeu-se que houve desperdício de adesivo e que o mesmo apresentava uma

resistência inferior aos níveis de consumo de 300 g/m² e 500 g/m². A partir disso, decidiu-se testar dois níveis de gramatura, 300 g/m² e 500 g/m², combinados a dois níveis de pressão, sendo de 0,7 MPa e 1,0 Mpa. O delineamento experimental está apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Delineamento experimental do adesivo epóxi.

Tratamento	Gramatura (g/m ²)	Pressão (MPa)
T1	300	0,7
T2	300	1,0
T3	500	0,7
T4	500	1,0

Fonte: Autor, 2022.

Quanto a proporção, utilizou-se 6% do componente B e 94% do componente A para compor a gramatura desejada, conforme sugerido pelo fabricante. O tempo de mistura manual também seguiu o recomendado pelo fabricante, que foi de 5 minutos.

Foram coladas 18 juntas em dois dias e 2 juntas em um dia. Em média, levou-se 9 minutos e 35 segundos para realizar a colagem de três juntas. As juntas foram coladas em ambiente controlado, cuja temperatura média nos dias de colagem foi de 23,6 °C e umidade relativa do ar de 58,6%.

Foram confeccionadas 20 juntas, aplicados 2 níveis de pressão e 2 níveis de consumo, com 3 repetições para cada tratamento. Foram ensaiados 6 corpos de cada junta, o que totalizou 30 corpos de prova por tratamento e 120 corpos de prova no total.

Para ambos os adesivos, seguiu-se o ensaio descrito na seção 3.2.3, bem como o procedimento de colagem exposto no início do Capítulo 3. Foi realizada a análise estatística a fim de investigar se a resistência foi afetada pelos níveis dos fatores estudados.

3.3 VIGA COM PERFIL I

Inicialmente, pensou-se em uma seção transversal da viga em I cuja área fosse equivalente à seção retangular de uma viga de madeira maciça, disponível para a comercialização na cidade de Cascavel – PR. A seção da viga retangular em questão era de 5 x 15 cm, com área de 75 cm².

Desejava-se obter valores de momento de inércia do perfil em I maiores que o momento de inércia da seção retangular, principalmente em relação ao eixo principal horizontal x. Com isso, idealizava-se utilizar duas mesas de larguras iguais de 7,5 cm e alma de 15,20 cm. Entretanto, algumas peças apresentaram defeitos durante o processo de secagem ao ar, principalmente empenamento, o que dificultou em manter a largura inicialmente desejada, tanto para a alma quanto para as mesas. Em vista disso, analisou-se a possibilidade de utilizar uma mesa inferior com menor largura que a mesa superior em função das resistências médias da madeira obtidas na caracterização. Assim sendo, adotou-se a seção transversal apresentada na Figura 17.

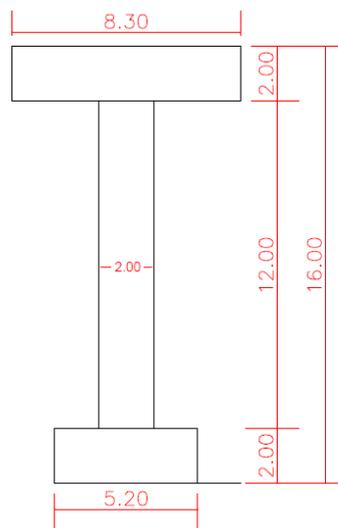


Figura 17 - Seção transversal da viga (medidas em cm).

Fonte: Autor, 2022.

Portanto, a viga com perfil I teve sua composição final dada por:

- Uma lâmina para a mesa superior com largura de 8,3 cm e espessura de 2 cm;
- Uma lâmina para a mesa inferior com largura de 5,2 cm e espessura de 2 cm;
- Uma lâmina para a alma com largura de 12 cm e espessura de 2 cm.

3.3.1 Estimativa da carga de ruptura

Foi considerada, para esta pesquisa, uma viga biapoiada com apoios de primeiro e segundo gênero. Confeccionou-se vigas com comprimento total de 2,50 m e vão livre entre os apoios de 2,30 m. O comprimento da viga, assim como as dimensões da seção transversal também teve de ser alterada pelos mesmos motivos anteriormente citados.

Determinou-se que ambas as cargas P fossem aplicadas a uma distância de 80 cm de cada apoio, e a distância entre as aplicações de carga foi de 70 cm, como ilustrado na Figura 18.

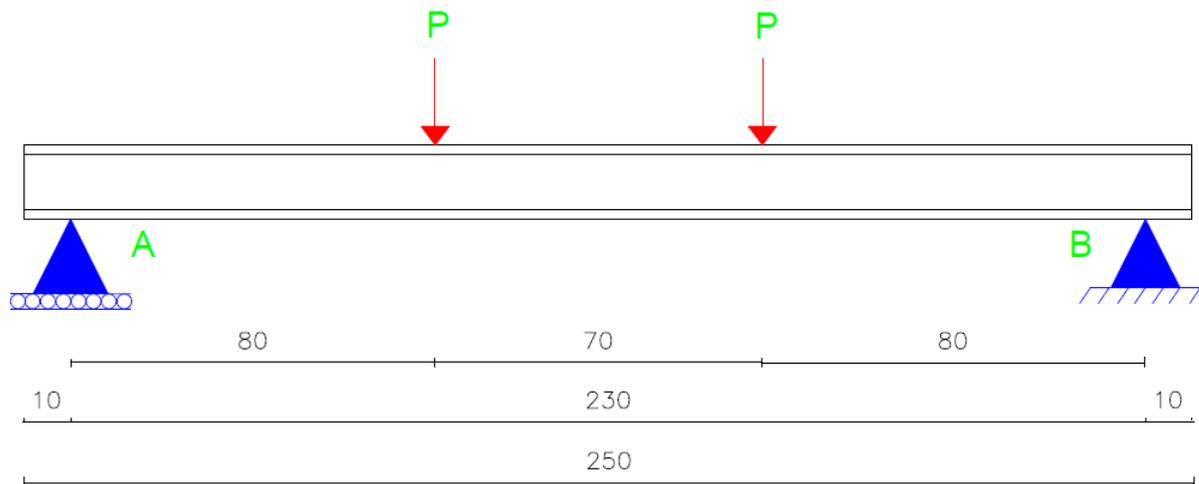


Figura 18 - Representação da aplicação das cargas na viga (cotas em centímetros).

Fonte: Autor, 2022.

Sabe-se que na borda superior da seção transversal, a viga apresenta valores máximos de tensão de compressão e a borda inferior apresenta valores máximos de tensão de tração. Além disso, sabe-se também que na linha neutra a tensão de cisalhamento é máxima. Dessa forma, realizou-se os cálculos em função da carga P a fim de se obter um valor de referência para a estimativa de carga de ruptura.

3.3.2 Solicitações normais na flexão simples

A partir da verificação de segurança de uma peça submetida a flexão, realizada conforme a Equação 2 e 3 e seguindo especificações da NBR 7190 (ABNT, 1997), foi possível obter os valores de carga P tanto para compressão quanto para tração.

$$\sigma_c = \frac{M_{m\acute{a}x}}{W_c} \leq f_{c0,m} \quad (4)$$

$$\sigma_t = \frac{M_{m\acute{a}x}}{W_t} \leq f_{t0,m} \quad (5)$$

Onde:

σ_c = tensão atuante na borda comprimida da seção transversal (kN/cm²);

σ_t = tensão atuante na borda tracionada da seção transversal (kN/cm²);

M = momento fletor atuante (kN.cm);

W_c = módulo de resistência da seção transversal na compressão (cm³);

W_t = módulo de resistência da seção transversal na tração (cm³);

$f_{c,m}$ = valor experimental da resistência média a compressão paralela às fibras (kN/cm²);

$f_{t,m}$ = valor experimental da resistência média à tração paralela às fibras (kN/cm²).

A partir da Equação 4 será obtido o valor de P_c , expressa pela Equação 4, que representa o valor da força P necessária para provocar a ruptura da fibra na mesa superior da viga por compressão.

$$\sigma_c = \frac{P_{c0} \times a}{\frac{I_{xg}}{c_c}} \leq f_{c0,m}$$

$$\frac{P_{c0} \times a \times c_c}{I_{xg}} \leq f_{c0,m}$$

$$P_{c0} \leq \frac{f_{c0,m} \times I_{xg}}{a \times c_c} \quad (6)$$

Sendo:

P = força normal aplicada (kN);

a = distância entre apoio e ponto de aplicação de carga (cm);

c_c = distância entre a linha neutra e borda comprimida (cm)

I_{xCG} = momento de inércia no centro de gravidade no eixo x (cm⁴).

Para obter o valor de P_{t0} , foi realizado o mesmo cálculo descrito anteriormente, entretanto, considerando os valores experimentais da resistência à tração paralela às fibras. O valor da força máxima de tração está expresso na Equação 5.

$$P_{t0} \leq \frac{f_{t0,m} \times I_{xg}}{a \times c_t} \quad (7)$$

3.3.3 Solicitações tangenciais de cisalhamento

Segundo a NBR 7190 (1997), a força cortante manifesta-se quando a viga é submetida a flexão, das quais fazem como que ocorra cisalhamento longitudinal na estrutura. A condição de segurança é dada conforme a Equação 6.

$$\tau_d = \frac{V_d \times M_e}{I_{xg} \times t} \leq f_{v,m} \quad (8)$$

Onde:

τ_d = tensão máxima de cálculo de cisalhamento (kN);

V_d = esforço cortante (kN);

M_e = momento estático da seção transversal (cm³);

t = espessura da alma (cm);

I_{xCG} = momento de inércia no centro de gravidade no eixo x (cm⁴)

$f_{v,m}$ = valor experimental da resistência média ao cisalhamento paralelo às fibras (kN/cm²).

Tomando como ponto de partida a Equação 5, foi obtida a Equação 7. Foi realizado o cálculo para obter o valor da carga P_v , sendo possível obter este valor com as dimensões da seção transversal da viga e com o valor experimental de resistência ao cisalhamento.

$$\frac{P_{v0} \times M_e}{I_{x_g} \times t} \leq f_{v,m}$$

$$P_{v0} \leq \frac{I_{x_g} \times t \times f_{v,m}}{M_e} \quad (9)$$

Onde:

P_{v0} = força tangencial aplicada (kN).

3.3.4 Estado Limite de Utilização

A NBR 7190 (ABNT, 1997) recomenda a verificação do estado limite de utilização conforme suas especificações aplicando-se a Equação 4, para combinação de longa duração. Admite-se que as flechas admissíveis, para estruturas comuns, não sejam superiores a L/200 para meio de vãos e L/100 para estruturas em balanço do respectivo comprimento. Por fim, para as flechas totais para as combinações de média e curta duração, a flecha admissível é L/350 para meio de vãos.

$$f \leq f_{adm}$$

Sendo:

f = flecha obtida da combinação aplicável (m);

f_{adm} = valor limite fixado para as flechas totais (m).

3.4 CONFECÇÃO DAS VIGAS

Foram confeccionadas 21 vigas com perfil em I coladas com três diferentes adesivos, sendo assim:

- 7 vigas coladas com adesivo bicomponente à base de óleos vegetais;
- 7 vigas coladas com adesivo poliuretano monocomponente;
- 7 vigas coladas com adesivo bicomponente à base de resina epóxi.

Classificou-se as vigas em diferentes classes de densidade da madeira, conforme apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Planejamento experimental das vigas.

Densidade	Adesivo		
	Epóxi	PUR	Mamona
Baixa	V6	V3	V4
	V1	V2	V5
Média	V15	V8	V10
	V11	V13	V14
	V9	V7	V12
Alta	V20	V19	V18
	V17	V16	V21

Fonte: Autor, 2022.

Para cada uma das vigas foram utilizadas três lâminas de *Pinus sp.*, sendo uma lâmina para compor a mesa superior, outra para mesa inferior e uma lâmina para a alma. As emendas entre mesas e alma foram coladas com adesivo, portanto, a ligação das vigas foi por meio de adesivos tendo sua pressão de colagem fornecida através da prensagem. A ligação entre mesa e alma foi do tipo topo, conforme mostrado na Figura 19.



Figura 19 - Ligação entre mesa e alma da viga
Fonte: Autor, 2022.

Realizou-se o processamento inicial das peças, utilizando a plaina desengrossadeira e desempenadeira a fim de obter-se lâminas com dimensões próximas às estabelecidas no projeto.

Confeccionou-se três gabaritos para a montagem e colagem das vigas adequadas às dimensões estabelecidas, possibilitando a produção de três vigas por dia, conforme mostrado na Figura 20. Os gabaritos foram montados com um conjunto de treze barras rosqueáveis cada um.



Figura 20 - Gabarito de prensagem

Fonte: Autor, 2022.

No processamento final, que se deu no dia da colagem, as lâminas foram processadas na plaina desengrossadeira e na serra circular, para obter as dimensões finais da viga. Todas as lâminas destinadas às almas também passaram pela desempenadeira, e eventualmente algumas peças para as mesas, uma vez que algumas apresentaram empenamento ou encurvamento. Em seguida, realizou-se a limpeza das lâminas, com o auxílio de ar comprimido e uma trincha para retirar sujeiras e acúmulo de pó, para obter bons resultados na colagem. Processou-se nove lâminas por dia, sendo seis para as mesas e três para as almas.

Após a limpeza, eram instaladas cantoneiras metálicas de 1,6 x 1,6 cm nas mesas inferiores, e peças de madeira de seção transversal de 3,1 x 2,0 cm, e 40 cm comprimento, nas mesas superiores. Estas peças foram instaladas no intuito de proporcionar o travamento das almas nas mesmas e facilitar o encaixe na aplicação do adesivo. Na Figura 21 é ilustrada a instalação das peças.

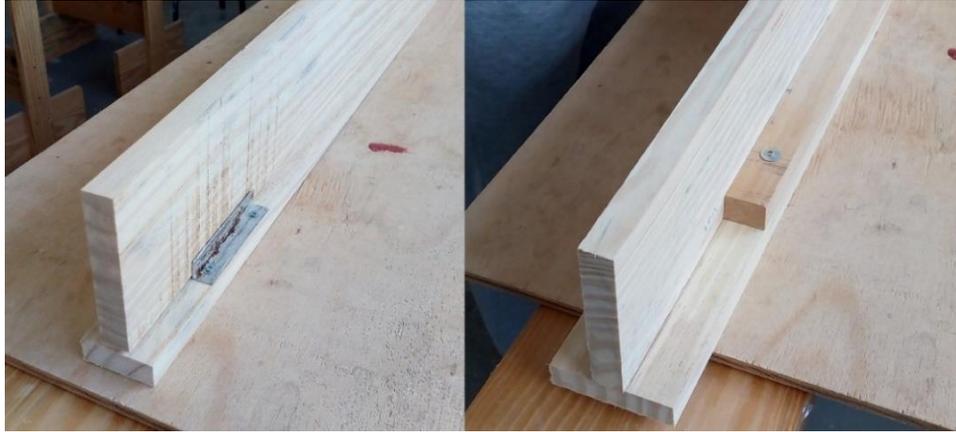


Figura 21 – Cantoneira instalada na mesa inferior à esquerda e travamento de madeira instalada na mesa superior à direita.

Fonte: Autor, 2022.

A execução de todas as vigas foi realizada em um período de sete dias, e cada dia colou-se três vigas de uma determinada classe de densidade. Foram coladas uma viga de cada adesivo por dia. A primeira viga de cada dia foi colada com o adesivo PUR, a segunda viga do dia foi colada com adesivo a base de óleos vegetais, e a última viga do dia era colada com adesivo a base de resina epóxi. Tomou-se o cuidado de alternar as vigas nas prensas para que não houvesse nenhum favorecimento.

Quanto ao processo de colagem, primeiramente espalhou-se o adesivo com o auxílio de uma trincha na face da alma que seria colada à mesa inferior e encaixou-se às peças. Após, aplicou-se adesivo na face da alma que seria colada à mesa superior. Em ambas as aplicações foi possível posicionar as peças na balança para mensurar a quantidade de adesivo necessária. Na Figura 22 está ilustrado o procedimento de colagem.

Tendo em vista a alteração de viscosidade que os três adesivos apresentam, procurava-se realizar a colagem em um tempo que não superasse 30 minutos. Foram registrados os tempos de colagem de todas as vigas, onde foi obtido o tempo médio de 6 min e 54 s. Na Tabela 4, estão apresentadas as temperaturas e umidades relativas do ar, tanto iniciais quanto finais, registrados nos dias de colagem. A umidade média da madeira durante os dias de colagem foi de 13,76 %.



Figura 22 – Alma posicionada na balança para mensuração do adesivo na face superior da alma (a), aplicação do adesivo (b) e espalhamento do adesivo na face inferior da alma (c).

Fonte: Autor, 2022.

Tabela 4 - Temperatura e umidade relativa do ar nos dias de colagem.

Dia	Viga	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Umidade inicial (%)	Umidade final (%)
1	V6	20,8	22,5	99,5	99,9
	V3				
	V4				
2	V15	21,9	22	94,1	96,2
	V13				
	V10				
3	V20	22,3	22,8	93	95
	V19				
	V18				
4	V11	20,4	20,7	96,3	98,3
	V7				
	V14				
5	V17	19,9	20,2	60,7	83,3
	V16				
	V21				
6	V1	18,1	18,4	66	71,4
	V2				
	V5				
7	V9	20,8	21,2	74,4	79,6
	V8				
	V12				

Fonte: Autor, 2022.

Após a aplicação do adesivo em ambas as faces das almas de cada viga e posicionamento no gabarito, iniciou-se a prensagem das estruturas. A pressão foi controlada por meio de um torquímetro digital, ilustrado na Figura 23, no qual realizou-se o aperto dos parafusos até que fosse garantida a pressão desejada. A calibragem do equipamento foi feita antes de iniciar a colagem das estruturas.

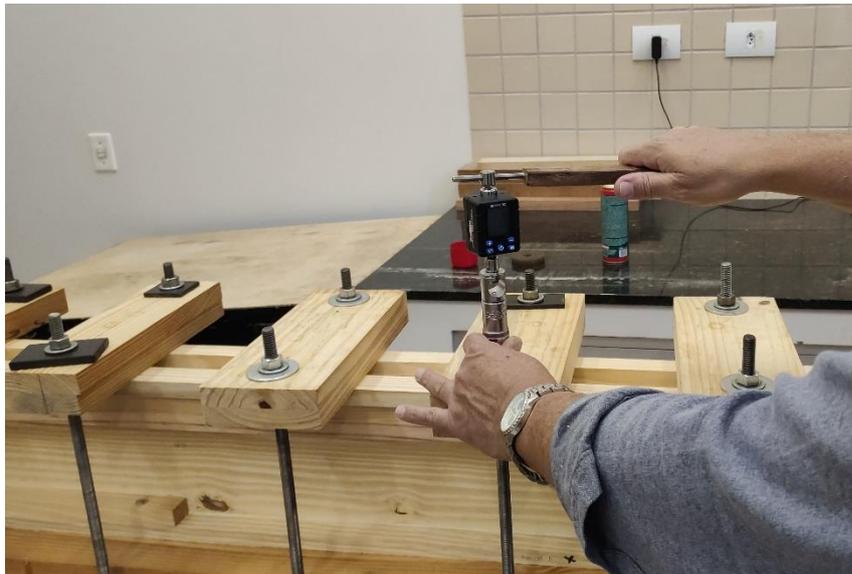


Figura 23 - Aplicação de pressão com auxílio com torquímetro digital.

Fonte: Autor, 2022.

Para cada adesivo aplicado, esperou-se o tempo de 30 minutos após o primeiro aperto para realizar um reaperto, a fim de verificar se os parafusos estavam na pressão adequada. Após isso, as vigas permaneceram por um período de 12 horas na prensa, e posteriormente armazenadas por um período mínimo de dez dias para que fosse possível realizar os ensaios.

3.5 ENSAIO DAS VIGAS

As vigas foram ensaiadas individualmente sendo conduzidas com apoio do equipamento instalado na laje de reação disponível no LEME, ilustrado na Figura 24. Foi necessário utilizar alguns aparatos para a realização do ensaio, tal como o sistema de aplicação de cargas, sistema de aquisição de forças aplicadas, apoios para as

vigas e sistema de leitura de deslocamentos.



Figura 24 - Viga posicionada na laje de reação.

Fonte: Autor, 2022.

O sistema de aplicação de cargas foi composto por dois cilindros hidráulicos que foram fixados na laje de reação nos locais indicados na Figura 25. Foram utilizados aparatos de madeira para transmitir a carga dos cilindros para a estrutura de maneira adequada, como apresentado na Figura 25.

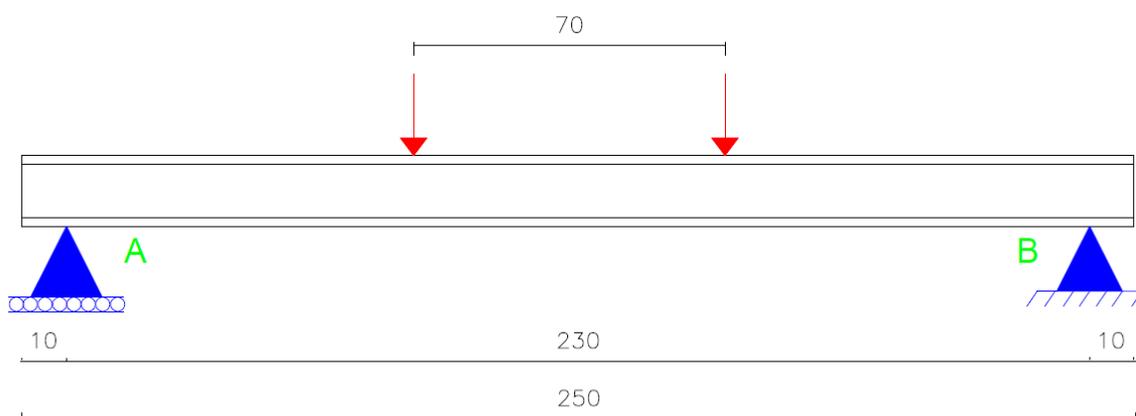


Figura 25 - Pontos de aplicação de carga (medidas em cm).

Fonte: Autor, 2022.

Foram instaladas duas células de carga entre os cilindros hidráulicos e a estrutura, para compor o sistema de aquisição de cargas. Para os apoios das vigas, foram utilizados aparatos que funcionam como apoios de primeiro gênero, impedindo deslocamento vertical, e apoio de segundo gênero, impedindo deslocamentos nas direções vertical e horizontal. A Figura 26 ilustra a disposição de tais aparatos.

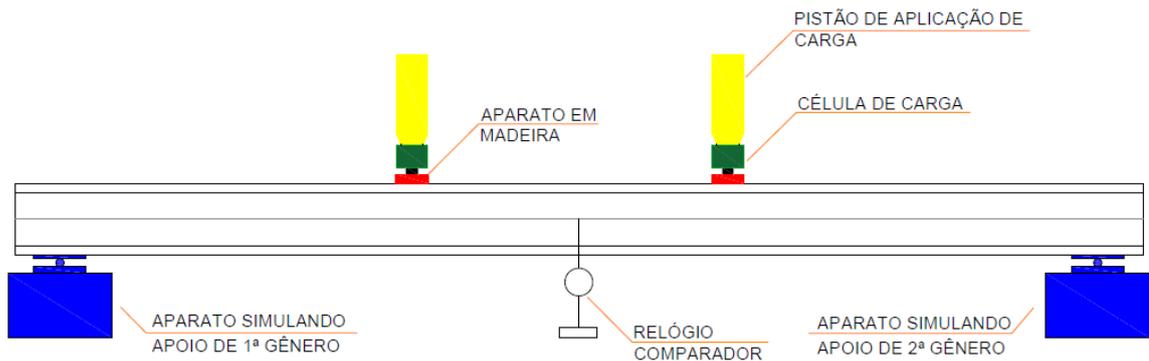


Figura 26 - Disposição dos aparatos para o ensaio.

Fonte: Autor, 2022.

A leitura dos deslocamentos da viga foi realizada por meio de relógio comparador, com resolução de 0,01 mm. O relógio foi instalado no meio do vão, uma vez que o maior deslocamento dessa estrutura é neste ponto. Na Figura 27, está apresentado o relógio instalado.



Figura 27 - Relógio instalado no meio do vão.

Fonte: Autor, 2022.

Após os aparatos devidamente instalados, deu-se início ao ensaio. Primeiramente aplicou-se uma carga de acomodação da estrutura de aproximadamente 4 kN. Em seguida, foi realizado o descarregamento da carga de acomodação, o relógio foi zerado, e seguiu-se o ensaio de acordo com as seguintes etapas:

- I. Aplicação de carga total de aproximadamente 6 kN, registros de deslocamentos evidenciados nos relógios comparadores e descarregamento da carga;
- II. Repetição da etapa I;
- III. Aplicação de carga até a ruptura da estrutura, registrando-se os deslocamentos mostrados nos relógios comparadores até uma carga média de 8 kN. Após, os relógios comparadores foram removidos e continuou-se a aplicação de carga.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS PEÇAS DE MADEIRA

4.1.1 Densidade aparente

A densidade aparente do lote de madeira de *Pinus sp.* utilizada neste estudo, apresentou uma variação entre 0,42 g/cm³ a 0,70 g/cm³. A densidade média do lote foi igual a 0,55 g/cm³ com coeficiente de variação de 12,57%. Nas Figuras 28 e 29, estão apresentados, respectivamente, o histograma e o *boxplot* referentes à densidade aparente do lote.

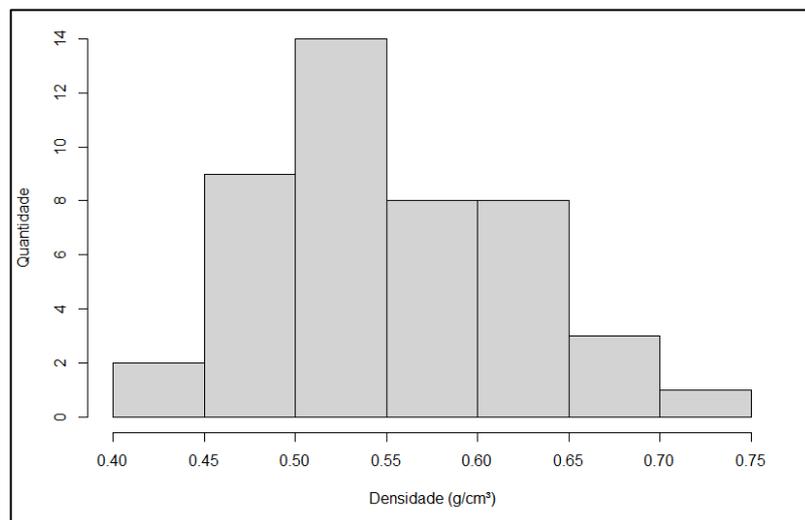


Figura 28 - Histograma da quantidade de tábuas pela densidade aparente do lote.

Fonte: Autor, 2022.

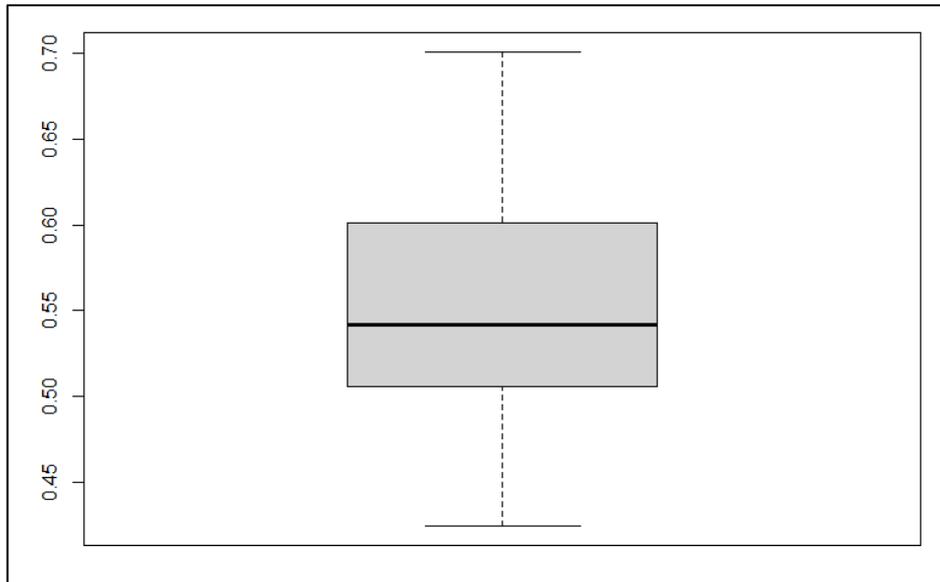


Figura 29 – Boxplot da densidade aparente do lote de madeira.

Fonte: Autor, 2022.

Foi possível observar que não houve valor de densidade aparente discrepante do lote, e, cerca de metade das tábuas exibiram uma densidade aparente entre 0,50 g/cm³ e 0,59 g/cm³. A densidade aparente deste lote apresentou pouca variação, assim como a variação apresentada pelo lote da madeira de mesma espécie utilizada por Possa (2021), a qual apresentou variação entre 0,42 g/cm³ e 0,75 g/cm³.

Por meio do gráfico *boxplot*, notou-se que as tábuas que se encontram entre o 3º Quartil e o limite superior, que corresponde ao valor de maior densidade aparente, mostra valores mais dispersos de densidade, quando comparada às demais, que apresentam menor variabilidade.

Com isso, foi possível separar o lote em três grupos conforme suas densidades, sendo:

- Baixa: 11 tábuas de densidade variando entre 0,42 g/cm³ e 0,49 g/cm³;
- Média: 22 tábuas de densidade variando entre 0,50 g/cm³ e 0,60 g/cm³;
- Alta: 11 tábuas de densidade variando entre 0,60 g/cm³ e 0,70 g/cm³.

4.1.2 Caracterização da madeira

Os valores obtidos na caracterização física e mecânica da madeira de *Pinus sp.* estão expressos na Tabela 5. Determinou-se o teor de umidade e densidade aparente de todos os corpos de prova que foram ensaiados.

Tabela 5 - Resultados da caracterização física e mecânica da madeira de *Pinus sp*

	Resistência à compressão paralela as fibras (f_{c0})	Módulo de elasticidade à compressão (E_{c0})	Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0})	Resistência à tração na flexão (f_{t0})
Nº de corpos de prova	12	12	24	14
Teor de umidade médio (%)	10,47	10,47	11,33	12,26
Densidade aparente média (g/cm ³)	0,5556	0,5556	0,5440	0,5479
Valores médios (MPa)	42,28	9232,8	12,22	77,63
Valores médios, 12% de umidade (MPa)	40,37	8950,2	12,02	78,32
Valores característicos, 12% de umidade (MPa)	30,95	-	8,64	51,52
Coefficiente de variação (%)	16,32	23,92	21,38	22,37

Fonte: Autor, 2022.

*Coeficiente de variação calculado para resultados médios a 12% de umidade.

Segundo a NBR 7190 (ABNT, 1997), o coeficiente de variação admitido para os esforços normais é de 18% e para os esforços tangenciais é de 28%. Nesta caracterização, apenas os valores de resistência à compressão e cisalhamento estão

dentro do limite estipulado. Os demais valores de resistência apresentaram um valor acima do recomendado.

Os valores obtidos apresentaram valores próximos aos encontrados por Possa (2021), que também caracterizou um lote de madeira de *Pinus sp.*, exceto para os valores para o módulo de elasticidade à compressão, que nesta caracterização apresentou menor rigidez. Este lote apresentou valores similares ao apresentado pela norma brasileira em relação à conífera de classe C30. Os valores da caracterização obtido por Possa (2021) estão apresentados a seguir:

- $f_{c0k} = 38,46$ MPa
- $E_{c0m} = 12709$ MPa
- $f_{v0k} = 8,12$ MPa

As tabelas contendo todos os valores obtidos nos ensaios de cada corpo de prova estão no Apêndice A.

4.1.3 Análise da gramatura e pressão de colagem do adesivo poliuretano monocomponente

Nas Tabelas 6 e 7 estão apresentados os valores obtidos do ensaio de cisalhamento das juntas coladas com o adesivo poliuretano monocomponente e os valores médios de resistência em função da gramatura e pressão de colagem, respectivamente.

Tabela 6 - Resultados da resistência ao cisalhamento de juntas coladas com adesivo PUR.

	Resistência ao cisalhamento (f_{v0})					
	Tratamento**					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Nº de corpos de prova	30	30	30	30	30	30
Teor de umidade médio (%)	12,43	12,04	11,7	12,05	12,18	12,14
Densidade aparente média (g/cm ³)	0,6887	0,6902	0,6942	0,7016	0,697	0,6993
Valores médios (MPa)	13,89	13,61	13,38	13,77	14,10	12,89
Valores médios, 12% de umidade (MPa)	14,05	13,63	13,25	13,79	14,17	12,94
Valores característicos, 12% de umidade (MPa)	11,25	10,15	10,36	10,9	12,26	12,94
Coefficiente de variação* (%)	16,89	21,95	18,42	19,77	13,03	16,97

Fonte: Autor, 2022.

*Coeficiente de variação calculado para resultados médios à 12% de umidade.

**Tratamentos: T1: Pressão 0,7 MPa e gramatura de 150 g/m²; T2: Pressão 1,0 MPa e gramatura de 150 g/m²; T3: Pressão 0,7 MPa e gramatura de 200 g/m²; T4: Pressão 1,0 MPa e gramatura de 200 MPa; T5: Pressão 0,7 MPa e gramatura de 250 g/m²; T6: Pressão 1,0 MPa e gramatura de 250 g/m².

Tabela 7 - Valores médios das resistências em função da pressão e da gramatura das juntas coladas com adesivo PUR.

Pressão (MPa)	Gramatura (g/m ²)			Média
	150	200	250	
0,7	14,05	13,25	14,17	13,82 a
1,0	13,63	13,79	12,94	13,45 a
Média	13,84 A	13,52 A	13,56 A	

Mesmas letras maiúsculas entre gramaturas e minúsculas entre as pressões não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de significância.

Fonte: Autor, 2022.

Apesar de não haver diferença significativa, a gramatura de 250 g/m² e pressão de 1,0 MPa apontaram a menor média de resistência ao cisalhamento. Conforme Matos *et al.* (2019), a madeira de pinus apresenta grande permeabilidade, o que faz com que se tenha maior penetração de adesivo na medida em que se aplica maior pressão, resultando em uma linha adesiva dita faminta, o que pode explicar a resistência apresentada neste tratamento.

Entretanto, para esta mesma gramatura, mas com um nível inferior de pressão, 0,7 MPa, nota-se a maior média de resistência obtida entre os tratamentos. Conforme Bianche *et al.* (2017), o elevado consumo de adesivo pela área favorece a fluidez, transferência, umedecimento e penetração da madeira.

O tratamento T1 apresentou a segunda melhor média de resistência, o que significa que essa quantidade seria o suficiente para garantir resistência na linha de cola. Todavia, a gramatura de 150 g/m² de adesivo apresentou maior dificuldade no espalhamento quando comparada às demais gramaturas.

Petrauski *et al.* (2010) realizaram um estudo aplicando três níveis de gramatura do adesivo PUR na madeira de eucalipto e em dois grupos de tratamentos: secos e úmidos. A madeira utilizada pelos autores possuía faixa de densidade próxima à da madeira utilizada neste trabalho. Os autores obtiveram tensões de resistência média na ordem de 10 MPa para os tratamentos secos, utilizando três níveis de gramatura, sendo: 140 g/m², 160 g/m² e 180 g/m². Para o mesmo adesivo e para níveis próximos a 150 g/m², os autores obtiveram resistências menores às encontradas neste estudo.

A partir dos ensaios preliminares realizados, optou-se por utilizar a gramatura de 250 g/m² e pressão de colagem de 0,7 MPa para a aplicação do adesivo PUR no ensaio de resistência de juntas coladas, no lote da madeira da pesquisa, e nas vigas.

As tabelas com a análise de variância estão presentes no Apêndice B.

4.1.4 Análise da gramatura e pressão de colagem do adesivo à base de resina epóxi

Na Tabelas 8 e 9 estão apresentados os valores obtidos do ensaio de cisalhamento das juntas coladas com o adesivo à base de resina epóxi e os valores

médios de resistência em função da gramatura e pressão de colagem, respectivamente.

Tabela 8 - Resultados da resistência ao cisalhamento de juntas coladas com adesivo epóxi.

	Resistência ao cisalhamento (f_{v0})			
	Tratamento**			
	T1	T2	T3	T4
Nº de corpos de prova	30	30	30	30
Teor de umidade médio (%)	11,62	11,62	11,38	11,42
Densidade aparente média (g/cm ³)	0,6206	0,6326	0,6159	0,6459
Valores médios (MPa)	12,06	12,64	12,10	10,92
Valores médios, 12% de umidade (MPa)	11,91	12,5	11,87	10,73
Valores característicos, 12% de umidade (MPa)	10,74	10,18	8,88	7,89
Coefficiente de variação* (%)	16,45	20,36	21,74	21,40

Fonte: Autor, 2022.

*Coeficiente de variação calculado para resultados médios à 12% de umidade.

**Tratamentos: T1: Pressão 0,7 MPa e gramatura de 300 g/m²; T2: Pressão 1,0 MPa e gramatura de 300 g/m²; T3: Pressão 0,7 MPa e gramatura de 500 g/m²; T4: Pressão 1,0 MPa e gramatura de 500 g/m².

Tabela 9 - Valores médios das resistências em função da pressão e da gramatura das juntas coladas com adesivo epóxi.

Pressão (MPa)	Gramatura (g/m ²)		
	300	500	Média
0,7	11,91	11,87	11,89 a
1,0	12,50	10,73	11,60 ab
Média	12,20 A	11,30 A	

Mesmas letras maiúsculas entre gramaturas e minúsculas entre as pressões não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de significância.

Fonte: Autor, 2022.

Observou-se que não houve efeito significativo do fator gramatura. Entretanto, houve efeito da pressão, do nível de 1,0 MPa sobre o consumo de 500 g/m², ou seja, há diferença estatística entre os tratamentos T3 e T4.

O maior valor de resistência média foi observado no tratamento T3. Como não há evidências na literatura a respeito da pressão de colagem e consumo para aplicação deste adesivo em madeira, adotou-se a pressão de 1,0 MPa e gramatura de 300 g/m² para realizar as colagens necessárias nesta pesquisa. Além disso, foi possível notar a facilidade na aplicação de adesivo sobre o substrato com o consumo indicado, visando dessa forma a economia de material.

Fiorelli (2002) investigou o comportamento de vigas maciças de madeira reforçadas com fibras de vidro e fibras de carbono. As fibras foram fixadas à madeira com adesivo epóxi. Entretanto, o autor não traz informações quanto a gramatura e pressão de colagem utilizada.

Por sua vez, Carneiro (2010), confeccionou, testou e comparou juntas coladas de topo, biselada e encaixada de espécies de madeira de diferentes densidades. A autora utilizou o adesivo à base de resina epóxi e madeira Angelim-pedra, Jatobá e Tauari. A quantidade de adesivo aplicada foi de aproximadamente 300 g/m², quanto a pressão de colagem, não é informada. A autora apenas descreve que as juntas foram fechadas e seguras por alguns minutos, e que em seguida foi prensada e permaneceu por 24 horas em uma prensa simples.

As tabelas com a análise de variância estão presentes no Apêndice B.

4.1.5 Resistência ao cisalhamento de juntas coladas

Os valores de resistência ao cisalhamento direto das juntas de *Pinus sp.* coladas com os três adesivos estão apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados da caracterização física e mecânica da madeira de *Pinus sp.*

	Resistência ao cisalhamento		
	Mamona (f_{v0})	PUR (f_{v0})	Epóxi (f_{v0})
Nº de corpos de prova	40	40	40
Teor de umidade médio (%)	11,19	12,92	13,04
Densidade aparente média (g/cm ³)	0,4992	0,5529	0,556
Valores médios (MPa)	12,05	10,81	10,33
Valores médios, 12% de umidade (MPa)	11,76	11,12	10,65
Valores característicos, 12% de umidade (MPa)	9,94	9,56	7,51
Coefficiente de variação* (%)	13,78	15,13	23,76

Fonte: Autor, 2022.

*Coeficiente de variação calculado para resultados médios à 12% de umidade.

A resistência média para as juntas coladas com o adesivo de mamona deste lote apresentou valor superior ao de Possa (2021), que também realizou este ensaio. O autor encontrou resistência média de 10,3 MPa, sendo 1,17 vezes menor que o do lote estudado.

Petrauski *et al.* (2010) avaliaram juntas de madeira de eucalipto coladas com adesivos poliuretanos. Os autores encontraram valores de resistências médias de

10,5 MPa e 11,9 MPa, para juntas coladas com adesivo PUR e óleo de mamona, respectivamente.

A resistência média das juntas coladas com adesivo epóxi apresentaram menor desempenho, quando comparada aos demais adesivos deste trabalho.

4.2 ESTIMATIVA DA CARGA DE RUPTURA DAS VIGAS

Nesta seção serão apresentados os cálculos realizados para a obtenção dos valores máximos de carga de ruptura para os esforços solicitantes considerados. Para realização dos cálculos, primeiramente foram calculadas as propriedades da seção, tais como: posição da linha neutra, momento de inércia e momento estático.

Haja vista as dimensões consideradas para a viga, iniciou-se os cálculos aplicando as Equações 8 e 9 para a obtenção da distância entre linha neutra e a borda comprimida (c_c) e tracionada (c_t), respectivamente.

$$c_t = \frac{\sum A}{\sum Adx} \cdot \frac{\sum[(8,3 \times 2) + (5,2 \times 2) + (12 \times 2)]}{\sum[(8,3 \times 2 \times 15) + (5,2 \times 2 \times 1) + (12 \times 2 \times 8)]} \cdot \quad (10)$$

$$c_t = 8,85 \text{ cm}$$

$$c_c = h_{total \text{ da viga}} - c_t \cdot 16 - 8,85 \cdot \therefore c_c = 7,15 \text{ cm} \quad (11)$$

De posse destes valores, partiu-se para o cálculo de momento de inércia para a direção x (I_{xg}), aplicando-se a 10 .

$$I_{xg} = I_{xg, \text{ mesa superior}} + I_{xg, \text{ mesa inferior}} + I_{xg, \text{ alma}} \cdot \quad (12)$$

$$I_{xg} = \left[\frac{(8,3 \times 2^3)}{12} + (16,6 \times 15^2) \right] + \left[\frac{(5,2 \times 2^3)}{12} + (10,4 \times 1^2) \right] \\ + \left[\frac{(2 \times 12^3)}{12} + (24 \times 8^2) \right] \therefore$$

$$I_{xg} = 1583,07 \text{ cm}^4$$

Por fim, aplicou-se a Equação 11 para calcular a última propriedade geométrica da seção, sendo este o momento estático (M_e).

$$M_{e1} = A_1 \times d_1 \therefore 10,4 \times (8,85 - 0,5 \times 2) \therefore M_{e1} = 81,65 \text{ cm}^3$$

$$M_{e2} = A_2 \times d_2 \therefore [2 \times (8,85 - 2)] \times [(8,85 - 2) \times 0,5] \therefore M_{e1} = 46,94 \text{ cm}^3$$

Portanto, temos que o momento estático:

$$M_e = M_{e1} + M_{e2} \therefore M_e = 128,59 \text{ cm}^3 \quad (13)$$

4.2.1 Solicitações normais na flexão simples

A partir dos cálculos realizados anteriormente, e dos valores de resistências médias obtidas experimentalmente, foram estimados os valores das cargas de ruptura para cada tensão solicitante.

Sendo assim, aplicou-se a Equação 9.

$$P_{c0} \leq \frac{f_{c0,m} \times I_{xg}}{a \times c_c} \therefore \quad (9)$$

$$P_{c0} \leq \frac{403,7 \times 1583,07}{80 \times 7,15} \therefore$$

$$P_{c0} \leq 1117,57 \text{ kgf} = 11,17 \text{ kN}$$

Como as cargas foram aplicadas em dois pontos na viga, a carga de ruptura total seria da ordem de 22,35 kN. Dessa forma, presumiu-se que, a partir deste carregamento, as vigas poderiam apresentar falha por compressão.

Para obter o valor estimado de P_{t0} foi aplicada a Equação 10.

$$P_{t0} \leq \frac{f_{t0,m} \times I_{xg}}{a \times c_t} \quad \therefore \quad (10)$$

$$P_{t0} \leq \frac{783,2 \times 1583,07}{80 \times 8,85} \quad \therefore$$

$$P_{t0} \leq 1751,06 \text{ kgf} = 17,51 \text{ kN}$$

Deste resultado, tem-se que a carga de ruptura total seria da ordem de 35,02 kN. Dessa forma, presumiu-se que, a partir deste carregamento a estrutura apresentaria falha por tração.

4.2.2 Solicitações tangenciais de cisalhamento

A partir da Equação 9, calculou-se também a carga de ruptura para a tensão máxima de cisalhamento.

$$P_{v0} \leq \frac{I_{xg} \times t \times f_{v,m}}{M_e} \quad \therefore \quad (9)$$

$$\frac{1583,07 \times 2 \times 120,0}{128,59} \quad \therefore$$

$$P_{v0} \leq 2955,21 \text{ kgf} = 29,55 \text{ kN}$$

Com isso, tem-se que a carga de ruptura total que faria com que a estrutura apresentasse falha por cisalhamento, seria da ordem de 59,10 kN.

Com base nas avaliações para o chamado Estado Limite Último, conforme acima, percebeu-se que a menor carga total, a partir da qual, as vigas poderiam manifestar ruptura, seria da ordem de 22,35 kN. Neste caso, associada à resistência à compressão da madeira do lote.

4.3 VERIFICAÇÃO PARA O ESTADO LIMITE DE SERVIÇO

Com o auxílio do programa Ftool, foi verificada a estimativa de flecha apresentada pela viga. Para a menor carga total estimada para a ruptura e igual a 22,35 kN, o deslocamento estimado pelo software apresentado no meio do vão foi de 0,36 cm.

Conforme a NBR 7190 (ABNT, 1997), a flecha máxima admissível para meio de vãos para construções correntes é $L/200$. Neste caso, a flecha admissível para as vigas é de 1,15 cm. Além disso, a norma também especifica que as flechas totais para as combinações de média e curta duração, a flecha admissível seja $L/350$. Para este caso, a flecha limite para as vigas é de 0,66 cm.

4.4 RESULTADOS DA ANÁLISE EXPERIMENTAL DAS VIGAS

As 21 vigas confeccionadas foram ensaiadas até a ruptura para que fosse possível realizar a análise do seu comportamento em relação a resistência e rigidez, tais resultados e análises estão expostos nas seções seguintes.

4.4.1 Resistências apresentadas pelas vigas coladas com adesivo à base de óleos vegetais

Na Tabela 11, estão expostos os dados referentes as resistências das vigas coladas com adesivo a base de óleos vegetais, bem como suas massas, densidades e locais de ruptura.

Tabela 11 - Valores de resistências das vigas coladas com adesivo de mamona.

Viga	Massa (kg)	Densidade (g/cm ³)	Carga de ruptura* (kN)	Local de ruptura
V4	5,38	0,42	17,35	Compressão na mesa superior; Ruptura frágil por tração na mesa inferior.
V5	5,63	0,44	18,17	Compressão na mesa superior; Ruptura frágil por tração na mesa inferior.
V10	6,24	0,49	17,05	Ruptura por tração na lâmina da mesa inferior.
V12	6,37	0,50	20,17	Ruptura por cisalhamento; Compressão na mesa superior.
V14	6,38	0,50	14,14	Ruptura por tração na mesa inferior.
V18	7,49	0,59	29,73	Torção da alma ocasionando ruptura por tração na linha adesiva.
V21	7,13	0,56	26,55	Ruptura por cisalhamento na alma
Média	6,37	0,50	20,45	-
Coeficiente de variação(%)	11,77	11,77	27,49	-

Fonte: Autor, 2022.

*Considerou-se neste trabalho que 1 kgf = 10 N.

Dentre as sete vigas coladas com adesivo de mamona, três exemplares apresentaram defeitos do tipo nó no local em que se iniciou a ruptura, sendo elas: V4, V10 e V14.

Estimou-se que as estruturas começariam a apresentar falha frente a carregamentos a partir de 22,35 kN. Para a série de vigas coladas com adesivo de mamona, apenas as vigas V18 e V21, classificadas como de alta densidade, apresentaram ruptura acima da carga estimada. A viga V18 sofreu torção ao ser solicitada, possivelmente ocorrido por perda de estabilidade lateral da alma,

ocasionado, provavelmente, pelo desalinhamento da alma. Posteriormente ao efeito de torção, a viga apresentou ruptura por tração na linha adesiva, rompendo com carregamento de 29,73 kN.

A viga 21 apresentou início de ruptura por cisalhamento próximo à linha neutra, na extremidade esquerda e acima do apoio de 1º gênero, propagando-se por todo o corpo da viga. A viga citada rompeu com carga de 26,55 kN. Ambas as vigas não apresentaram ruptura por compressão, mostrando um bom desempenho ao superarem o valor considerado. A viga V18 não continha defeitos, por sua vez, a viga V21 apresentava alguns nós, porém foi possível posicionar em um local em que se julgou menos solicitado. Nas Figuras 30 e 31 estão apresentadas as vigas após a realização do ensaio.

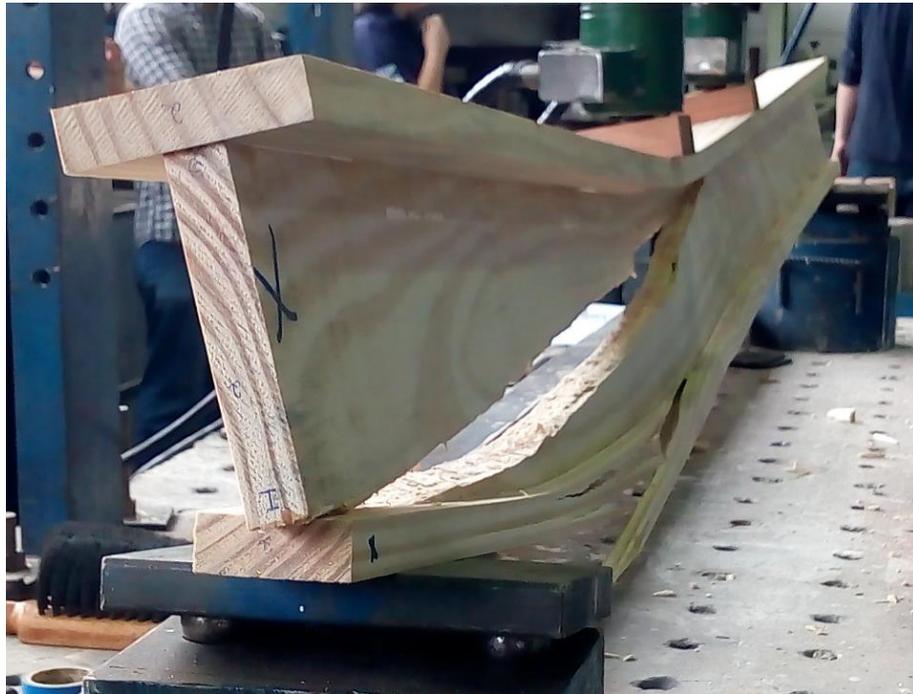


Figura 30 - Viga V18 após o ensaio, detalhe do efeito da torção.

Fonte: Autor, 2022.



Figura 31 – Viga V21 após a ruptura.

Fonte: Autor, 2022.

A viga V14, cuja resistência foi a mais baixa desta série, sendo 14,14 kN, apresentou início de ruptura na região que havia um nó, localizado na mesa inferior por tração. Tal defeito pode ter influenciado na resistência da estrutura. Assim como a viga citada, a viga V10 apresentou somente falha por tração, rompendo com 17,05 kN, na mesa inferior e ambas no alinhamento de aplicação de carga. A viga V12 apresentou uma resistência próxima à estimada, de 20,17 kN, rompendo na região em que o fluxo de cisalhamento é constante e máximo. Na Figura 32 a, 32 b e 32 c, estão expostas as vigas rompidas.



Viga V14 (a)



Viga V10 (b)



Viga V12 (c)

Figura 32 – Vigas V14 (a), V10 (b) e V12 (c) após a ruptura.

Fonte: Autor, 2022.

As vigas de baixa densidade, V4 e V5, apresentaram bom desempenho quanto à resistência em comparação às vigas de média densidade. A viga V4 rompeu com 17,35 kN no meio do vão, no local onde o momento fletor é máximo. A viga começou a apresentar esmagamento das fibras na lâmina superior, no entanto, rompeu por fratura frágil na lâmina inferior por tração. A viga V4 apresentava um defeito do tipo nó, localizado pouco abaixo da linha neutra e praticamente no meio do vão. Tal defeito pode ter influenciado na resistência da viga, uma vez que a ruína teve início neste

local. Nas Figuras 33 e 34, é possível observar o defeito na viga e a viga após a ruptura, respectivamente.



Figura 33 – Detalhe do defeito na alma da viga V4 e fibras da lâmina superior sofrendo esmagamento.

Fonte: Autor, 2022.



Figura 34 – Viga V4 após a ruptura.

Fonte: Autor, 2022.

Por fim, a viga V5 apresentou uma ruptura frágil por tração na lâmina inferior. A fratura ocorreu na região do apoio de 1º gênero, onde o esforço cortante é máximo. Entretanto, antes de romper foi possível observar que as fibras da lâmina superior estavam sofrendo esmagamento por compressão, onde a carga estava sendo aplicada à 80 cm do apoio onde aconteceu a ruptura. A lâmina superior possuía um defeito de nó que ocupava cerca de 80% da área resistente da madeira. Na Figura 35 está apresentada a viga V5 após a ruptura.



Figura 35 – Viga V5 após a ruptura.

Fonte: Autor, 2022.

4.4.2 Resistências apresentadas pelas vigas coladas com adesivo poliuretano monocomponente

Na Tabela 12 estão expostos os dados referentes as resistências das vigas coladas com adesivo poliuretano monocomponente, bem como suas massas, densidades e locais de ruptura.

Tabela 12 - Valores de resistências das vigas coladas com adesivo PUR.

Viga	Massa (kg)	Densidade (g/cm ³)	Carga de ruptura* (kN)	Local de ruptura
V2	5,36	0,42	9,48	Compressão na mesa superior; Ruptura frágil por tração na mesa inferior.
V3	5,74	0,45	19,03	-
V7	5,92	0,46	19,82	Ruptura por tração na mesa inferior.
V8	6,27	0,49	19,30	Ruptura por tração na mesa inferior irradiando-se por cisalhamento para as extremidades.
V13	6,45	0,51	19,43	Rutura por tração na mesa inferior; Compressão na mesa superior.
V16	6,53	0,51	20,30	Compressão na mesa superior; Ruptura frágil por tração na mesa inferior.
V19	8,18	0,64	24,35	-
Média	6,35	0,50	18,82	-
Coeficiente de variação(%)	14,28	14,28	23,93	-

Fonte: Autor, 2022.

*Considerou-se neste trabalho que 1 kgf = 10 N.

Para as vigas colada com adesivo poliuretano monocomponente, quatro exemplares apresentaram defeitos no local de ruptura, sendo: V2, V8, V13 e V16.

As vigas classificadas como de baixa densidade, V2 e V3, romperam com cargas inferiores à carga prevista, sendo de 9,48 kN e 19,09 kN, respectivamente. A viga V2 apresentou o menor valor de resistência dentre as 21 confeccionadas e ensaiadas. A lâmina superior apresentou ruptura por compressão no local de momento fletor máximo.

Apesar da realização de vídeos para auxiliar na identificação do modo de ruptura, a viga V3 apresentou certa dificuldade para identificar o início da ruína. No entanto, por meio da Figura 36, é possível que a lâmina da mesa inferior tenha sofrido uma ruptura frágil por tração, irradiando paralelamente às fibras para as extremidades. Além disso, percebeu-se também que houve esmagamento na lâmina da mesa superior por compressão. Ademais, observou-se também que houve ruptura na alma próximo a linha neutra propagando-se para a emenda entre alma e mesa superior. Nas Figuras 37 e 38 estão apresentadas as vigas V2 e V3 após o ensaio.



Figura 36 - Detalhe da ruptura por compressão na mesa superior da viga V2.

Fonte: Autor, 2022.



Figura 37 - Viga V2 após a ruptura.

Fonte: Autor, 2022.



Figura 38 - Viga V3 após a ruptura.

Fonte: Autor, 2022.

As vigas de média densidade, V7, V8 e V13, apresentaram cargas de rupturas próximas entre elas, 19,03 kN, 19,82 kN e 19,30 kN, respectivamente. As três vigas apresentaram ruptura frágil na mesa inferior por tração e no meio do vão. Na viga V8, observou-se propagação da ruptura para ambas as extremidades da viga devido ao cisalhamento. Na viga V13, percebeu-se esmagamento na mesa superior por compressão. Nas Figuras 39, 40 e 41, estão apresentadas as vigas após a ruptura.



Figura 39 - Viga V7 após a ruptura.

Fonte: Autor, 2022.



Figura 40 - Viga V8 após a ruptura.

Fonte: Autor, 2022



Figura 41 - Viga V13 após a ruptura.

Fonte: Autor, 2022

Dentre as vigas de alta densidade, somente a viga V19 superou o valor estimado para carga de ruptura, rompendo com 24,35 kN. Não foi possível identificar por meio de vídeos como ocorreu a ruptura desta viga. Ao analisar a viga rompida, percebeu-se não haver indícios de ruptura por tração e compressão. A mesa superior e a alma permaneceram inteiras após ensaio. Na mesa inferior ocorreu uma espécie de fratura na lâmina, mas somente na região sobre o apoio. Provavelmente tal viga suportaria um maior carregamento. Na Figura 42 está apresentada a viga V19 após o ensaio.



Figura 42 - Viga V19 após a ruptura.

Fonte: Autor, 2022

Embora a viga V16 não tenha superado a carga estimada, suportou uma carga próxima, sendo de 20,30 kN. Na Figura 43 está apresentada a viga após a ruptura. Observou-se que a ruptura por tração na mesa inferior aconteceu no meio do vão, e na mesa superior a lâmina sofreu compressão na região em que o carregamento foi aplicado.



Figura 43 - Viga V16 após a ruptura.

Fonte: Autor, 2022

4.4.3 Resistências apresentadas pelas vigas coladas com adesivo à base de resina epóxi

Na Tabela 13 estão expostos os dados referentes as resistências das vigas coladas com adesivo bicomponente à base de resina epóxi, bem como suas massas, densidades e locais de ruptura.

Tabela 13 - Valores de resistências das vigas coladas com adesivo epóxi.

Viga	Massa (kg)	Densidade (g/cm ³)	Carga de ruptura* (kN)	Local de ruptura
V1	5,60	0,44	13,31	Tração na mesa inferior.
V6	5,72	0,45	17,98	Torção na alma; Ruptura por cisalhamento na alma.
V9	6,30	0,49	11,32	Tração na mesa inferior.
V11	6,34	0,50	14,03	-
V15	6,04	0,47	18,58	Compressão na mesa superior; Ruptura frágil por tração na mesa inferior.
V17	7,06	0,55	16,45	-
V20	6,86	0,54	23,15	Compressão na mesa superior; Ruptura frágil por tração na mesa inferior.
Média	6,27	0,49	16,40	-
Coeficiente de variação(%)	8,69	8,69	24,10	-

Fonte: Autor, 2022.

*Considerou-se neste trabalho que 1 kgf = 10 N.

Das vigas coladas com adesivo epóxi, três estruturas apresentaram defeitos do tipo nó no local onde ocorreu a ruptura, sendo elas: V1, V9 e V11.

As vigas coladas com adesivo epóxi classificadas como de baixa densidade, V1 e V6, apresentaram valores de resistência abaixo da carga de ruptura estimada. A viga V1 rompeu com 13,31 kN por tração na mesa inferior. A ruptura teve início na região em que havia um nó solto, o que provavelmente fez com que a viga rompesse

precocemente. Na Figura 44 é possível ver o local onde se encontrava o nó, e na Figura 45 está a viga após o ensaio.

Por outro lado, a viga V6, cuja carga de ruptura foi de 17,98 kN, sofreu torção na alma, o que possivelmente ocasionou ruptura por cisalhamento. Tal viga, também apresentou desalinhamento na alma. A ruptura teve início na extremidade esquerda, acima do apoio de 1º gênero e próximo a linha neutra, propagando-se em direção ao centro da viga. A ruptura provocou a separação de parte da alma e mesa superior. Nas Figuras 46 e 47 estão apresentadas o detalhe da ruptura e a viga após o ensaio, respectivamente.



Figura 44 - Detalhe do defeito na viga V1.

Fonte: Autor, 2022.



Figura 45 - Viga V1 após a ruptura.

Fonte: Autor, 2022.



Figura 46 - Detalhe da ruptura da viga V6.

Fonte: Autor, 2022.



Figura 47 - Viga V6 após a ruptura.

Fonte: Autor, 2022.

Em relação às vigas de média densidade, as três vigas, V9, V11 e V15, não superaram o valor de carga de ruptura estimada. A viga V9, cuja carga de ruptura foi de 11,32 kN, está apresentada nas Figuras 48 e 49. Pode-se notar que a ruptura aconteceu em uma região com concentração de vários nós. A ruptura se deu por tração na lâmina inferior, e percebeu-se na figura que não houve esmagamento na lâmina superior por compressão. Sendo assim, pode-se presumir que, caso a viga não apresentasse defeitos possivelmente poderia suportar maiores carregamentos.

A viga V11 não possui gravação de vídeo para auxiliar na análise do modo de ruptura, pois, antes da retirada do relógio comparador, a viga rompeu. Inclusive, acabou provocando a quebra do equipamento que posteriormente precisou ser substituído. No entanto, ao analisar visualmente a viga após seu rompimento, percebeu-se que não havia indícios de esmagamento por compressão. E,

comparando às demais vigas já analisadas, provavelmente a ruptura pode ter ocorrido por tração na lâmina da mesa inferior. Na Figura 50 está apresentada a viga após o ensaio.

A viga V15 também apresentou ruptura inferior à carga estimada, sendo de 18,58 kN. Foi possível observar que as fibras da mesa superior começaram a apresentar esmagamento por compressão na região onde estava sendo aplicado o carregamento. E, posteriormente, a viga apresenta ruptura frágil por tração na mesa inferior. Na Figura 51 é possível observar a viga após o ensaio. A ruptura na mesa inferior ocorreu na região entre o apoio de 2º gênero e de aplicação de carga.



Figura 48 - Detalhe do defeito da viga V9.

Fonte: Autor, 2022.



Figura 49 - Viga V9 após a ruptura.

Fonte: Autor, 2022.



Figura 50 - Viga V11 após a ruptura.

Fonte: Autor, 2022.



Figura 51 - Viga V15 após a ruptura.

Fonte: Autor, 2022.

As vigas V17 e V20, de alta densidade, romperam com carregamento de 16,45 kN e 23,15 kN, respectivamente. A viga V17 exibiu ruptura por cisalhamento na alma próximo à linha neutra, ocorrendo na extremidade esquerda sobre o apoio de 1º gênero. A ruptura propagou-se por todo o corpo da viga separando a alma da mesa superior. Na Figura 52, está exposta a viga V17 após o ensaio. Na viga V20, as fibras da lâmina da mesa superior apresentaram esmagamento por compressão. No entanto, a ruptura se deu por tração na mesa inferior, a qual propagou-se separando parte da alma da mesa inferior. Nas Figuras 53 e 54 está apresentada a viga V20.



Figura 52 - Viga V17 após a ruptura.

Fonte: Autor, 2022.



Figura 53 - Detalhe de esmagamento por compressão das fibras da mesa superior da viga V20.

Fonte: Autor, 2022.



Figura 54 - Viga V20 após a ruptura.

Fonte: Autor, 2022.

4.4.4 Análise geral da resistência apresentada pelas vigas

Na Tabela 14 estão expostas as resistências das vigas, assim como suas densidades e respectivos adesivos. Nota-se, por meio da tabela, que as vigas cujas densidades são altas, as resistências são relativamente maiores. A partir disso, é possível dizer que, para a construção e uso de vigas com perfil em I, recomenda-se o uso de madeira com densidades mais elevadas e até mesmo o emprego de outra espécie.

Tabela 14 - Resistências apresentadas pelas vigas

Densidade	Resistências (kN)		
	Mamona	PUR	Epóxi
Baixa	17,35	9,48	13,31
Baixa	18,17	19,03	17,98
Média	17,05	19,82	11,32
Média	20,17	19,30	14,03
Média	14,14	19,43	18,58
Alta	29,73	20,30	16,45
Alta	26,55	24,35	23,15

Fonte: Autor, 2022.

Na Tabela 15, estão apresentados os coeficientes de correlação entre as densidades aparentes das vigas e suas respectivas resistências, para cada adesivo utilizado.

Tabela 15 - Correlação entre massa e resistência das vigas.

	Mamona	PUR	Epóxi
Coeficiente de correlação (r)	0,80	0,78	0,34

Fonte: Autor, 2022.

Conforme Figueiredo Filho (2009), o coeficiente de correlação de Pearson varia entre -1 a 1. O sinal positivo indica a direção positiva ou negativa do relacionamento e o valor indica a força da relação entre as variáveis. Sendo assim, pode-se observar que as vigas coladas com adesivo de mamona apresentaram uma correlação forte. Isto significa que, quanto maior a densidade, maior será estimativa de resistência. A mesma análise se aplica às vigas coladas com o adesivo PUR, que apresentou coeficiente aproximado. Contudo, as vigas coladas com o adesivo epóxi apresentaram um coeficiente de correlação considerado fraco. Dessa forma, não se pode afirmar que as vigas coladas com este adesivo manifestaram o esperado ganho de resistência na medida que houve aumento de densidade. Embora a evidência deva ser melhor estudada, mas é possível ter ocorrido falta de adesão entre as três partes constituintes da viga.

Por se tratar de um parâmetro fácil de ser obtido, no que diz respeito à produção de vigas em MLC, a densidade aparente pode ser apresentada como um bom indicativo de qualidade e/ou resistência das vigas. Uma vez que, com o aumento da

densidade a tendência é de se ter vigas mais resistentes, como foi possível observar nas vigas confeccionadas nesta pesquisa. Possa (2021) e Stringari et al.(2020) obtiveram, trabalhando com pórticos triarticulados laminados colados, coeficientes de correlação da ordem de 0,95 e 0,82, respectivamente entre as densidades aparentes e as resistências.

A relação média do quociente resistência/massa das vigas coladas com adesivo de mamona foi a maior entre os três adesivos. Enquanto as vigas coladas com adesivo PUR apresentaram uma relação de 296,31 e as vigas coladas com adesivo de epóxi apresentaram uma relação de 261,43, as vigas coladas com adesivo de mamona obtiveram uma relação média de 320,84. Ou seja, para as vigas coladas com adesivo de mamona, cuja massa média é 6,37 kg, as vigas suportaram mais de 300 vezes o seu peso próprio. As massas médias das vigas coladas com PUR e epóxi são, respectivamente, 6,35 kg e 6,27 kg.

Desejava-se que todos os exemplares rompessem com valores no mínimo iguais à carga estimada de 22,35 kN para apresentar ruína à compressão. Contudo, isso pode não ter ocorrido devido aos defeitos presentes nas peças. No momento da compra das tábuas, procurou-se selecionar as melhores peças dentro do lote disponível no comércio. Entretanto, mesmo com uma rigorosa seleção, parte das peças manifestaram defeitos, principalmente nós. Notou-se a falta de preocupação por parte do mercado em comercializar tábuas de boa qualidade para fins estruturais.

4.4.5 Rigidez apresentada pelas vigas

A rigidez expressada pelas vigas foi analisada com o auxílio de um relógio comparador, com resolução de 0,01 mm, instalado no meio do vão da estrutura.

Na Tabela 16 estão apresentadas as flechas médias de cada viga para os carregamentos totais de 6 kN.

Tabela 16 - Valores de deslocamentos médios (cm) para carga de 6 kN

Mamona		PUR		Epóxi	
Viga	Deslocamento	Viga	Deslocamento	Viga	Deslocamento
V4	1,09	V2	1,41	V1	1,26
V5	1,07	V3	0,93	V6	1,05
V10	1,40	V7	1,47	V9	1,36
V12	1,08	V8	1,47	V11	0,99
V14	1,29	V13	0,96	V15	1,04
V18	0,88	V16	1,64	V17	1,21
V21	1,11	V19	0,92	V20	1,40
Média	1,13	-	1,26	-	1,19
Coeficiente de variação (%)	14,84	-	24,51	-	13,77

Fonte: Autor, 2022.

Ao analisar o deslocamento para o mesmo nível de carga no programa Ftool, obteve-se um deslocamento de 0,968 mm. Observou-se que os deslocamentos exibidos pelas vigas foram pouco maiores em comparação ao do programa Ftool. É provável que grande parte desta diferença possa ser explicada pelo elevado número de defeitos existentes nas lâminas (desvios de fibras e nós). Contudo, admite-se alguma influência do tipo de adesivo. Note-se que, em média, as vigas de mamona foram as mais rígidas.

O coeficiente de variação foi calculado com a finalidade de verificar a variabilidade dos dados entre si. Os coeficientes de variação obtidos das leituras das flechas foram de 14,84 %, 24,51% e 13,77%, para vigas coladas com adesivo de mamona, PUR e epóxi, respectivamente. Os coeficientes de variação da mamona e do epóxi são considerados baixos, ou seja, há baixa dispersão dos dados. Quanto ao coeficiente de variação do PUR, obteve-se uma dispersão média dos dados.

4.4.6 Rigidez apresentada pelas vigas coladas com adesivo à base de óleos vegetais

O gráfico de cargas x deslocamentos referentes às leituras realizadas por meio do relógio comparador para a série de vigas coladas com adesivo de mamona estão apresentados na Figura 55.

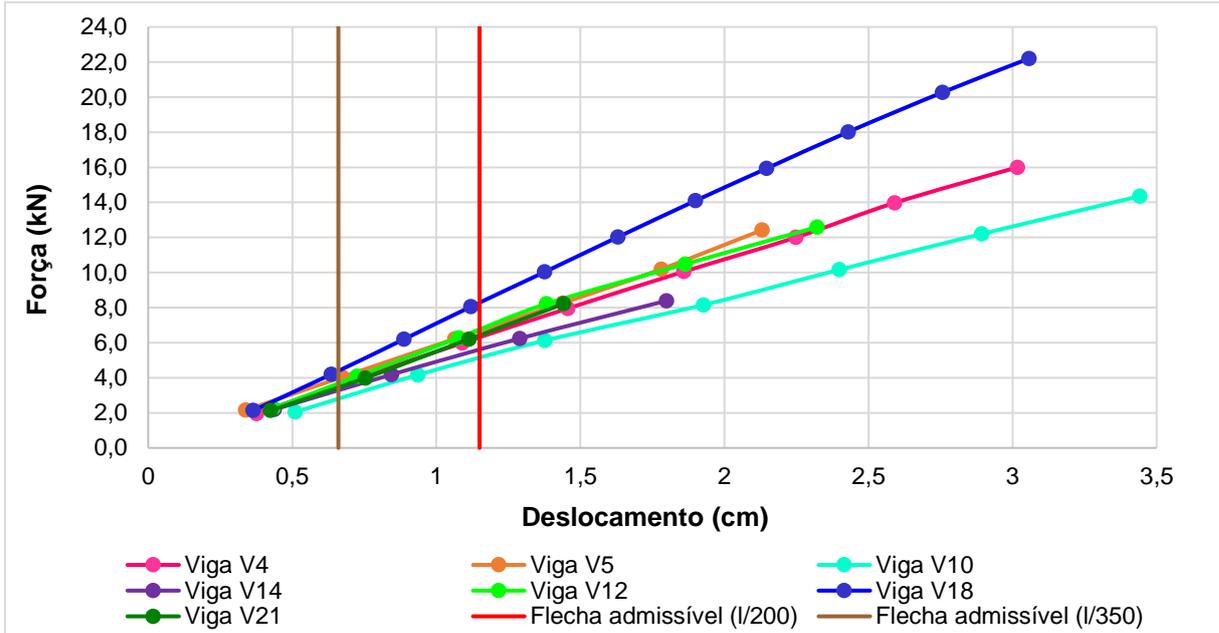


Figura 55 - Diagrama carga x deslocamento das vigas coladas com mamona.

Fonte: Autor, 2022.

Considerando a flecha admissível máxima ($L/200$) de 1,15 cm, nota-se, a partir da Figura 54, que as vigas atingiram tal flecha com carregamentos acima de 4,95 kN. Os deslocamentos das vigas apresentaram comportamento semelhante até a carga de 4 kN. A partir de cargas mais elevadas, observa-se que a viga de alta densidade, V18, exibiu maior rigidez quando comparada às demais. No entanto, a viga V21, também de alta densidade, apresentou uma menor rigidez em relação à viga de sua mesma classe de densidade. A viga V21 continha alguns nós na alma, o que possivelmente pode ter afetado sua rigidez.

As vigas V10 e V14 de média densidade, demonstraram comportamento semelhante. Ambas as vigas exibiram menor rigidez quando comparadas às demais, inclusive com as vigas de baixa densidade. Além disso, ambas as vigas apresentaram defeitos, o que também pode ter afetado a rigidez.

Em relação à flecha admissível máxima ($L/350$) de 0,66 cm, as vigas atingiram este nível de deslocamento com carregamentos acima de 2,91 kN. Neste caso, todas as vigas apresentaram comportamento semelhante de rigidez.

4.4.7 Rigidez apresentada pelas vigas coladas com adesivo poliuretano monocomponente

Na Figura 56 está exposto o gráfico de cargas x deslocamentos para a série de vigas coladas com adesivo PUR.

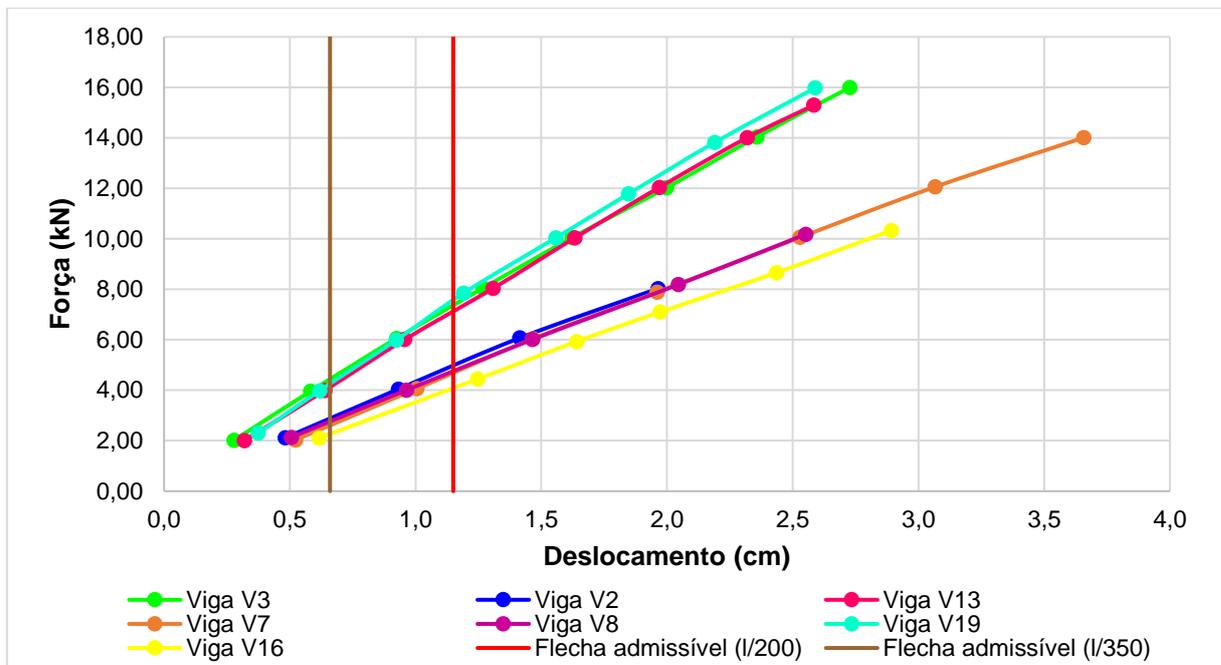


Figura 56 - Diagrama carga x deslocamento das vigas coladas com PUR.

Fonte: Autor, 2022.

Observa-se, por meio da Figura 57, que as vigas V3 (baixa densidade), V13 (média densidade) e V19 (alta densidade), apresentaram uma melhor rigidez quando comparada às demais. Tais vigas atingiram a deformação limite para flecha de 1,15 cm quando passaram a receber carregamentos acima de 7,05 kN. Quando a flecha admissível de 0,66 cm, tais vigas atingiram este nível para carregamentos acima de 4,16 kN. Nota-se que a viga V19 apresenta um comportamento semelhante a V3 e V13 até o nível de carga de 8 kN, e a partir desse carregamento, passa a apresentar maior rigidez dentre as três.

Com relação as vigas V2, V7, V8 e V16, nota-se que houve uma deformação inicial maior que as demais vigas. A viga V16 apresentou um deslocamento de 0,62

cm ao ser aplicada carga na ordem de 2 kN, mostrando-se também a menos rígida dentre as vigas coladas com adesivo PUR. As demais vigas citadas apresentaram comportamento similar entre as mesmas. Ao atingirem os carregamentos de 2,32 kN e 4,08 kN, as vigas mencionadas atingiram as flechas limites de 0,66 cm e 1,15 cm, respectivamente.

4.4.8 Rigidez apresentada pelas vigas coladas com adesivo a base de resina epóxi

Na Figura 57 está apresentado o gráfico de cargas x deslocamentos para a série de vigas coladas com adesivo epóxi.

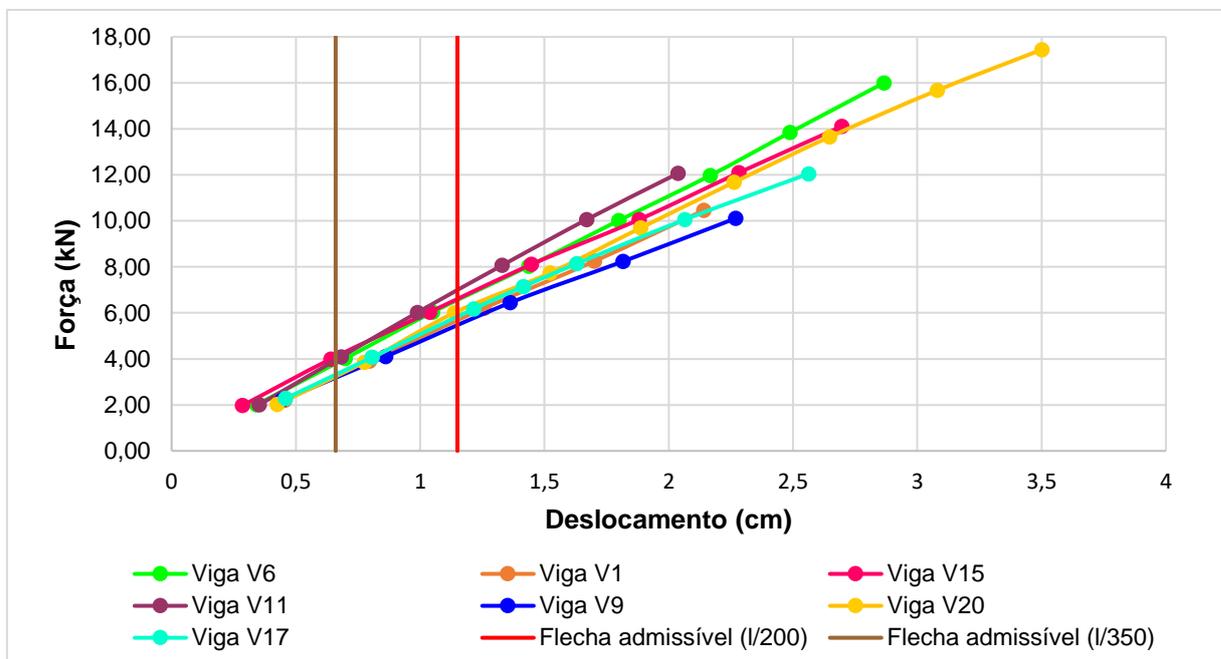


Figura 57 - Diagrama carga x deslocamento das vigas coladas epóxi.

Fonte: Autor, 2022.

Para esta série de vigas, a flecha admissível máxima ($L/200$) de 1,15 cm foi alcançada com carregamento de 5,32 kN. E, a flecha admissível máxima ($L/350$) de 0,66 cm foi atingida a partir da carga de 3,22 kN.

As vigas apresentaram comportamento de rigidez semelhante até um nível de carregamento próximo à 4 kN. Por meio da Figura 57, observa-se que a viga V9 apresentou menor rigidez dentre os 7 exemplares ensaiados. Enquanto a viga V11 apresentou uma melhor rigidez da série. Ambas as vigas citadas são de média

densidade. A viga V17, alta densidade, apresentou a segunda menor rigidez dentre as vigas.

4.4.9 Rigidez média apresentada pelas vigas

Na Figura 58 está exposto o diagrama carga x deslocamento médio para as vigas coladas com os três tipos de adesivo.

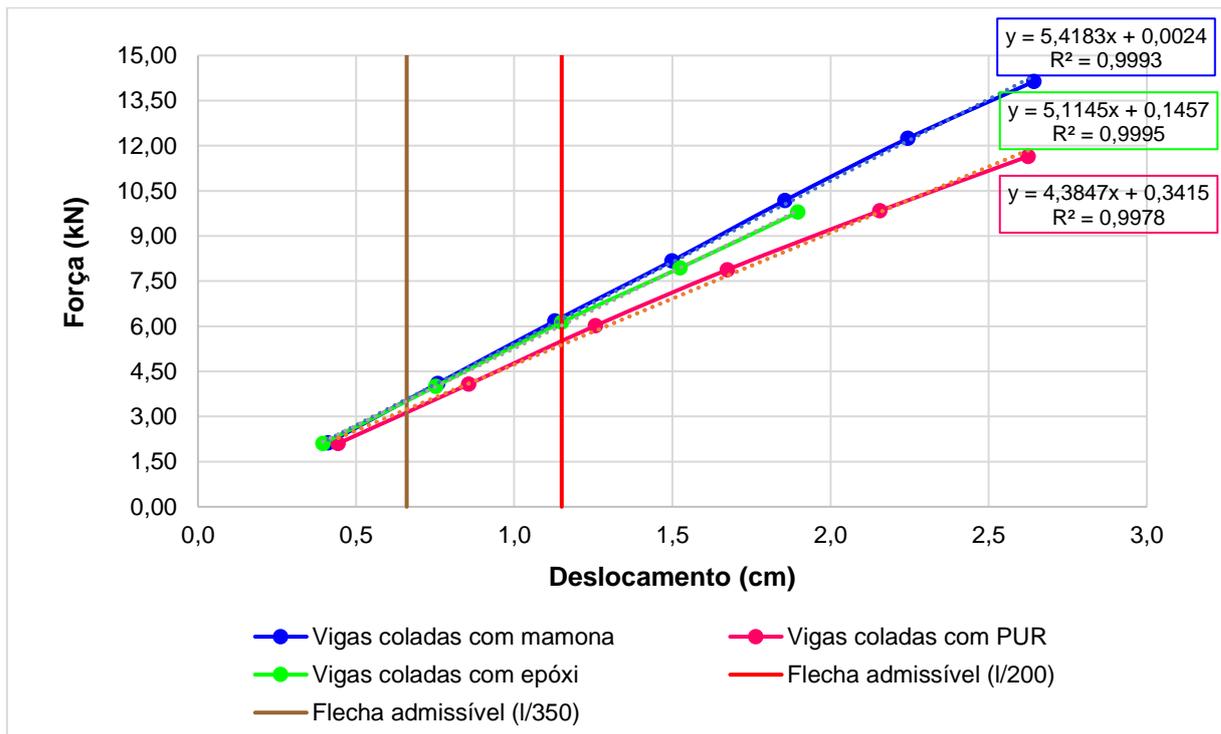


Figura 58 - Diagrama carga x deslocamento para as vigas coladas com os três adesivos

Fonte: Autor, 2022.

Por meio da Figura 58, pode-se observar que as vigas coladas com adesivo de mamona apresentaram a maior rigidez média dentre os três adesivos analisados. As vigas coladas com mamona mostraram-se 1,16 vezes mais rígidas que as vigas coladas com adesivo PUR, e 1,03 vezes mais rígidas que as vigas coladas com o adesivo epóxi, quando considerada a flecha admissível máxima (L/200) de 1,15 cm.

4.4.10 Análises estatísticas

Com o propósito de analisar a influência do tipo de adesivo na resistência e rigidez das vigas confeccionadas, realizou-se a comparação de médias das resistências obtidas pelo ensaio de flexão e cargas de ruptura para flechas limites $L/200$ e $L/350$.

Aplicou-se o teste de Shapiro-Wilk para verificar a normalidade dos dados e, posteriormente, foi aplicado o teste de Tukey para avaliar a diferença entre os tratamentos. Quanto ao delineamento, utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado (DIC), sendo três tratamentos para a avaliação da resistência das vigas.

Os dados de resistências apresentaram homoscedasticidade e distribuição normal, seguindo com a análise de variância. Na Tabela 17 estão apresentados os valores médios da carga de ruptura (kN) das vigas coladas em função dos três tipos de adesivos.

Tabela 17 - Valores médios de cargas de ruptura (kN) em função do tipo de adesivo.

Adesivo	Médias
Epóxi	16,40 a
PUR	18,81 a
Mamona	20,46 a

Médias ao longo das colunas seguidas de mesmas letras minúsculas não diferem entre si à 5% de significância pelo teste Tukey.

Fonte: Autor, 2022.

Com base nos valores apresentado na Tabela 17, pode-se observar que não houve diferença significativa entre as médias de resistências. Ou seja, o tipo de adesivo não influenciou nas resistências das vigas. No entanto, constatou-se que as vigas coladas com o adesivo de mamona apresentaram maior média da carga de ruptura, seguido das vigas coladas com PUR e epóxi.

Na Figura 59, estão apresentados os dados de carga de ruptura por adesivo.

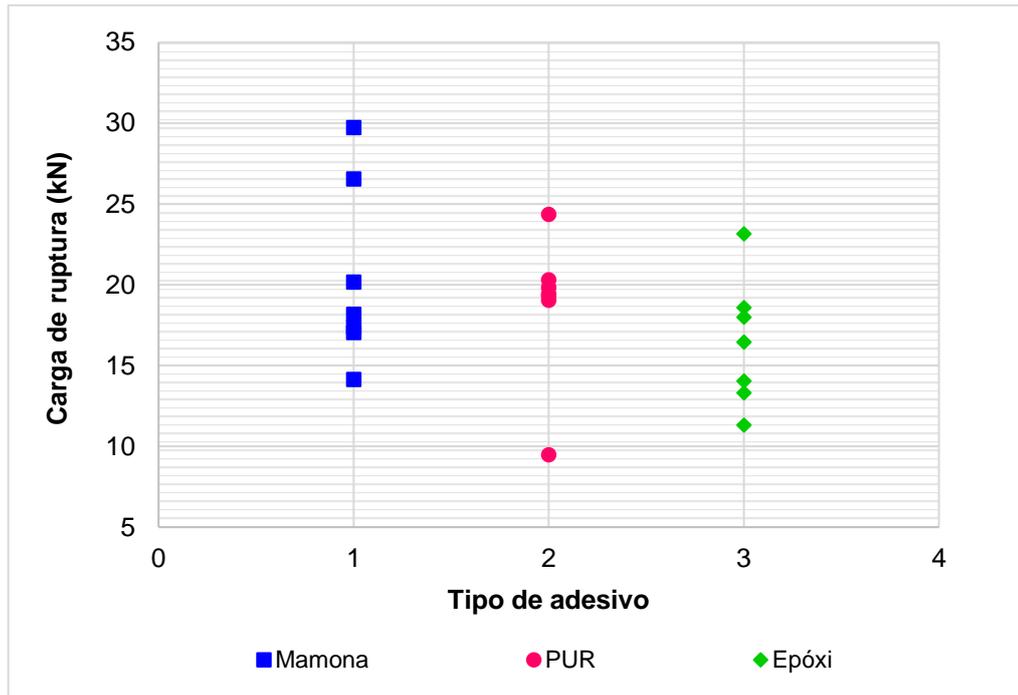


Figura 59 - Cargas de ruptura para cada série de vigas.

Fonte: Autor, 2022.

Através da Figura 59, observa-se que a série de vigas coladas com adesivo de mamona apresentaram maior distribuição das cargas de ruptura, que se distribuíram entre os limites de 14,14 kN e 29,73 kN, não percebendo discrepância entre os dados. Por outro lado, nota-se que para as vigas coladas com adesivo PUR, parte dos dados concentram-se próximos à 20 kN, apresentando discrepância dos valores das extremidades. Para as vigas coladas com adesivo epóxi não houve dispersão dos dados, no entanto os dados concentraram-se entre os limites de 11,32 kN e 23,15 kN.

Com relação a análise estatística da rigidez, os dados de carga de ruptura para as flechas limites de $L/200$ e $L/350$ apresentaram homoscedasticidade e distribuição normal, sendo possível seguir com a análise de variância. Na Tabela 18 estão apresentados os valores médios da carga (kN) associados às flechas limites testados.

Tabela 18 - Valores médios de cargas (kN) em função de cada tipo de adesivo, associados às flechas normativas.

Adesivos	Médias	
	L/200	L/350
Epóxi	6,06 a	3,58 b
PUR	5,69 a	3,66 b
Mamona	6,35 a	3,65 b

Médias ao longo das colunas seguidas de mesmas letras minúsculas não diferem entre si à 5% de significância pelo teste Tukey.

Fonte: Autor, 2022.

Por meio da comparação de médias pelo teste Tukey, constatou-se que não houve diferença significativa entre os tratamentos, tanto para as flechas limites de L/200 quanto para L/350.

A maior média obtida para flecha admissível L/200 foi observada para as vigas coladas com adesivo de mamona, seguido pelo adesivo epóxi e PUR. No entanto, para L/350, pode-se notar que as vigas coladas com adesivo PUR e mamona possuem médias muito próximas entre si, expressando, dessa forma, que ambos os tratamentos possuem rigidez semelhantes. Além disso, por meio das médias, nota-se uma rigidez inicial das vigas coladas com PUR maior que as vigas coladas com epóxi, porém, esta realidade se inverte na medida em que se aplica carga na estrutura.

As tabelas das análises de variâncias estão apresentadas no Apêndice B.

5 CONCLUSÕES

Com base nas condições impostas para o desenvolvimento desta pesquisa e nos critérios considerados para a análise, no que se refere às vigas com perfil I em madeira laminada colada, pode-se concluir:

- Em relação à resistência, não houve diferença significativa no desempenho mecânico observado para as vigas entre adesivos usados. Contudo, o adesivo à base de óleo de mamona apresentou a maior média de resistência;
- Em relação à rigidez, não houve igualmente influência do tipo de adesivo, para os níveis de flechas normativas estudadas. Contudo, novamente, no geral, incluindo níveis de cargas mais elevados, o conjunto de vigas coladas com adesivo à base de óleo de mamona, apresentou maior rigidez. Ainda, este critério conduziria a que tais vigas ficassem sob serviço para cargas da ordem de 3,23 kN a 3,58 kN.
- Com relação aos modos de ruptura, observou-se que ao menos 50% das vigas apresentaram similaridade na ruína, apresentando ruptura frágil por tração na mesa inferior. Parte das vigas também apresentaram esmagamento das fibras na lâmina da mesa superior. Portanto, apresentaram um comportamento de ruptura típico para vigas em madeira serrada submetidas ao ensaio de flexão;
- Obteve-se elevada correlação positiva entre a densidade aparente da madeira das estruturas e suas respectivas resistências, para as vigas coladas com o adesivo de mamona e PUR. Isto evidencia que uma seleção pela densidade das peças para compor a estrutura pode melhorar seu desempenho. No entanto, obteve-se uma fraca correlação positiva para as vigas coladas com o adesivo epóxi. Este fato pode estar ligado à qualidade de adesão entre adesivo e substrato, merecendo uma melhor investigação.
- Em relação às vigas confeccionadas apenas com três lâminas simples, só devem ser executadas e postas em serviço a partir de uma rigorosa seleção, dado que, por exemplo, a presença de nós na lâmina inferior pode gerar ruptura muito precoce em relação ao desempenho esperado em função da caracterização da madeira.

Considerando boa frequência de rupturas precoces, muito aquém da carga de referência de 22,35 kN, acredita-se no potencial das vigas com esta configuração, principalmente quando se considera a relação resistência/peso. Observou-se que a presença de defeitos nas peças, principalmente nós, comprometem seu desempenho. Em vista disso, vale investir em peças cuja origem e idade sejam conhecidas, a fim de se obter peças de melhor qualidade. Nesse contexto, recomenda-se para pesquisas futuras:

- Execução de vigas com almas duplas a fim de aumentar seu desempenho quanto à resistência e rigidez;
- Estudo mais aprofundado sobre a qualidade de adesão dos adesivos na madeira, com destaque para o adesivo epóxi;
- Emprego de lâminas isentas de defeitos por meio da eliminação de nós e utilização de emendas do tipo *finger-joints*;
- Execução de vigas com a mesma configuração, no entanto, utilizando madeira de maior densidade, como por exemplo, o eucalipto;
- Estudar a influência do tipo de ligação entre alma e mesa.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 905**: Standard test method for strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading. Pennsylvania, 2013.

APRILANTI, M. D. **Influência de um corte na borda tracionada de uma viga maciça simulando uma emenda de topo na lâmina inferior de vigas laminadas coladas**. 2010. 108f. Dissertação (Mestrado em Ciências: recursos florestais com opção em Tecnologia de Produtos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2010.

AUGUSTIN, M. Educational Materials for Designing and Testing of Timber Structures – TEMTIS. **Handbook 1 – Timber Structures**. Leonardo da Vinci Pilot Projects. 2008. 243 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7190**: Projeto de estruturas em madeira. Rio de Janeiro, 1997.

AZEVEDO, E. C. de. **Efeito da radiação nas propriedades mecânicas do adesivo de poliuretana derivado do óleo de mamona**. 2009, 153f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

BERTOLINE, C. A. A. **Estudo Teórico De Vigas De Madeira Laminada Colada Reforçadas Por Fibras Sintéticas**. 2015. 145f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

BIANCHE, J. J. **Interface madeira-adesivo e resistência de juntas coladas com diferentes adesivos e gramatura**. 2014. 98f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

Bianche, J. J., Teixeira, A. P. M., Ladeira, J. P. S., Carneiro, A. D. C. O., Castro, R. V. O., & Della Lucia, R. M. (2017). Cisalhamento na linha de cola de Eucalyptus sp. colado com diferentes adesivos e diferentes gramaturas. **Floresta e Ambiente**, 24.

CALIL JR, C.; DIAS, A. A. Uso da madeira em construções rurais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.1, p. 71-77, 1997.

CARNEIRO, R. P. **Colagem de junta de madeira com adesivo epóxi**. 2010. 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

COSTA, A. P. O. **Estudo do comportamento cinético e mecânico-dinâmico de resinas epóxi a base de óleo de soja epoxidado**. 2001, 107f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

DIAS, P. R. V. **Engenharia de Custos: Estimativa de Custo de Obras e Serviços de Engenharia**. 1º Edição. Rio de Janeiro , 2004.

FIGUEIREDO FILHO, D. B; SILVA JÚNIOR, J. A. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). **Revista Política Hoje**, v. 18, n. 1, p. 115-146, 2009.

FIORELLI, J. **Utilização de fibras de carbono e de fibras de vidro para reforço de vigas de madeira**. 2002. 168 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

FIORELLI, J. **Estudo teórico e experimental de vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro**. 2005. 108f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

FISSETTE, P. **The evolution of engineered wood I-joists**. 2000. Disponível em: http://www.umass.edu/bmatwt/publications/articles/i_joist.html Acesso em 14 de jun de 2021.

GASQUES, A. C. F. *et al.* Impactos ambientais dos materiais da construção civil: breve revisão teórica. **Revista Tecnológica Maringá**, v. 23, p. 13-24, 2014.

GAVA, M. **Viabilidade técnica e econômica da produção de componentes construtivos para habitação social utilizando madeira serrada de pinus de terceira classe de qualidade**. 2005. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

HIBBELER, R.C. **Resistência dos Materiais**, 5ª Edição, São Paulo, Pearson Education do Brasil, 2004

JESUS, J. M. H. de. **Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada (MLC)**. 2000, 125f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

JÚNIOR, C. R. C.; SILVA, W. C. R.; SOARES, P. de T. M. L. USO DA MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL. **Projectus**, v. 2, n. 4, p. 79-93, 2017.

KERSTING, D. de F. **Avaliação de resinas Epóxi para fabricação de materiais compósitos pelo processo de pultrusão**. 2004, 117f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

LAM, F. Modern structural wood products. **Progress in structural engineering and materials**, v. 3, n. 3, p. 238-245, 2001.

LIMA, A. L. **Comportamento estrutural de vigas em madeira, com seção I, de**

mesas em Pinus maciço e alma em OSB. 2005, 94f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

MAGALHÃES, T. D. A. **Vigas de madeira laminada colada com entalhes: estudo analítico e experimental de vigas reforçadas com fibras de carbono.** 2018. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2018.

MANTILLA CARRASCO, E. V. **Resistência, elasticidade e distribuição de tensões nas vigas retas de madeira laminada colada (MLC).** 1989. 347 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989.

MARQUES, J. L. da S. **Desenvolvimento de Adesivos Nanocompósitos de Poliuretano à Base de Óleo de Mamona.** 2009, 110f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

MELLO, R. L. de. **Projetar em madeira: uma nova abordagem.** 2007. 195f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

MIOTTO, J. L. **Estruturas mistas de madeira-concreto: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibras de vidro.** 2009, 357f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

MIOTTO, J. L.; DIAS, A. A. Produção e avaliação de vigas de madeira laminada colada confeccionadas com lâminas de eucalipto. **Revista Tecnológica**, Maringá, v. Edição Especial ENTECA, p. 37-47, 2009.

MONTEIRO, S. N. *et al.* Propriedades mecânicas e termomecânicas de compósitos com partículas de diamante dispersas em matriz epoxídica modificada na razão resina/endurecedor. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 11, p. 385-394, 2006.

MOODY, R. C.; HERNANDEZ, Roland. Glued-laminated timber. **Forest Product Laboratory. USDA Forest Service. Madison, Winconsin**, 1999.

OLIVEIRA, G. L. Cross Laminated Timber (CLT) no Brasil: processo construtivo e desempenho. **Recomendações para o processo do projeto arquitetônico- Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo**, 2018. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

PEDROSA, A. de L. **PERFORMANCE DE VIGAS “I” CONSTITUÍDAS POR FLANGES DE.** 2003. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

PELLIS, B. P. **Desempenho mecânico de vigas de madeira laminada colada armada confeccionadas com adesivo poliuretânico.** 2015, 118f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de madeira**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

PERTILE, A. C. **Análise numérica de vigas de madeira laminada colada reforçadas em situação de incêndio**. 2018, 125f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

PETRAUSKI, S. M. F. C. *et al.*, **Avaliação de juntas coladas com adesivos poliuretanos**. Revista Madeira, ed nº 125, nov 2010.

PETRAUSKI, S. M. F. C. **Desenvolvimento de pórticos de madeira laminada colada de eucalipto, utilizando adesivos à base de resorcinol e óleo de mamona**. 2012. 119f. Dissertação (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

POSSA, D. C. **Construção e ensaio de pórticos com tirante em madeira laminada colada**. 2021. 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2021.

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

RACHER, P., *et al.* **Effect of web stiffness on the bending behaviour of timber composite I-beams**. Universidade de Blaise Pascal, Campus de Cézeaux – França. 2005.

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, 94f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

SHIGUE, E. K. **Difusão da construção em madeira no Brasil: agentes, ações e produtos**. 2018, 250f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

SILVA, B. B. R. da. **Desenvolvimento de adesivos de poliuretano a base de óleo de mamona**. 2006. 84f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

SILVA, C. da C. e. *et al.* Emendas em vigas de seção transversal I em madeira. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRA E ESTRUTURA DE MADEIRA, 11., 2008, Londrina. **Anais...** Londrina: Universidade Estadual de Londrina, 2008.

SILVA, C. C. **Análise teórica e experimental de vigas de madeira de seção transversal “I” para uso em fôrmas**. 2010. Tese de Doutorado. Dissertação

(Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

STRINGARI, E. H.; PETRAUSKI, A.; COURI PETRAUSKI, S. M. F.; AZEVEDO, R. L.; SAVARIS, G. **Construction and testing of glued laminated timber frames for use in laying poultry houses**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 40, n. 2, p. 122-131, 2020.

TELES, R. F. **Propriedades tecnológicas de vigas de madeira laminada colada produzidas com louro vermelho**. Brasília, 2009. 118p. Tese de Mestrado em Ciências Florestais - Universidade de Brasília

TREVINO, A. S.; TRUMBO, D. L. Acetoacetylated castor oil in coatings applications. **Progress in organic coatings**, v. 44, n. 1, p. 49-54, 2002.

USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Wood Handbook: wood as engineering material**. USDA: Washington, 1999. 473p.

VALENÇA, S. L. **Avaliação da tensão interfacial entre petróleo parafínico e superfícies com resinas epóxi**. 2010. 86f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2010.

ZANGIÁCOMO, A. L. **Estudo de elementos estruturais roliços de madeira**. 2007, 142f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Universidade de São Paulo, São carlos, 2007.

7 APÊNDICES

APÊNDICE A

Classificação e caracterização das peças de madeira.

Tabela 19 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade na compressão.

Corpo de prova	d (g/cm ³)	Ruptura (kN*)	Ec0 (MPa)	U (%)	Ec0 12% (MPa)
1.1	0,655	111,74	9098	11,05	8925
2.1	0,517	106,89	8308	9,76	7936
2.3	0,523	105,6	8641	9,68	8240
3.1	0,561	115,46	11439	10,66	11132
4.1	0,608	125,57	12634	10,08	12150
4.3	0,612	120,09	10952	11,10	10754
5.1	0,424	83,29	7313	10,22	7053
5.3	0,444	83,76	8314	10,14	8006
6.1	0,662	124,2	11766	10,79	11482
6.2	0,674	112,25	10165	11,11	9984
7.1	0,409	75,08	5824	10,31	5628
8.1	0,579	104,53	6338	10,73	6176

*Neste trabalho considerou-se que 1 kgf = 10 N.

Tabela 20 - Resultados do ensaio de compressão paralela às fibras.

Corpo de prova	d (g/cm ³)	Ruptura (kN*)	fc0 (MPa)	U (%)	fc0 12% (MPa)
1.1	0,579	104,53	41,81	11,05	40,21
2.1	0,409	75,08	30,03	9,76	28,51
2.3	0,674	112,25	44,90	9,68	43,70
3.1	0,612	120,09	48,04	10,66	46,73
4.1	0,424	83,29	33,32	10,08	31,54
4.3	0,655	111,74	44,70	11,10	43,42
5.1	0,444	83,76	33,50	10,22	31,64
5.3	0,517	106,89	42,76	10,14	39,89
6.1	0,523	105,60	42,24	10,79	39,30
6.2	0,561	115,46	46,18	11,11	44,32
7.1	0,608	125,57	50,23	10,31	47,34
8.1	66,141	124,20	49,68	10,73	47,88

*Neste trabalho considerou-se que 1 kgf = 10 N.

Tabela 21 - Resultados do ensaio de tração na flexão

Corpo de prova	d (g/cm ³)	Ruptura (kN*)	fM (MPa)	U (%)	fM 12% (MPa)
64	0,619	1,54	55,44	12,28	53,72
103A	0,715	1,34	51,87	12,71	51,39
103B	0,617	1,62	62,71	12,61	62,20
120 A	0,574	1,58	60,83	12,15	62,74
120 B	0,455	1,85	69,38	13,04	69,91
130B	0,587	2,17	78,12	12,05	77,93
139A	0,378	2,12	82,06	11,69	82,43
139B	0,409	2,23	86,79	11,73	86,93
1B	0,691	2,69	100,35	12,69	101,86
25A	0,371	2,29	84,99	10,97	87,74
27A	0,560	2,12	76,32	11,92	77,72
61A	0,480	1,97	73,11	12,25	73,73
61B	0,601	2,81	101,16	12,50	103,26
89B	0,612	2,74	102,75	13,08	104,95

*Neste trabalho considerou-se que 1 kgf = 10 N.

Tabela 22 - Resultados do ensaio de cisalhamento paralelo às fibras

Corpo de prova	d (g/cm³)	Ruptura (kN*)	fv0 (MPa)	U (%)	fv0 12% (MPa)
1.3	0,658	39,97	15,40	11,74	15,28
1.5	0,642	34,58	13,39	11,88	13,34
2.4	0,522	32,59	12,64	11,06	12,29
3.3	0,551	26,15	10,17	11,74	10,09
3.5	0,533	30,1	11,67	11,55	11,51
4.4	0,588	30,29	11,74	11,22	11,46
5.4	0,444	26,82	10,39	11,63	10,27
6.4	0,673	42,02	16,15	12,15	16,22
7.2	0,380	23,21	9,08	10,68	8,72
7.4	0,383	25,22	9,78	10,80	9,43
8.3	0,567	44,33	17,13	11,59	16,92
8.5	0,563	40,05	15,54	11,48	15,30
1,2	0,651	33,62	12,99	10,90	12,57
1,4	0,646	32,05	12,45	11,95	12,43
2,2	0,515	29,67	11,51	10,94	11,15
3,2	0,563	28,51	11,07	11,56	10,93
3,4	0,542	32,96	12,78	11,20	12,47
4,2	0,611	39,39	15,28	11,07	14,86
5,2	0,437	19,97	10,04	11,03	9,74
6,3	0,675	33,13	12,80	11,48	12,60
7,1	0,390	17,12	6,63	10,68	6,37
7,3	0,381	23,46	9,08	10,55	8,69
8,2	0,565	31,23	12,02	11,51	11,85
8,4	0,576	35,51	13,72	11,62	13,57

*Neste trabalho considerou-se que 1 kgf = 10 N.

Tabela 23 - Resultados do ensaio preliminar de cisalhamento de juntas coladas com adesivo PUR

Corpo de prova	d (g/cm ³)	Ruptura (kN*)	fv0 (MPa)	U (%)	fv0 12% (MPa)
9.1	0,755	31,75	16,18	12,17	16,26
9.2	0,761	20,71	10,46	12,14	10,50
9.3	0,754	35,68	18,02	13,24	18,69
9.4	0,749	16,62	8,42	12,04	8,43
9.5	0,744	21,18	10,70	13,29	11,11
13.1	0,735	24,08	12,15	12,06	12,17
13.2	0,729	26,17	13,21	10,62	12,66
13.3	0,736	32,07	16,19	11,76	16,07
13.4	0,745	12,37	6,26	11,39	6,14
13.5	0,754	24,48	12,36	11,54	12,19
14.1	0,755	27,64	13,93	12,45	14,12
14.2	0,751	30,01	15,17	10,65	14,55
14.3	0,747	29,14	14,75	11,36	14,46
14.4	0,749	26,31	13,23	11,20	12,91
14.5	0,745	23,57	11,94	11,70	11,83
5.1	0,830	24,11	12,23	12,28	12,34
5.2	0,824	22,2	11,50	12,38	11,63
5.3	0,817	27,84	14,11	12,12	14,16
5.4	0,815	22,56	11,42	12,32	11,53
5.5	0,820	28,52	14,53	12,64	14,80
18.1	0,743	29,54	14,89	11,99	14,88
18.2	0,742	32,01	16,14	11,27	15,78
18.3	0,747	34,62	17,47	11,07	16,99
18.4	0,748	32,99	16,65	12,09	16,70
18.5	0,749	30,82	15,60	10,91	15,09
19.1	0,690	27,13	13,68	12,65	13,95
19.2	0,694	29,26	14,74	13,08	15,22
19.3	0,677	33,4	16,80	11,30	16,45
19.4	0,668	30	15,00	12,96	15,43
19.5	0,669	25,28	12,72	12,82	13,03
23.1	0,693	18,48	9,32	12,89	9,56
23.2	0,729	26,06	13,15	12,50	13,35
23.3	0,702	20,35	10,25	12,89	10,52
23.4	0,680	21,88	11,02	12,36	11,13
23.5	0,700	24,88	12,54	12,26	12,64
34.1	0,472	18,91	9,59	12,66	9,78
34.2	0,475	27,11	13,69	11,76	13,60
34.3	0,482	22,9	11,57	11,84	11,51
34.4	0,486	24,93	12,61	12,08	12,64
34.5	0,474	20,52	10,36	12,50	10,52

*Neste trabalho considerou-se que 1 kgf = 10 N.

Continuação da Tabela 22

Corpo de prova	d (g/cm³)	Ruptura (kN*)	fv0 (MPa)	U (%)	fv0 12% (MPa)
33.1	0,480	20,4	10,33	13,10	10,67
33.2	0,486	25,42	12,84	10,94	12,43
33.3	0,490	24,37	12,20	13,04	12,58
33.4	0,484	25,06	12,62	12,99	13,00
33.5	0,477	28,2	14,26	13,64	14,96
32.1	0,480	26,39	13,39	12,10	13,43
32.2	0,489	30,79	15,56	11,80	15,47
32.3	0,487	30,46	15,39	11,86	15,33
32.4	0,492	24,24	12,25	12,02	12,26
32.5	0,490	25,14	12,71	12,27	12,81
7.1	0,784	29,9	14,96	12,64	15,24
7.2	0,779	23,54	11,82	11,81	11,75
7.3	0,788	30,91	15,48	12,36	15,65
7.4	0,770	30,48	15,25	12,00	15,25
7.5	0,755	30,62	15,34	12,36	15,50
8.1	0,744	32,53	16,53	13,31	17,18
8.2	0,757	33,08	16,78	13,74	17,66
8.3	0,763	35,76	18,12	11,94	18,09
8.4	0,771	27,59	14,02	12,18	14,09
8.5	0,772	23,5	11,97	12,75	12,24
15.1	0,713	24,97	12,82	11,99	12,81
15.2	0,715	28,12	14,38	11,99	14,37
15.3	0,722	29,39	14,93	10,93	14,45
15.4	0,727	29,41	14,84	11,79	14,75
15.5	0,726	28,04	14,32	13,92	15,14
16.1	0,723	24,19	12,39	11,55	12,23
16.2	0,734	29,52	14,99	12,32	15,13
16.3	0,740	22,21	11,32	20,22	14,11
16.4	0,742	29,54	14,94	11,49	14,71
16.5	0,741	30,53	15,46	12,01	15,47
25.1	0,720	24,32	12,23	12,12	12,27
25.2	0,712	13,11	6,60	11,83	6,57
25.3	0,708	21,42	10,80	11,03	10,48
25.4	0,685	24,55	12,36	12,02	12,37
25.5	0,689	27,18	13,68	11,97	13,67
30.1	0,665	28,58	14,45	10,50	13,81
30.2	0,658	25,9	13,10	12,18	13,17
30.3	0,661	32,94	16,60	11,76	16,48
30.4	0,665	32,85	16,61	11,67	16,45
30.5	0,684	30,58	15,49	11,02	15,03

*Neste trabalho considerou-se que 1 kgf = 10 N.

Continuação da Tabela 22

Corpo de prova	d (g/cm ³)	Ruptura (kN*)	fv0 (MPa)	U (%)	fv0 12% (MPa)
27.1	0,677	17,05	8,67	8,06	7,64
27.2	0,681	25,4	12,80	12,30	12,91
27.3	0,676	28,73	14,53	12,30	14,66
27.4	0,678	19,51	9,88	12,34	9,98
27.5	0,690	24,76	12,62	12,50	12,81
12.1	0,769	27,67	14,03	12,98	14,44
12.2	0,767	33,86	17,15	11,96	17,12
12.3	0,774	34,83	17,77	13,45	18,55
12.4	0,790	29,55	15,00	11,50	14,78
12.5	0,788	19,12	9,81	13,45	10,23
20.1	0,665	21,2	10,75	12,30	10,84
20.2	0,670	25,66	12,93	11,98	12,92
20.3	0,677	24,75	12,44	11,93	12,41
20.4	0,681	23,39	11,84	12,50	12,02
20.5	0,683	31,89	16,17	12,60	16,46
22.1	0,678	32,08	16,39	11,81	16,30
22.2	0,686	24,3	12,40	11,98	12,39
22.3	0,686	26,5	13,96	11,56	13,77
22.4	0,675	35,56	18,63	12,33	18,82
22.5	0,695	36,31	18,67	11,51	18,40
6.1	0,821	22,85	11,53	12,06	11,55
6.2	0,814	30,37	15,36	12,32	15,51
6.3	0,817	27,8	14,15	12,30	14,28
6.4	0,810	23,46	11,79	12,10	11,83
6.5	0,803	24,91	12,52	12,54	12,72
31.1	0,496	24,25	12,23	11,95	12,21
31.2	0,492	28,33	14,23	12,26	14,35
31.3	0,487	31,74	16,03	11,67	15,87
31.4	0,489	33,04	16,58	12,41	16,79
31.5	0,485	24,92	12,65	11,69	12,53
26.1	0,662	25,35	12,89	11,84	12,83
26.2	0,673	30,31	15,34	12,78	15,69
26.3	0,683	26,68	13,61	11,89	13,56
26.4	0,688	23,14	11,82	11,35	11,59
26.5	0,693	32,55	16,91	12,44	17,13
1.1	0,826	21	10,68	12,05	10,70
1.2	0,804	34,34	17,51	12,32	17,68
1.3	0,800	35,5	18,06	12,00	18,06
1.4	0,804	30,29	15,45	12,11	15,50
1.5	0,797	25,38	12,99	12,15	13,05

*Neste trabalho considerou-se que 1 kgf = 10 N.

Continuação da Tabela 22

Corpo de prova	d (g/cm³)	Ruptura (kN*)	fv0 (MPa)	U (%)	fv0 12% (MPa)
17.1	0,752	36,63	18,66	11,95	18,63
17.2	0,740	34,8	17,59	12,22	17,70
17.3	0,744	32,97	16,73	8,55	15,00
17.4	0,738	30,87	15,66	11,89	15,61
17.5	0,744	32,56	16,52	10,45	15,75
2.1	0,811	22,56	11,56	12,67	11,80
2.2	0,811	26,53	13,29	12,20	13,37
2.3	0,809	25,78	13,06	12,16	13,13
2.4	0,799	33,11	16,78	12,24	16,90
2.5	0,811	25,31	12,86	12,20	12,94
35.1	0,469	25,51	12,80	11,18	12,49
35.2	0,473	27,02	13,61	11,45	13,39
35.3	0,484	24,39	12,26	12,12	12,30
35.4	0,486	24,69	12,42	11,49	12,23
35.5	0,481	31,08	15,62	8,93	14,18
36.1	0,470	20,57	10,46	11,26	10,22
36.2	0,473	21,55	10,88	12,07	10,91
36.3	0,474	24,69	12,47	12,09	12,50
36.4	0,483	27,85	14,03	11,64	13,88
36.5	0,493	28,94	14,58	11,95	14,56
11.1	0,751	26,35	13,80	11,89	13,76
11.2	0,753	32,6	16,66	11,55	16,43
11.3	0,755	30,35	15,53	11,99	15,52
11.4	0,763	25,66	13,50	11,99	13,49
11.5	0,778	35,48	18,54	12,28	18,69
11.6	0,823	29,72	15,20	12,07	15,23
11.7	0,819	32,57	16,61	12,22	16,72
11.8	0,822	27,00	13,93	11,60	13,77
11.9	0,815	25,59	13,14	11,81	13,06
11.10	0,815	27,73	14,07	11,90	14,03
10.1	0,764	32,03	16,18	12,27	16,31
10.2	0,755	29,08	14,80	13,33	15,39
10.3	0,747	26,91	13,73	13,38	14,30
10.4	0,746	26,97	13,59	13,00	14,00
10.5	0,757	34,06	17,20	12,02	17,21
4.1	0,799	24,94	12,70	11,73	12,60
4.2	0,812	23,71	12,06	12,01	12,06
4.3	0,810	22,27	11,27	12,09	11,30
4.4	0,810	28,59	14,45	11,73	14,33
4.5	0,811	33,55	17,00	12,67	17,34

*Neste trabalho considerou-se que 1 kgf = 10 N.

Continuação da Tabela 22

Corpo de prova	d (g/cm³)	Ruptura (kN*)	fv0 (MPa)	U (%)	fv0 12% (MPa)
24.1	0,680	24,39	12,31	11,81	12,24
24.2	0,677	37,72	19,49	12,12	19,56
24.3	0,660	21,47	10,96	12,12	11,00
24.4	0,668	20,21	10,17	11,11	9,90
24.5	0,677	22,45	11,29	11,86	11,24
29.1	0,731	20,79	10,56	12,20	10,63
29.2	0,727	20,02	10,19	11,88	10,15
29.3	0,732	23,39	11,99	12,08	12,02
29.4	0,725	17,63	9,16	12,08	9,18
29.5	0,723	22,54	11,75	11,79	11,68
28.1	0,677	25,66	13,09	12,18	13,16
28.2	0,670	16,01	8,06	13,08	8,32
28.3	0,675	23,89	12,09	12,70	12,35
28.4	0,668	27,14	13,73	12,66	14,01
28.5	0,666	30,09	15,19	12,39	15,37
21.1	0,687	22,35	11,25	11,76	11,17
21.2	0,703	19,47	9,94	12,17	9,99
21.3	0,702	27,63	13,97	11,95	13,95
21.4	0,706	20,21	10,31	11,87	10,27
21.5	0,695	21,9	11,02	12,00	11,02

*Neste trabalho considerou-se que 1 kgf = 10 N.

Tabela 24 - Resultados do ensaio preliminar de cisalhamento de juntas coladas com adesivo epóxi

Corpo de prova	d (g/cm ³)	Ruptura (kN*)	fv0 (MPa)	U (%)	fv0 12% (MPa)
1.1	0,734	22,8	11,36	11,41	11,16
1.2	0,739	15,1	7,50	10,13	7,08
1.3	0,748	21,8	10,88	11,44	10,69
1.4	0,747	22,74	11,30	11,15	11,01
1.5	0,742	20,81	10,37	10,46	9,89
1.6	0,740	13,24	6,57	11,43	6,46
6.1	0,691	11,67	5,83	11,90	5,81
6.2	0,681	13,33	6,68	11,83	6,65
6.3	0,685	23,16	11,55	11,48	11,37
6.4	0,694	21,58	10,80	11,53	10,65
6.5	0,695	18,97	9,52	11,56	9,40
6.6	0,695	31,26	15,63	11,51	15,40
10.1	0,670	24,6	12,23	11,58	12,07
10.2	0,668	28,8	14,31	11,99	14,31
10.3	0,669	27,1	13,54	11,40	13,29
10.4	0,677	21,36	10,63	11,07	10,33
10.5	0,688	26,61	13,22	11,59	13,06
10.6	0,685	23,2	11,60	11,40	11,39
11.1	0,608	28,95	14,42	11,44	14,18
11.2	0,617	21,11	10,50	10,98	10,18
11.3	0,621	19,33	9,63	11,48	9,48
11.4	0,625	18,24	9,09	11,54	8,96
11.5	0,629	20,35	10,15	11,03	9,86
11.6	0,634	22,34	11,12	11,61	10,99
20.1	0,494	27,53	13,73	10,95	13,30
20.2	0,492	21,94	10,92	10,80	10,52
20.3	0,496	22,03	11,00	11,65	10,89
20.4	0,501	23,00	11,45	11,98	11,44
20.5	0,504	19,43	9,68	12,44	9,81
20.6	0,507	24,87	12,42	11,85	12,37
4.1	0,639	26,27	13,13	11,72	13,02
4.2	0,644	29,29	14,66	11,89	14,61
4.3	0,650	26,88	13,45	11,43	13,22
4.4	0,659	23,16	11,61	11,59	11,46
4.5	0,664	20,64	10,33	11,79	10,27
4.6	0,665	24,21	12,12	12,02	12,12
8.1	0,585	24,30	12,12	11,84	12,06
8.2	0,591	25,15	12,55	11,91	12,52
8.3	0,598	22,93	11,45	11,81	11,39
8.4	0,600	27,29	13,58	11,72	13,47

*Neste trabalho considerou-se que 1 kgf = 10 N.

Continuação da Tabela 23

Corpo de prova	d (g/cm ³)	Ruptura (kN*)	fv0 (MPa)	U (%)	fv0 12% (MPa)
8.5	0,596	25,5	12,76	12,10	12,79
8.6	0,602	21,27	10,59	11,29	10,36
9.1	0,764	38,97	19,43	11,94	19,39
9.2	0,754	23,91	11,94	12,03	11,95
9.3	0,746	32,98	16,42	12,21	16,53
9.4	0,748	32,75	16,37	11,26	16,01
9.5	0,734	25,1	12,52	11,69	12,40
9.6	0,726	31,03	15,47	11,59	15,28
13.1	0,653	10,45	5,21	11,54	5,14
13.2	0,656	30,16	15,03	11,46	14,78
13.3	0,658	29,38	14,62	11,38	14,35
13.4	0,659	18,79	9,36	11,07	9,10
13.5	0,662	27,41	13,64	11,34	13,37
13.6	0,664	21,28	10,67	11,31	10,45
18.1	0,520	23,46	11,67	11,45	11,48
18.2	0,515	22,29	11,06	11,70	10,96
18.3	0,508	24,42	12,15	11,06	11,81
18.4	0,506	23,48	11,71	12,00	11,71
18.5	0,509	23,63	11,79	11,06	11,45
18.6	0,505	23,98	11,93	11,44	11,73
2.1	0,721	14,47	7,26	11,46	7,14
2.2	0,714	27,76	13,93	11,18	13,59
2.3	0,714	22,79	11,42	12,03	11,43
2.4	0,716	21,19	10,61	7,94	9,31
2.5	0,714	25,14	12,58	11,86	12,53
2.6	0,700	23,49	11,74	11,59	11,60
7.1	0,586	22	11,06	11,55	10,91
7.2	0,589	26,39	13,30	10,96	12,89
7.3	0,585	19,42	9,75	11,31	9,55
7.4	0,578	16,32	8,21	11,11	7,99
7.5	0,580	22,74	11,43	11,58	11,29
7.6	0,570	16,68	8,40	11,71	8,32
12.1	0,639	20,58	10,29	11,68	10,19
12.2	0,643	24,46	12,16	11,29	11,90
12.3	0,641	19,18	9,59	11,24	9,37
12.4	0,642	22,82	11,38	11,51	11,21
12.5	0,640	31,43	15,65	11,24	15,29
12.6	0,641	23,81	11,87	11,37	11,65
15.1	0,637	30,79	15,49	11,72	15,36
15.2	0,636	29,17	14,64	11,34	14,35

*Neste trabalho considerou-se que 1 kgf = 10 N.

Continuação da Tabela 23

Corpo de prova	d (g/cm³)	Ruptura (kN*)	fv0 (MPa)	U (%)	fv0 12% (MPa)
15.3	0,640	28,86	14,50	11,07	14,09
15.4	0,648	34,52	17,30	11,31	16,94
15.5	0,640	37,19	18,59	11,11	18,09
15.6	0,634	29,18	14,62	11,41	14,36
17.1	0,508	20,08	10,04	11,04	9,75
17.2	0,509	22,83	11,43	14,22	12,19
17.3	0,505	23,19	11,59	11,58	11,45
17.4	0,503	19,44	9,70	11,57	9,58
17.5	0,502	25,48	12,72	10,94	12,31
17.6	0,501	23,51	11,77	11,44	11,57
3.1	0,618	20,00	10,02	11,79	9,96
3.2	0,621	19,81	9,90	11,86	9,86
3.3	0,618	20,35	10,24	11,76	10,17
3.4	0,600	20,38	10,19	12,33	10,29
3.5	0,590	20,19	10,15	11,82	10,09
3.6	0,566	21,08	10,53	12,11	10,56
5.1	0,707	22,06	10,98	11,68	10,88
5.2	0,706	19,12	9,52	11,39	9,35
5.3	0,715	22,27	11,06	11,35	10,84
5.4	0,718	20,45	10,13	13,27	10,52
5.5	0,722	22,01	10,96	11,68	10,86
5.6	0,717	26,70	13,28	11,95	13,26
14.1	0,669	31,92	15,80	11,81	15,71
14.2	0,659	28,02	13,87	11,60	13,70
14.3	0,654	30,17	14,95	11,42	14,69
14.4	0,655	22,59	11,18	11,41	10,98
14.5	0,655	29,44	14,59	11,74	14,48
14.6	0,651	24,49	12,09	11,41	11,88
16.1	0,618	27,24	13,55	11,62	13,40
16.2	0,620	24,39	12,21	11,59	12,06
16.3	0,618	22,27	11,05	11,06	10,74
16.4	0,623	28,97	14,43	11,25	14,11
16.5	0,635	35,13	17,46	11,48	17,18
16.6	0,642	27,02	13,50	11,16	13,16
19.1	0,498	19,94	9,94	11,63	9,83
19.2	0,500	22,38	11,13	11,11	10,83
19.3	0,500	24,73	12,30	11,98	12,29
19.4	0,503	21,59	10,75	11,52	10,60
19.5	0,507	25,76	12,86	10,90	12,44
19.6	0,510	26,63	13,23	11,01	12,84

*Neste trabalho considerou-se que 1 kgf = 10 N.

Tabela 25 - Resultados do ensaio de cisalhamento à compressão de juntas coladas com adesivo de mamona

Corpo de prova	d (g/cm³)	Ruptura (kN*)	fv0 (MPa)	U (%)	fv0 12% (MPa)
1.1	0,493	23,95	11,99	11,30	11,74
1.2	0,491	18,53	9,36	10,53	8,94
1.3	0,510	22,33	11,28	11,70	11,17
1.4	0,498	24,48	12,36	11,63	12,23
1.5	0,501	21,18	10,72	11,24	10,48
1.6	0,497	24,47	12,39	12,00	12,39
1.7	0,491	23,05	11,61	10,50	11,09
1.8	0,494	23,71	11,97	10,87	11,57
2.1	0,497	28,44	14,33	10,58	13,72
2.2	0,497	22,06	11,17	12,43	11,31
2.3	0,493	23,78	12,10	11,48	11,91
2.4	0,495	21,73	10,89	11,64	10,77
2.5	0,501	26,22	13,21	10,86	12,76
2.6	0,512	26,98	13,49	10,99	13,08
2.7	0,513	24,83	12,57	11,24	12,28
2.8	0,507	24,22	12,26	11,11	11,94
3.1	0,507	27,12	13,71	11,41	13,47
3.2	0,499	25,21	12,68	10,93	12,27
3.3	0,499	24,71	12,54	11,11	12,21
3.4	0,499	26,45	13,27	10,93	12,85
3.5	0,498	24,63	12,32	10,56	11,78
3.6	0,503	26,67	13,35	11,58	13,18
3.7	0,510	23,26	11,69	11,11	11,38
3.8	0,509	25,54	12,92	11,70	12,80
4.1	0,625	26,66	13,38	11,16	13,04
4.2	0,628	29,02	14,66	11,26	14,33
4.3	0,635	29,7	14,96	11,74	14,85
4.4	0,650	26,14	13,27	11,60	13,11
4.5	0,634	30,87	15,67	11,27	15,33
4.6	0,641	26,29	13,28	11,26	12,98
4.7	0,642	21,27	10,70	10,78	10,31
4.8	0,639	19,35	9,75	11,79	9,69
5.1	0,364	21,11	10,62	10,83	10,25
5.2	0,356	20,6	10,40	11,48	10,24
5.3	0,356	23,77	11,99	11,21	11,70
5.4	0,355	20,54	10,32	10,00	9,70
5.5	0,358	18,12	9,15	11,45	9,00
5.6	0,357	17,84	8,94	10,24	8,47
5.7	0,357	18,41	9,27	11,20	9,05
5.8	0,358	22,58	11,35	10,77	10,93

*Neste trabalho considerou-se que 1 kgf = 10 N.

Tabela 26 - Resultados do ensaio de cisalhamento de juntas coladas com adesivo PUR

Corpo de prova	d (g/cm ³)	Ruptura (kN*)	fv0 (MPa)	U (%)	fv0 12% (MPa)
2.0	0,583	26,81	13,67	12,90	14,04
2.1	0,572	23,07	11,77	12,69	12,01
2.2	0,573	16,99	8,65	13,07	8,92
2.3	0,580	17,82	9,11	12,94	9,37
2.4	0,578	16,92	8,56	12,38	8,66
2.5	0,593	18,28	9,30	12,98	9,58
2.6	0,596	22,25	11,27	13,51	11,79
2.7	0,589	24,8	12,71	13,45	13,27
3.0	0,534	25,82	13,24	12,57	13,46
3.1	0,533	22,17	11,34	12,36	11,47
3.2	0,530	24,47	12,47	12,69	12,73
3.3	0,559	19,27	9,80	12,94	10,08
3.4	0,555	27,65	14,07	12,86	14,43
3.5	0,540	20,11	10,21	12,70	10,42
3.6	0,537	19,77	10,07	13,09	10,40
3.7	0,527	22,45	11,43	13,11	11,82
6.0	0,556	20,74	10,59	12,63	10,78
6.1	0,566	20,98	10,68	12,44	10,82
6.2	0,555	22,5	11,46	13,57	12,00
6.3	0,557	19,28	9,82	13,24	10,19
6.4	0,552	21,96	11,14	12,69	11,37
6.5	0,549	18,91	9,64	13,33	10,03
6.6	0,558	14,89	7,58	12,87	7,78
6.7	0,580	17,14	8,72	13,20	9,03
8.0	0,370	20,59	10,68	12,41	10,81
8.1	0,375	26,62	13,70	13,33	14,25
8.2	0,384	26,18	13,39	13,71	14,07
8.3	0,381	21,41	10,95	13,76	11,53
8.4	0,374	19,47	9,92	12,42	10,05
8.5	0,379	18,36	9,30	12,61	9,47
8.6	0,381	25,5	12,97	13,16	13,42
8.7	0,380	19,75	10,08	13,07	10,40
9.0	0,698	19,71	10,08	12,55	10,25
9.1	0,700	22,5	11,48	13,10	11,86
9.2	0,716	19,66	10,04	13,44	10,47
9.3	0,704	25,1	12,82	12,93	13,18
9.4	0,704	17,9	9,13	12,45	9,25
9.5	0,704	19,21	9,80	12,85	10,05
9.6	0,706	20,96	10,72	12,35	10,83
9.7	0,707	20,29	10,38	12,66	10,58

*Neste trabalho considerou-se que 1 kgf = 10 N.

Tabela 27 - Resultados do ensaio de cisalhamento de juntas coladas com adesivo epóxi

Corpo de prova	d (g/cm ³)	Ruptura (kN*)	fv0 (MPa)	U (%)	fv0 12% (MPa)
1.0	0,534	18,65	9,55	12,63	9,73
1.1	0,529	23,24	11,85	13,11	12,24
1.2	0,532	17,31	8,79	12,95	9,05
1.3	0,534	20,44	10,43	12,98	10,74
1.4	0,549	18,96	9,88	12,56	10,05
1.5	0,569	18,27	9,28	13,40	9,67
1.6	0,562	21,53	10,95	13,17	11,34
1.7	0,552	14,11	7,21	13,33	7,50
4.0	0,588	24,08	12,27	13,08	12,67
4.1	0,592	15,36	7,82	13,46	8,16
4.2	0,571	14,34	7,33	13,00	7,55
4.3	0,566	11,11	5,68	13,37	5,91
4.4	0,563	15,57	7,92	13,43	8,26
4.5	0,568	23,75	12,07	12,75	12,34
4.6	0,598	24,47	12,43	13,36	12,94
4.7	0,567	12,82	6,52	13,53	6,82
5.0	0,593	29,87	15,12	13,08	15,61
5.1	0,588	28,44	14,49	12,79	14,83
5.2	0,586	14,71	7,48	13,68	7,86
5.3	0,578	12,62	6,44	12,21	6,48
5.4	0,578	19,38	9,88	13,21	10,24
5.5	0,581	25,99	13,24	12,79	13,55
5.6	0,604	28,65	14,59	13,02	15,04
5.7	0,571	21,46	10,96	13,18	11,35
7.0	0,379	15,51	7,96	12,60	8,10
7.1	0,372	22,17	11,37	12,80	11,65
7.2	0,375	20,21	10,35	12,80	10,60
7.3	0,378	18,37	9,47	13,18	9,81
7.4	0,379	17,64	9,03	13,87	9,53
7.5	0,381	21,48	10,99	12,23	11,07
7.6	0,384	18,95	9,68	13,24	10,04
7.7	0,380	17,28	8,84	13,77	9,31
10.0	0,706	19,68	10,04	13,01	10,34
10.1	0,691	28,50	14,53	13,08	15,00
10.2	0,703	28,03	14,28	13,45	14,90
10.3	0,693	24,52	12,40	13,03	12,78
10.4	0,687	22,94	11,66	12,34	11,78
10.5	0,686	15,97	8,10	12,45	8,21
10.6	0,693	24,68	12,55	13,03	12,93
10.7	0,694	19,54	9,95	13,03	10,25

*Neste trabalho considerou-se que 1 kgf = 10 N.

APÊNDICE B

Análise estatística dos ensaios preliminares da resistência de juntas coladas com adesivo PUR e epóxi, e ensaio de flexão das vigas.

Tabela 28 - Análise de variância das juntas coladas com adesivo PUR

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr > Fc
Pressão	1	606	606,46	1,0825	0,29963
Consumo	2	358	179,25	0,3199	0,72664
Pressão*Consumo	2	2383	1191,25	2,1263	0,22459
Resíduo	174	94682	560,25		
Total	179	98029			
CV (%)	17,35				
Média geral	13,64		Número de observações	180	

Tabela 29 - Resultado do teste Tukey para variável independente Pressão

Fatores	Médias
7	138,25 a
10	134,57 a

Tratamentos seguidos de mesma letra não diferem significativamente pelo Teste Tukey à 5% de significância.

Tabela 30 - Resultado do teste Tukey para variável independente Consumo

Fatores	Médias
150	138,39 a
250	135,60 a
200	135,23 a

Tratamentos seguidos de mesma letra não diferem significativamente pelo Teste Tukey à 5% de significância.

Tabela 31 - Análise de variância das juntas coladas com adesivo epóxi

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr > Fc
Pressão	1	229	3	0,4106	0,52295
Consumo	1	2480	4	4,452	0,03701*
Pressão*Consumo	1	2243	2	4,0266	0,04711*
Resíduo	116	64623	5		
Total	119	69575	1		
CV (%)	20,07		Número de		120
Média geral	11,75		observações		

Tabela 32 - Análise de variância do desdobramento da pressão dentro dos níveis de consumo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr.Fc
Consumo	1	2480,2	2480,2	4,4520	0,037
Pressão: Consumo 300	1	519,67	519,67	0,9328	0,3361
Pressão: Consumo 500	1	1952,25	1952,25	3,5043	0,0637
Resíduo	116	64622,9	557,09		
Total	119	69575,02	584,66		
Média geral	11,75		Número de		120
			observações		

Tabela 33 - Resultado do desdobramento da pressão dentro do nível 500 de consumo

Fatores	Médias
10	12,50 a
7	11,91 a

Tratamentos seguidos de mesma letra não diferem significativamente pelo Teste Tukey à 5% de significância.

Tabela 34 - Resultado do desdobramento da pressão dentro do nível 500 de consumo

Fatores	Médias
10	10,73 a
7	11,87 a

Tratamentos seguidos de mesma letra não diferem significativamente pelo Teste Tukey à 5% de significância.

Tabela 35 - Análise de variância do desdobramento do consumo dentro dos níveis de pressão

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr.Fc
Consumo	1	228,72	228,72	0,4106	0,5229
Consumo: Pressão 10	1	4720,43	4720,43	8,47	0,0043
Consumo: Pressão 7	1	2,97	2,97	0,053	0,9419
Resíduo	116	64622,9	557,09		
Total	119	69575,02	584,66		
Média geral	11,75		Número de observações	120	

Tabela 36 - Resultado do desdobramento do consumo dentro do nível 10 de pressão

Fatores	Médias
300	12,50 a
500	10,73 b

Tratamentos seguidos de mesma letra não diferem significativamente pelo Teste Tukey à 5% de significância.

Tabela 37 - Resultado do desdobramento do consumo dentro do nível 7 de pressão

Fatores	Médias
300	12,50 a
500	10,73 b

Tratamentos seguidos de mesma letra não diferem significativamente pelo Teste Tukey à 5% de significância.

Tabela 38 - Análise de variância da resistência apresentadas pelas vigas

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr > Fc
Adesivo	2	58,26	29,13	1,2920	0,29910
Resíduo	18	405,95	22,55		
Total	20	464,21			
CV (%)	25,59		Número de observações	21	
Média geral	18,55				

Tabela 39 - Análise de variância dos carregamentos para flechas limite L/200

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr > Fc
Adesivo	2	1,52	0,76	0,6740	0,52230
Resíduo	18	20,35	1,13		
Total	20	21,87			
CV (%)		17,61			
Média geral		6,04		Número de observações	21

Tabela 40 - Análise de variância dos carregamentos para flechas limite L/350

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr > Fc
Adesivo	2	0,03	0,015	0,0460	0,95540
Resíduo	18	6,08	0,337		
Total	20	6,11			
CV (%)		25,59			
Média geral		18,55		Número de observações	21