

DESIRÊ CORAÇA POSSA

CONSTRUÇÃO E ENSAIO DE PÓRTICOS COM TIRANTE EM  
MADEIRA LAMINADA COLADA

CASCADEL  
PARANÁ - BRASIL  
FEVEREIRO - 2021

DESIRE CORAÇA POSSA

**CONSTRUÇÃO E ENSAIO DE PÓRTICOS COM TIRANTE EM  
MADEIRA LAMINADA COLADA**

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.<sup>o</sup> Dr.<sup>o</sup> Alfredo Petrauski

CASCADEL  
PARANÁ - BRASIL  
FEVEREIRO - 2021

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

Possa, Desirè Coraça

Construção e ensaio de pórticos com tirante em madeira laminada colada / Desirè Coraça Possa; orientador(a), Alfredo Petrauski, 2021.

91 f.


Dissertação (mestrado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, 2021.

1. Estruturas de madeira. 2. Pórtico. 3. Madeira laminada colada. I. Petrauski, Alfredo. II. Título.

## **DESIRÊ CORAÇA POSSA**

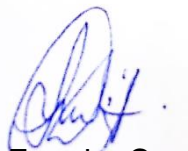
Construção e ensaio de pórticos com tirante em madeira laminada colada

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 Biocombustíveis, APROVADA pela seguinte banca examinadora:



Orientador - Alfredo Petrauski

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



Sandra Maria Ferreira Couri Petrauski

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



Ricardo Lessa Azevedo

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



Gustavo Savaris

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)



Rodrigo Aparecido Jordan

Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD)

Cascavel, 25 de fevereiro de 2021

*“Dedico esta dissertação à minha família,  
principalmente aos meus pais Carla e  
Degilmar, por todo carinho e educação, e  
à minha avó Eugênia.”.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Carla e Degilmar, por todo apoio e dedicação ao longo da minha vida. Exemplos de caráter e integridade, sempre fazendo todo o possível para ver a minha felicidade e das minhas irmãs. Espero poder um dia retribuir todo o esforço depositado em mim e ser motivo de orgulho para vocês.

Às minhas irmãs, Débora e Denise, que sempre estiveram ao meu lado quando eu precisei, minhas companheiras de vida. Principalmente à Débora, que está comigo desde o útero, com quem eu aprendi a dividir e a dar valor às amizades.

À toda minha família, em especial a minha avó Eugênia, pessoa de coração enorme, que nos dias tristes orou, e nos felizes agradeceu.

Ao meu querido orientador Alfredo Petrauski, que não mediu esforços para me auxiliar nesta caminhada, e que sempre acreditou em mim. Obrigada pelos ensinamentos, paciência, amizade e exigência. Minha eterna gratidão ao senhor por escolher me orientar, e por contribuir com meu crescimento profissional e pessoal.

Aos meus colegas de laboratório, Padilha e Karina, que tive o prazer de conhecer e criar amizade em decorrência deste projeto. Sem vocês, a execução deste trabalho não seria possível. Obrigada pelos momentos de descontração, e saibam que sempre poderão contar comigo.

A todos os meus amigos que de alguma forma colaboraram e me incentivaram nesta trajetória. Em especial, Beatriz, Felipe Neves, Felipe Ribeiro, Heloísa, Larissa, Lukas, Natália e Patrick, minha família de coração, por todas as risadas, desabafos e os momentos incríveis que passei ao lado de vocês.

Aos funcionários do LEME, Maxer e Matheus, pela disponibilidade, amizade e valiosa ajuda no decorrer de todo o trabalho.

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 – Percentual da área de árvores plantadas por espécie em 2018. ....	5
Figura 2 – Participação dos valores da produção na silvicultura em 2018. ....	6
Figura 3 – Templo budista Horyuji, Japão. ....	9
Figura 4 – Elementos de uma peça de MLC de laminação horizontal. ....	11
Figura 5 – Laminação horizontal sem emendas transversais (a) e com emendas transversais (b), e laminação vertical sem emendas transversais (c) e com emendas transversais (d).....	12
Figura 6 – Emendas longitudinais biselada (a), biselada com dente (b), de topo (c), biselada serrilhada (d) e dentada (e).....	13
Figura 7 – Desenho representativo das forças de adesão e coesão entre substrato e adesivo.....	15
Figura 8 – Pórticos: (a) pórtico biarticulado treliçado; (b) pórtico biarticulado de alma de seção I; (c) e (d) pórticos triarticulados em madeira laminada e colada.....	19
Figura 9 – Pórtico com tirante. ....	20
Figura 10 – Aplicação do adesivo na lâmina de madeira, a esquerda e prensagem dos corpos de prova a direita. ....	22
Figura 11 – Armazenagem das peças em local seco e coberto. ....	24
Figura 12 – Desempenadeira (a), serra circular (b) e plaina desengrossadeira (c)...	25
Figura 13 – Corpos de prova para cisalhamento, compressão e módulo de elasticidade. ....	26
Figura 14 – Execução dos ensaios de cisalhamento (a), compressão (b) e flexão (c). ....	27
Figura 15 – Corpo de prova para o ensaio de resistência de juntas coladas, dimensões em mm. ....	28
Figura 16 – Corpos de prova para o ensaio de resistência de juntas coladas com as fibras paralelas (acima) e com as fibras perpendiculares (abaixo).....	29
Figura 17 – Ensaio de cisalhamento na torção com o aparato na Máquina Universal de Ensaios.....	30
Figura 18 – Corpo de prova para ensaio da resistência ao cisalhamento na torção.	31
Figura 19 – Confeção dos corpos de prova para o ensaio da resistência ao cisalhamento na torção (a), corpos de prova com as dimensões finais com as juntas coladas com as fibras paralelas (b) e com as fibras perpendiculares (c). ....	31

Figura 20 – Geometria adotada pela Cooperativa LAR para aviários de postura, dimensões em cm. ....	32
Figura 21 – Geometria adotada para diminuição da inércia no programa Ftool, dimensão em cm. ....	33
Figura 22 – Esquema da ligação rígida do pórtico, medidas em centímetros. ....	34
Figura 23 – Sistemas de coordenadas global adotado para o projeto. ....	36
Figura 24 – Esquema de análise da ligação colada. ....	39
Figura 25 – Excentricidade da posição do tirante, dimensões em cm.....	40
Figura 26 – Configuração geral do pórtico, dimensões em cm. ....	41
Figura 27 - Configuração geométrica da viga de cobertura do pórtico, dimensões em cm. ....	41
Figura 28 – Gabarito em madeira para auxiliar na redução de inércia das peças, a esquerda, e lâminas após processamento final e prontas para a colagem, a direita. ....	43
Figura 29 – Gabarito de prensagem.....	43
Figura 30 – Aplicação do adesivo nas lâminas. ....	44
Figura 31 – Torquímetro eletrônico, à esquerda, e aplicação da pressão com a sua utilização, à direita.....	45
Figura 32 – Quadro de reações com os aparatos. ....	46
Figura 33 – Pontos de aplicação de carga. ....	47
Figura 34 – Disposição dos aparatos para o ensaio. ....	48
Figura 35 - Histograma: quantidade de tábuas por densidade aparente.....	49
Figura 36 – Boxplot: densidade aparente do lote de madeira. ....	49
Figura 37 – Carga de projeto do pórtico. ....	54
Figura 38 – Seção transversal e tipologia dos apoios adotados para o pilar. ....	55
Figura 39 – Lâminas resistentes do pilar que compõem a ligação rígida. ....	59
Figura 40 - Lâminas resistentes da viga que compõem a ligação rígida. ....	60
Figura 41 – Detalhes de ruptura do pórtico P1, nó D e nó F, respectivamente. ....	65
Figura 42 – Detalhes de ruptura do pórtico P2, nó D e nó F, respectivamente. ....	65
Figura 43 – Detalhes da ruptura do pórtico P3, vista frontal e em perspectiva do nó F e a vista frontal do nó E, respectivamente. ....	66
Figura 44 – Detalhes da ruptura do pórtico P4, vista frontal do nó D e vista frontal do nó F, respectivamente. ....	66



Figura 45 – Diagrama de resistência x densidade aparente dos pórticos com tirante. .....	67
Figura 46 – Nomenclatura dos relógios comparadores.....	68
Figura 47 – Comparação entre o deslocamento estimado pelo programa Ftool e as médias dos deslocamentos obtidos pelas estruturas para um carregamento de 12 kN, em milímetros. ....	70
Figura 48 – Diagrama carga x deslocamento apresentado pelo relógio 1, cumeeira. .....	71
Figura 49 – Diagrama carga x deslocamento apresentado pelos relógios 2 e 3, pilares.....	71
Figura 50 – Diagrama de carga x deslocamento das médias apresentadas pelo relógio da cumeeira para estruturas com tirante e sem tirante (Stringari <i>et. al.</i> , 2020; Filippini, 2020). ....	73
Figura 51 – Diagrama de momento fletor para a carga de 46,5 kN, em N.m. ....	90
Figura 52 – Diagrama de esforço cortante para a carga de 46,5 kN, em N. ....	91
Figura 53 – Diagrama de esforço normal para a carga de 46,5 kN, em N. ....	91

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens do uso estrutural da madeira.....	7
Tabela 2 – Composição de ácidos graxos de óleos vegetais que podem ser usados na confecção de poliuretanos.....	17
Tabela 3 – Informações referente às condições ambientais do dia de colagem dos pórticos.....	44
Tabela 4 – Resultados da caracterização física e mecânica do <i>Pinus sp.</i> .....	51
Tabela 5 - Resultados da resistência ao cisalhamento na compressão e na torção de juntas coladas .....	52
Tabela 6 – Valores de resistência das estruturas.....	63
Tabela 7 – Valores de deslocamentos médios (mm) para a carga de 12 kN .....	68
Tabela 8 – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade na compressão .....	82
Tabela 9 – Resultados do ensaio de compressão paralela as fibras .....	83
Tabela 10 – Resultados do ensaio de cisalhamento paralela as fibras.....	84
Tabela 11 – Resultados do ensaio de cisalhamento à compressão de juntas coladas com as fibras paralelas entre si.....	85
Tabela 12 – Resultados do ensaio de cisalhamento à compressão de juntas coladas com as fibras perpendiculares entre si.....	86
Tabela 13 – Resultados do ensaio de cisalhamento à torção de juntas coladas com as fibras paralelas entre si .....	87
Tabela 14 – Resultados do ensaio de cisalhamento à torção de juntas coladas com as fibras perpendiculares entre si.....	88
Tabela 15 – Resultados do ensaio de tração na flexão.....	88
Tabela 16 – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade na flexão .....	89

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Correção do valor de resistência para a umidade padrão de 12%.....	23
Equação 2 – Correção do valor de rigidez para a umidade padrão de 12%. ....	23
Equação 3 – Resistência da madeira à flexão .....	26
Equação 4 – Módulo de elasticidade à flexão .....	26
Equação 5 – Tensão máxima ao cisalhamento na torção de juntas coladas. ....	30
Equação 6 – Condição de segurança para flexão simples.....	35
Equação 7 – Tensão máxima do/ao momento fletor. ....	35
Equação 8 – Verificação ao cisalhamento paralelo às fibras. ....	35
Equação 9 – Índice de esbeltez. ....	35
Equação 10 – Verificação peças sob compressão.....	37
Equação 11 – Tensão máxima de cálculo relativo à força normal. ....	37
Equação 12 – Verificação à flexo-compressão com ênfase no eixo x.....	37
Equação 13 - Verificação à flexo-compressão com ênfase no eixo z. ....	37
Equação 14 – Verificação para estado limite de utilização. ....	38
Equação 15 – Verificação da ligação colada.....	39
Equação 16 – Raio mínimo necessário para combater o momento torçor atuante...	40
Equação 17 – Excentricidade inicial.....	55
Equação 18 – Excentricidade de primeira ordem para direção x .....	56
Equação 19 – Estimativa para o máximo momento fletor atuante. ....	56
Equação 20 – Carga crítica para direção x .....	56
Equação 21 – Excentricidade de primeira ordem para a direção z .....	57
Equação 22 – Carga crítica para a direção z .....	57

POSSA, Desirè Coraça; Universidade Estadual do Oeste do Paraná, fevereiro de 2021. **Construção e ensaio de pórticos com tirante em madeira laminada colada.** Professor orientador Dr. Alfredo Petrauski.

## RESUMO

A indústria da construção civil apresenta um grande consumo de recursos naturais, gerando muitos resíduos e sendo responsável por grande parte dos impactos ambientais mundiais. O emprego da madeira em estruturas surge como um material ambientalmente correto no setor da construção civil e agrícola por ser um material construtivo/estrutural renovável e seu uso de forma permanente contribui com a redução das emissões de carbono na atmosfera. Com isso, o presente estudo objetivou executar e ensaiar pórticos com tirantes, feitos em madeira laminada colada e em escala reduzida, de modo a avaliar seu desempenho estrutural. Os materiais que foram utilizados são a madeira de *Pinus sp.* e o adesivo bicomponente à base de óleos vegetais na proporção de 1:1,5 de isocianato e poliol, respectivamente. Foi realizada a caracterização da madeira para se obter as suas propriedades físicas e mecânicas. Para a execução das unidades adotou-se geometria similar à utilizadas em pesquisas anteriores desenvolvidas no LATEM. Foi utilizada como solução uma cobertura em telha cerâmica francesa, empregando o tirante devido a massa significativa que a este material impõe à estrutura. Foram confeccionados quatro pórticos com tirantes de barras rosqueadas de 3/8", com vão livre de 1,9 metros e altura de pilar de 1,83 metros. As estruturas exibiram desempenho satisfatório quanto a resistência e a rigidez. Quanto à resistência, as estruturas tiveram sua ruptura para uma carga média de 63,6 kN, aproximadamente 1,37 vezes maior que a carga de verificação estabelecida. Quanto à rigidez, as estruturas exibiram deslocamentos menores comparando-se às estruturas sem o tirante, atingindo os limites normativos para carregamentos totais da ordem de 30 kN. Em relação aos deslocamentos teóricos, os pórticos apresentaram valores significativamente maiores. Ainda, obteve-se correlação positiva entre a densidade aparente da madeira dos pórticos com sua resistência, exibindo coeficiente de correlação da ordem de 0,95. Desta forma, as evidências obtidas indicam que o emprego do tirante nas estruturas promoveu a melhoria do desempenho mecânico quanto à resistência e rigidez.

**PALAVRAS-CHAVE:** estruturas de madeira, pórtico, madeira laminada colada; adesivo.

"O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001."

POSSA, Desirè Coraça; State University of West Paraná, February 2021.  
**Construction and testing of frames with glued laminated timber with tie-rod.**  
Advisor Professor Dr. Alfredo Petrauski.

## ABSTRACT

The construction industry consumes a large amount of natural resources, generating a lot of waste and being responsible for a large part of the world's environmental impacts. The use of wood in structures emerges as an environmentally friendly material in the construction and agricultural sector because it is a renewable constructive/structural material and its permanent use contributes to the reduction of carbon emissions in the atmosphere. The present study aimed to execute and test frames with ties, made of glued laminated timber and in a reduced scale, in order to evaluate their structural performance. The materials that were used are *Pinus sp.* wood and vegetable oil-based bicomponent adhesive in a 1:1.5 ratio of isocyanate and polyol, respectively. The characterization of the wood was carried out to obtain its physical and mechanical properties. For the execution of the units we adopted geometry similar to that used in previous research developed in LATEM. A French ceramic tile roof was used as a solution, employing the tie-rod due to the significant mass that this material imposes on the structure. Four frames were built with 3/8" threaded bar ties, with a free span of 1.9 meters and column height of 1.83 meters. The structures exhibited satisfactory performance regarding strength and stiffness. As for strength, the structures ruptured for an average load of 63.6 kN, approximately 1.37 times greater than the established verification load. As for stiffness, the structures exhibited smaller displacements when compared to the structures without the tie, reaching the normative limits for total loads of the order of 30 kN. In relation to the theoretical displacements, the frames presented significantly higher values. Furthermore, a positive correlation was obtained between the bulk density of the timber of the frames and their strength, exhibiting a correlation coefficient of around 0.95. Thus, the evidence obtained indicates that the use of the tension tie in the structures promoted an improvement in the mechanical performance in terms of strength and stiffness.

**KEYWORDS:** wood structures, frames, glued laminated timber, adhesives.

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

## ÍNDICE

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS .....	2
1.1.1 Objetivo geral .....	2
1.1.2 Objetivos específicos.....	2
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
2.1 PRODUÇÃO FLORESTAL E MADEIREIRA NO BRASIL .....	4
2.2 USO DA MADEIRA PARA FINS CONSTRUTIVOS .....	7
2.3 MADEIRA LAMINADA COLADA .....	10
2.4 ADESIVOS .....	14
2.4.1 Adesivos à base de óleos vegetais .....	17
2.5 PÓRTICOS ESTRUTURAIS .....	18
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>21</b>
3.1 CLASSIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS PEÇAS DE MADEIRA.....	22
3.1.1 Densidade aparente .....	23
3.1.2 Caracterização da madeira .....	24
3.1.3 Resistência de juntas coladas .....	27
3.1.4 Resistência ao cisalhamento na torção de juntas coladas .....	29
3.2. PÓRTICO COM TIRANTE .....	32
3.2.1 Redução da inércia .....	33
3.2.2 Verificação da estrutura para o Estado Limite Último.....	34
3.2.3 Verificação da estrutura para o Estado Limite de Utilização .....	38
3.2.4 Verificação da ligação colada.....	38
3.2.5 Tirante .....	40
3.2.6 Geometria do pórtico com tirante .....	41
3.3 EXECUÇÃO DOS PÓRTICOS.....	42
3.5 ENSAIO DOS PÓRTICOS .....	45
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>49</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS PEÇAS DE MADEIRA.....	49
4.1.1 Densidade aparente .....	49
4.1.2 Caracterização da madeira .....	50
4.1.3 Resistência ao cisalhamento de juntas coladas à compressão e à torção.....	52
4.3 VERIFICAÇÃO DO PÓRTICO .....	53

4.3.1 Verificações para o pilar .....	54
4.3.1.1 Verificações associadas à estabilidade. ....	55
4.3.1.2 Verificações associadas à flexo-compressão. ....	58
4.3.2 Verificação da madeira na região da ligação, à flexo-compressão .....	58
4.3.2.1 Lâminas do pilar .....	58
4.3.2.2 Lâminas da viga .....	60
4.3.3 Verificação da ligação colada .....	61
4.3.4 Verificação das lâminas do pilar na ligação, frente ao cisalhamento .....	62
4.3.5 Verificação do tirante.....	62
4.3.6 Verificação para o Estado limite de Serviço. ....	62
4.4 RESULTADOS DA ANÁLISE EXPERIMENTAL DO PÓRTICO .....	63
4.4.1 Resistência apresentada pelas estruturas.....	63
4.4.2 Rigidez apresentada pelas estruturas .....	67
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>74</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>76</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>82</b>
APÊNDICE A.....	82
APÊNDICE B.....	90

## 1 INTRODUÇÃO

A consciência ambiental e o consumo sustentável são fatores que vêm conquistando espaço na sociedade a cada ano. Assim, surge a necessidade de pesquisas nos mais diversos setores acerca da sustentabilidade dos produtos, desde a sua obtenção até o seu uso final, visando o emprego de matérias-primas renováveis e que provoquem menor impacto ao meio ambiente.

Nesse contexto, a indústria da construção civil é uma das principais consumidoras de recursos naturais e geradoras de resíduos, sendo responsável por grande parte dos impactos ambientais mundiais. Segundo a Fundação Dom Cabral (2013), o setor consome 75% de todos os recursos naturais, 44% da energia produzida no país e corresponde por cerca de 40% de todo o resíduo gerado pela atividade humana, além de que a maior parte dos insumos utilizados não são provenientes de fontes renováveis.

Tais impactos ambientais podem ser reduzidos com a adoção de medidas que considerem o verdadeiro impacto de cada material. Assim, a madeira ressurge como um material ambientalmente correto no setor da construção civil, visto que, além de ser o único material construtivo/estrutural renovável, o uso da madeira de forma permanente reduz as emissões de carbono na atmosfera, devido à fixação de carbono (DI MAURO, 2013).

Pensando desde a extração até o seu emprego final, a madeira gera menos resíduos sólidos, produz menos gases do efeito estufa, requer menos energia para o seu beneficiamento e apresenta menor poluição da água e do ar, quando comparada com o aço e o concreto (CWC, 2002). Além do impacto ambiental positivo, a utilização da madeira na construção civil promove o crescimento do setor madeireiro, principalmente de florestas plantadas, contribuindo na preservação de florestas nativas.

Embora a madeira seja um excelente material estrutural, sua utilização ainda sofre muito preconceito no Brasil, principalmente pela falta de conhecimento específico a seu respeito. Já em países da Europa e América do Norte, a cultura da madeira para fins estruturais é mais difundida, possuindo amplo domínio em técnicas construtivas com o material (PFEIL e PFEIL, 2003).



Uma das técnicas utilizadas nesses países é a Madeira Laminada Colada (MLC) que possibilita a execução de peças com maiores dimensões e em diversas geometrias, solucionando as limitações geométricas impostas pela madeira serrada, sendo recomendada para qualquer tipologia construtiva.

Estudos recentes sobre a utilização da técnica de madeira laminada colada em pórticos estruturais foram feitos por autores como Couri Petrauski (2012), Stringari *et al.* (2020) e Filippini (2020). Embora tais pesquisas obtiveram resultados satisfatórios quanto ao seu desempenho, ainda há espaço para o estudo e desenvolvimento de outras tipologias estruturais, bem como variações dos estudos desenvolvidos, na procura de soluções seguras e econômicas.

Tratando-se de pórticos estruturais para emprego em aviários de postura, Stringari *et al.* (2020) e Filippini (2020) ensaiaram pórticos considerando o uso da telha de aluzinco que proporciona maior economia, mas apresenta baixo conforto térmico para as aves. Neste sentido passa a ser interessante analisar o comportamento da estrutura utilizando uma telha que proporcione maior bem-estar ao animal. Com isso, o presente estudo objetivou confeccionar e ensaiar pórticos atirantados com cobertura em telha cerâmica, visando avaliar o comportamento estrutural, quanto ao Estado Limite de Serviço, ao Estado Limite Último, e a resistência das ligações coladas.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho estrutural de quatro pórticos atirantados, em escala reduzida, produzidos em MLC de *Pinus sp.*

### 1.1.2 Objetivos específicos

Compreenderam objetivos específicos:

- Caracterizar a madeira *Pinus sp.*, adquirida no comércio local, bem como de suas propriedades de adesão;
- Construir quatro pórticos em madeira laminada colada, com tirante;

- Ensaiai as estruturas, individualmente, com registro dos deslocamentos e cargas de ruptura das mesmas;
- Avaliar o desempenho estrutural das unidades executadas quanto à resistência última;
- Avaliar o desempenho das unidades quanto ao quesito rigidez;
- Discutir, com base nos resultados, sobre a viabilidade técnica da metodologia empregada na execução deste tipo de estrutura, com destaque para o uso de tirantes.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados conceitos essenciais para facilitar o entendimento e a importância da utilização de sistemas estruturais em madeira, bem como apresentar construções em pórticos e estudos recentes.

### 2.1 PRODUÇÃO FLORESTAL E MADEIREIRA NO BRASIL

Em 1987, a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento - WCED elaborou o Relatório de Brundtland, em que mencionou formalmente a importância do desenvolvimento sustentável. Este documento concebe o desenvolvimento sustentável como a habilidade de atender às necessidades atuais, sem afetar o suprimento das necessidades das gerações futuras (WCED, 1987).

Desde então, é crescente a preocupação da sociedade com as questões ambientais, como a consciência ambiental, o consumo sustentável e o desejo em adquirir produtos ecológicos. Por isso a sustentabilidade merece atenção dos pesquisadores (AFONSO, 2010; TAMBOSI *et al.*, 2014; MARTENS *et al.*, 2016).

Nesse contexto, a madeira se sobressai a favor da sustentabilidade, pois além de ser uma matéria prima renovável, as madeiras que possuem certificados provêm de plantios, visando a preservação de florestas nativas. Segundo Bissoli-Dalvi *et al.* (2017), a madeira é amplamente utilizada em diversos âmbitos industriais, inclusive na construção civil, por suas características mecânicas e estéticas.

Gandini (2016) cita que o setor de florestas plantadas brasileiro se caracteriza pela sua grande diversidade, contribuindo com uma importante parcela na geração de produtos, tributos, emprego e bem estar, tanto para produtos madeireiros quanto para produtos não madeireiros. Além disso, a produção florestal auxilia na conservação e preservação dos recursos naturais, ressaltando a regulação do solo, fixação de carbono e qualidade do clima e do ar.

As práticas florestais vêm conquistando espaço no Brasil, sendo responsáveis por 5,2% das exportações brasileiras, gerando mais de 3,8 milhões de empregos diretos e indiretos, além de serem responsáveis por R\$ 12,8 bilhões em tributos federais, sendo assim de suma importância para o país (IBÁ, 2020).

Em 2018, o Brasil tinha uma área total de 7,83 milhões de hectares de árvores plantadas, sendo o eucalipto o principal responsável por esse valor, com 5,7 milhões de hectares, seguido pelo pinus, com 1,6 milhão de hectares (Figura 1). Os principais produtores de eucalipto estão localizados nos estados de Minas Gerais, São Paulo e Mato Grosso do Sul, e os plantios de pinus se concentram no Paraná e em Santa Catarina.

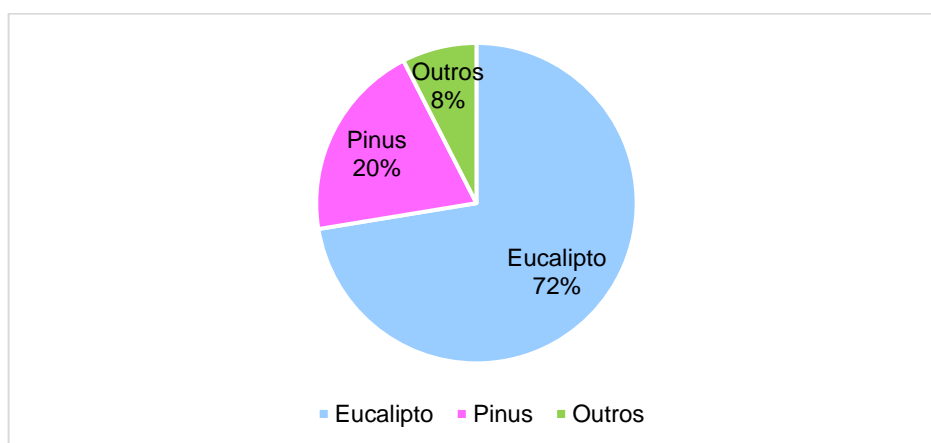


Figura 1 – Percentual da área de árvores plantadas por espécie em 2018.

Fonte: Ibá e Pöyry, 2019.

Segundo dados da Organizações das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 2019), no ano de 2017, o território mundial destinado à Silvicultura era de aproximadamente 4 bilhões de hectares, considerando florestas nativas e plantadas, sendo que o Brasil contribui com 12,3% deste território com 0,49 bilhões de hectares, ficando atrás apenas da Rússia que possui um território de 0,814 bilhões de hectares destinados à silvicultura.

Em 2018, o valor da produção da silvicultura no Brasil chegou em R\$ 16,29 bilhões, registrando um crescimento pelo terceiro ano consecutivo. Conforme ilustrado na Figura 2, o maior responsável por esse valor foi a madeira em tora, sendo produzido no ano de 2018 um total de 146 milhões de metros cúbicos, e gerando um valor de produção de R\$ 9,69 bilhões. Cerca de 63% de todo volume da madeira em tora é usada na indústria de papel e celulose, e o restante é para outras finalidades (IBGE, 2018).

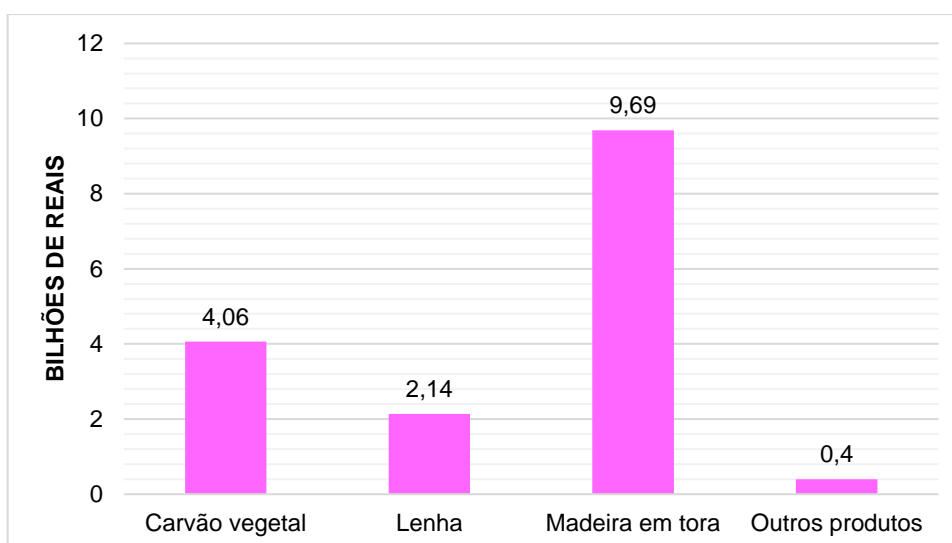


Figura 2 – Participação dos valores da produção na silvicultura em 2018.

Fonte: IBGE, 2018.

O setor de florestas brasileiro é composto pelos produtos florestais madeireiros (PFM) e pelos produtos florestais não madeireiros (PFNM). Segundo o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2020), os PFM são todos aqueles provenientes da madeira e os PFNM são todos os materiais que tem sua extração a partir da floresta, com exceção da madeira, como resina, óleo, sementes, mel, plantas ornamentais, assim como serviços sociais e ambientais.

Um dos PFM que tem sua obtenção a partir do cultivo de florestas, é a madeira serrada que é utilizada há muito tempo pela humanidade, sendo empregada inicialmente em construções de forma rústica, promovendo abrigo e proteção contra a natureza (ALMEIDA et al., 2013).

Com a necessidade de construções sustentáveis, a utilização de materiais renováveis promove o crescimento do setor madeireiro na construção civil, principalmente em florestas plantadas. Pelo fato do Brasil possuir uma grande disponibilidade de madeiras de reflorestamento, é possível ampliar o setor de sistemas construtivos em madeira no país, mas esse crescimento depende de investimentos e de pesquisas que auxiliem a madeira a competir com outros materiais utilizados no mercado construtivo (GOMES, 2018).

## 2.2 USO DA MADEIRA PARA FINS CONSTRUTIVOS

Um dos materiais mais antigos empregados em edificações é a madeira, sendo possível aplicá-la para os mais diversos usos em construções, desde pontes e residências até em edificações em ambientes altamente corrosivos. Mesmo com ótimas qualidades para fins estruturais, a madeira enfrenta um preconceito para a sua utilização, em grande parte por conta da falta de conhecimento adequado a seu respeito e da própria cultura da construção civil brasileira (SOUZA; RODRIGUES; MASCIA, 2008).

O fato do Brasil valorizar estruturas em alvenaria está diretamente ligado à nossa colonização. Como Portugal é desprovida de florestas, utilizava-se a madeira apenas como material de apoio para a construção ou para acabamentos, corroborando para o uso do aço e do concreto. Este fator acabou influenciando a prática nacional (DI MAURO e DEMARZO, 2012).

Quando comparado com outros materiais, a madeira é um ótimo material estrutural por sua alta resistência mecânica e baixa massa específica. Em relação ao aço e o concreto, a relação resistência/densidade para a madeira é três vezes maior que para o aço e dez vezes maior que para o concreto (CALIL JR. e DIAS, 1997). Além disso, a madeira possui resistência mecânica tanto a esforços de tração como a compressão, apresenta resistência a choques e cargas dinâmicas, sendo capaz de absorver impactos que outros materiais dificilmente absorveriam (SOUZA; RODRIGUES; MASCIA, 2008).

A utilização da madeira em estruturas traz vantagens e desvantagens, como a maioria dos materiais estruturais. A Tabela 1 compara as vantagens e desvantagens do emprego de madeiras em estruturas de edificações.

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens do uso estrutural da madeira

Principais vantagens	Possíveis desvantagens
- Renovável e abundante na natureza	- Variação dimensional devido a variação da umidade
- Elevada resistência em relação a sua baixa massa específica	- É combustível, principalmente elementos de pequenas dimensões
- Baixa demanda de energia para produção	- Composição bastante heterogênea e anisotrópica

Tabela 1 - Continuação

Principais vantagens	Possíveis desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Facilidade de trabalho e união de peças</li> <li>- Inerte, até em exposição a ambientes químicos</li> <li>- Excelente isolante térmico e acústico</li> </ul> <p>Pode ser reempregada várias vezes</p> <p>Custo relativamente baixo</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Relativamente suscetível ao ataque de insetos e agentes externos</li> <li>- Por vezes possui formas que limitam sua utilização</li> </ul>

Fonte: Souza, Rodrigues e Mascia, 2008.

Em relação a madeira ser um material inerte, isso deve-se ao fato da grande inércia química que a mesma apresenta, não demonstrando problema de deterioração quando aplicada em meio corrosivo (SZÜCS *et al.*, 2015). Além das vantagens ditas acima, é válido mencionar sua beleza arquitetônica e a fixação do carbono que a utilização da madeira de forma permanente proporciona, reduzindo as emissões de carbono na atmosfera (DI MAURO, 2013).

Tratando-se das desvantagens, é possível contornar alguns dos seus efeitos com a aplicação de tratamentos preservativos, sendo indispensáveis a sua utilização quando expostos a ambientes que auxiliem na proliferação de efeitos que possam prejudicar o uso da estrutura em madeira (SOUZA; RODRIGUES; MASCIA, 2008; BRITO e CALIL JR., 2010).

Sobre a madeira ser um material combustível, vale ressaltar que peças com dimensões maiores apresentam boa resistência ao fogo, tendo um desempenho melhor que muitos materiais, quando expostos a condições severas. Calil Jr. e Dias (1997) explicam que esta propriedade se dá pela camada de carvão, que se forma em volta da peça de madeira e pelo fato da madeira ser uma má condutora de calor, evitando que a temperatura interna aumente de forma excessiva, mantendo parte de sua resistência.

Segundo Mello (2007), a madeira tem uma imagem desfavorável quanto a sua durabilidade devido à negligência e falta de conhecimento sobre o material, e ressalta que a durabilidade de qualquer material construtivo depende de diferentes procedimentos de manutenção e de tecnologias.

Um exemplo de durabilidade do material é o Templo Horyuji (Figura 3), sendo a construção em madeira mais antiga do mundo. O templo foi construído em 607 d.C. e tombado pela UNESCO como patrimônio cultural da humanidade em 1993, tem cerca de 1400 anos de idade, e se encontra em bom estado de conservação.



Figura 3 – Templo budista Horyuji, Japão.

Fonte: Horyuji Temple - 法隆寺, 2020

As principais formas da madeira ser empregada em estruturas é como madeira roliça e madeira serrada. A madeira roliça apresenta um menor grau de processamento, e consiste num aproveitamento total do fuste, enquanto a madeira serrada transforma a madeira cilíndrica em peças quadrangulares ou retangulares, de menor dimensão. Como consequência a madeira serrada gera entre 60% a 70% de resíduos da peça original com o intuito de garantir planicidade às peças (PFEIL e PFEIL, 2003; ZENID, 2009; BRITO e CALIL JR., 2010).

A madeira serrada possui certas limitações referentes a sua geometria. Por esse fato, diversos produtos foram desenvolvidos na Europa e América do Norte visando produzir peças com maiores dimensões com objetivo de ampliar o seu uso, sendo a madeira laminada colada um dos mais importantes produtos estruturais em madeira desenvolvidos nestes países (PFEIL e PFEIL, 2003).



## 2.3 MADEIRA LAMINADA COLADA

A partir do crescente emprego de espécies originárias de reflorestamento, nascem algumas limitações para o uso da madeira como elemento estrutural, como largura e comprimento das peças, que se correlacionam com o diâmetro e altura da árvore (ALBINO, 2009). O emprego da madeira laminada colada (MLC) pode suprir estas limitações, sendo uma opção viável para o aproveitamento racional da madeira. A polivalência da MLC em relação às formas, dimensões e resistência dos elementos estruturais, associada ao aumento de sua longevidade, permitido pelo tratamento preservativo sob pressão, vem expandindo sua empregabilidade em diversos países (FIORELLI, 2005).

Conforme Segundinho *et al.* (2015), o termo Madeira Laminada Colada (MLC) relaciona-se a uma estrutura de madeira em que elementos estruturais são confeccionados a partir da colagem de pequenas peças de madeira. A produção da MLC se faz posicionando as lâminas de madeira de modo paralelo ao eixo da peça, isto é, paralela ao comprimento do elemento estrutural e a colagem é executada nas faces e topos das lâminas de madeira, de maneira a alcançar altura e largura necessárias para o projeto construtivo desejado.

O método do laminado-colado para o emprego de estruturas em madeiras compreende em duas técnicas muito antigas, sendo elas o método da colagem associada ao método de laminação, isto é, da remontagem da madeira a partir de tábuas. A união das duas técnicas, criando a MLC, só foi possível com a chegada de colas de grande resistência. Em 1906, com a vinda da cola de caseína (oriunda do leite), que Otto Hetzer teve a ideia de trocar as ligações metálicas de braçadeiras e parafusos por cola. Assim, conseguiu uma seção mais homogênea e sem a incidência de deslizamentos entre uma lâmina e outra. A MLC foi se desenvolvendo juntamente com as colas, as quais se tornaram cada vez mais eficientes (SZÜCS *et al.*, 2015).

O método de produção dos elementos de MLC é dependente da tecnologia dos adesivos utilizados na técnica de colagem e da espécie a ser utilizada, fazendo com que a combinação perfeita entre esses fatores resulte em um produto final de boa qualidade (ALBINO, 2009; OLIVEIRA, 2018).

Mesmo sendo uma tecnologia surgida no início do século passado, o desenvolvimento do método da MLC foi impulsionado somente nas últimas décadas

podendo ser considerada uma das mais versáteis representantes do desenvolvimento tecnológico da madeira (MELLO, 2007).

Este material estrutural pode ser empregado sob as mais variadas formas como em vigas, pilares, pergolados, coberturas, passarelas, escadas, painéis e em revestimentos diversos, sendo recomendada para qualquer tipologia construtiva, possibilitando diversas composições arquitetônicas e estruturais que as vezes não são possíveis de reproduzir com outros materiais estruturais como o aço e o concreto (MELLO, 2007; ARCHDAILY, 2019).

O processo de confecção da madeira laminada colada possibilita produzir peças estruturais de grandes dimensões e diversas curvaturas. A mesma pode ser produzida manualmente, modo utilizado nas indústrias nacionais, ou mecanizada para peças retas de tamanho mediano, utilizado em indústrias europeias e norte-americanas (MELLO, 2007). A Figura 4, ilustra os componentes de uma peça de madeira laminada colada de laminação horizontal.

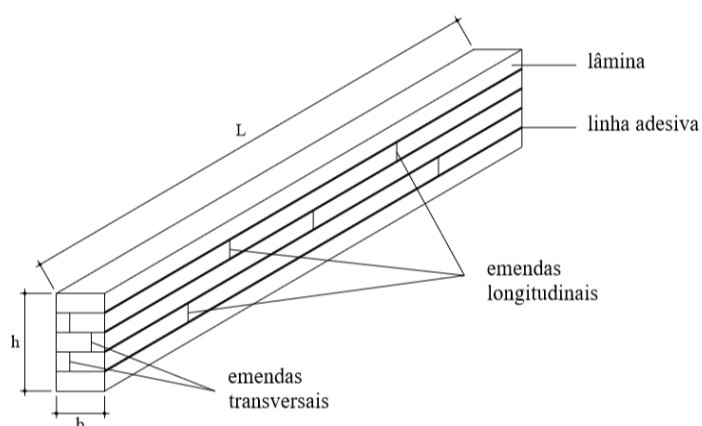


Figura 4 – Elementos de uma peça de MLC de laminação horizontal.

Fonte: Aprilanti, 2010.

Elementos estruturais de MLC apresentam a vantagem de poder trabalhar com lâminas cujo comprimento não é limitado pelas dimensões do tronco da árvore, contudo, para conseguir grandes comprimentos é necessário a execução de emendas entre as tábuas (SZÜCS *et al.*, 2015). Segundo Aprilanti (2010), as lâminas podem ser dispostas perpendicularmente ou paralelamente ao carregamento da viga,

podendo ter emendas longitudinais e transversais com o intuito de obter maiores comprimentos e larguras conforme é mostrado na Figura 5.

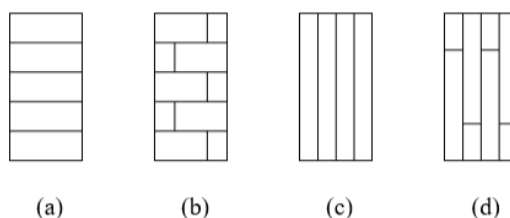


Figura 5 – Laminação horizontal sem emendas transversais (a) e com emendas transversais (b), e laminação vertical sem emendas transversais (c) e com emendas transversais (d).

Fonte: Aprilanti, 2010.

Utiliza-se as vigas de laminação horizontal quando o carregamento atua num plano normal ao plano das lâminas, sendo a mais utilizada em arcos e outros elementos curvos, que são comumente laminados horizontalmente. Nesta tipologia não é necessário que as emendas sejam coladas já que a sua resistência geralmente não irá afetar a resistência da viga. Já as vigas de laminação vertical são utilizadas quando o carregamento atua em um plano paralelo aos planos das lâminas, sendo que nesse tipo de laminação, a resistência das emendas transversais são importantes, pois pode afetar a resistência ao cisalhamento da viga (FREAS e SELBO, 1954).

Em relação às emendas longitudinais, os tipos mais comuns são as de topo (*butt joints*), as biseladas (*scarf joints*) e as dentadas (*finger joints*), sendo a última a mais utilizada no processo industrial, em função de sua boa resistência mecânica e praticidade operacional. A representação das mesmas é apresentada na Figura 6.

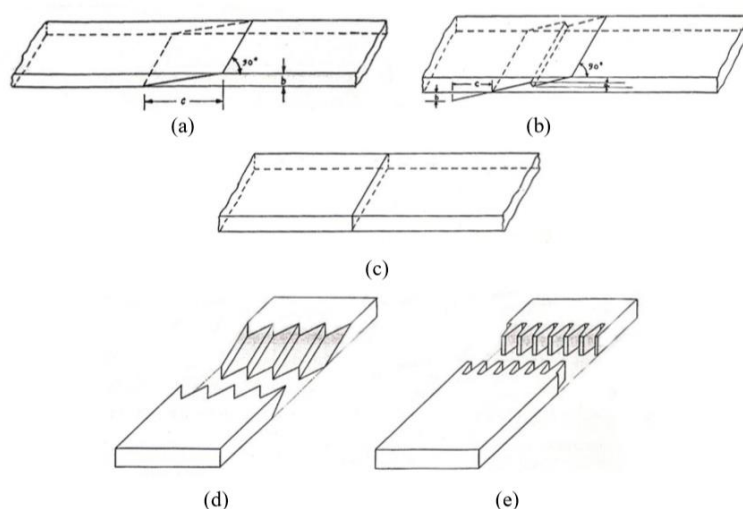


Figura 6 – Emendas longitudinais biselada (a), biselada com dente (b), de topo (c), biselada serrilhada (d) e dentada (e).

Fonte: Freas e Selbo, 1954.

Entre as vantagens apresentadas pela MLC, se destaca a viabilidade de remover as imperfeições procedentes da madeira natural, ou seja, os defeitos como nós e rachaduras podem ser removidos das peças, possibilitando que o restante da mesma seja aproveitado através de emenda longitudinal. Ainda partindo da junção de pequenas peças de madeira, é possível obter peças de grandes dimensões, manifestando grande diversidade de comprimento e largura, proporcionando a construção de grandes estruturas. Também se destaca o fato de possibilitar peças de eixo curvo, e a oportunidade de selecionar as lâminas de melhor qualidade para as posições de maior solicitação de esforço (PFEIL E PFEIL, 2003; FIORELLI, 2005).

De acordo com Szücs *et al.* (2015), a desmontagem e a montagem apresentam maior facilidade devido a leveza dessas estruturas. As estruturas em MLC permitem uma atribuição de uma tensão admissível ligeiramente maior que as madeiras maciças de qualidade igual (cerca de 10%) e um aperfeiçoamento das tensões médias de ruptura e uma atenuação na dispersão estatística de seus valores. Ainda, o peso morto sendo inferior, se confrontado com outros materiais, pode resultar em uma economia nas fundações.

Como desvantagens, podemos citar que a MLC tem um custo maior que o da madeira maciça e é necessário a utilização de técnicas especiais, instrumentos e mão-de-obra especializada no sistema de fabricação (ZANGIÁCOMO, 2003).

Aprilanti (2010) enfatiza que vários dos aspectos que influenciam na resistência da madeira sólida estrutural se aplicam também à madeira laminada colada. A espécie da madeira a ser usada impõe características físicas e anatômicas, como a massa específica, quantidade de nós e inclinação das fibras, que afetam diretamente em suas propriedades mecânicas. Fatores não relacionados às propriedades intrínsecas ao material também podem influenciar na resistência da estrutura em MLC, como a secagem da madeira, teor de umidade das lâminas, a preparação da superfície, a quantidade e a espessura das lâminas, e o adesivo. Szücs et al. (2015) recomendam que as lâminas não tenham uma diferença superior à 5% de teor de umidade de uma para outra no momento da colagem.

Em relação à ligação adesiva, além das propriedades anatômicas da madeira, as propriedades físicas também afetam diretamente o desempenho da mesma, especialmente a densidade aparente, porosidade, teor de umidade, contração e inchamento (FRIHART e HUNT, 2010; BIANCHE, 2014).

## 2.4 ADESIVOS

Os adesivos possuem a função de promover a adesão entre dois substratos, fluindo e preenchendo espaços vazios entre as juntas a serem coladas, gerando interações entre o próprio adesivo e o substrato (PIZZI, 1994). Um adesivo é capaz de colar materiais por meio de forças de adesão e coesão, podendo ter resistência a altas temperaturas, ou à variação de temperatura, carga mecânica, gases, solventes e radiação (SCOTT, 1990).

A adesão é a capacidade de manter superfícies unidas pela ação de forças interfaciais de atração ou de energia de ligação podendo ser do tipo mecânica, eletrostática ou de atração molecular. As forças mecânicas se apresentam fundamentadas principalmente na rugosidade ou porosidade do substrato a ser colado. A rugosidade da superfície do substrato por permitir ganchos mecânicos para a ancoragem da substância adesiva e a porosidade por proporcionar maior ou menor penetração do adesivo nos poros do substrato, dependendo da viscosidade do

adesivo. As forças eletrostáticas derivam da interação entre átomos ou moléculas carregados eletricamente e de sinais opostos e as forças de atração molecular podem ser do tipo Van der Waals e interações por pontes de hidrogênio ou por compartilhamento de pares de elétrons (GALEMBECK e GANDUR, 2001).

Já a coesão é a atração entre moléculas ou átomos de uma mesma matéria, mantendo as partículas unidas. Essa força está relacionada com a organização molecular, e com a intensidade das ligações internas (SILVA, 2006). Na Figura 7 é ilustrada a representação das forças de adesão e coesão em um sistema de dois substratos unidos por adesivo, onde nota-se a atuação de cada uma destas forças.

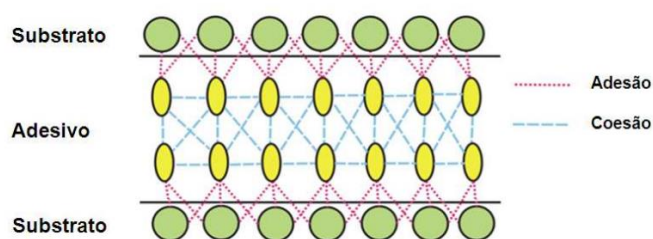


Figura 7 – Desenho representativo das forças de adesão e coesão entre substrato e adesivo.

Fonte: Marques, 2009.

Fatores como a constituição química, estrutura anatômica e a densidade da madeira influenciam diretamente na colagem. A constituição química, especialmente os extrativos, pode provocar um fraco desempenho na linha de cola, podendo reagir com o adesivo utilizado. A influência da estrutura anatômica é referente às diferentes dimensões dos elementos celulares, disposição e frequência que afetam a movimentação e penetração do adesivo na madeira. Por fim, a densidade é referente a porosidade que influencia diretamente na colagem (ALBINO, 2009).

A NBR 7190 (ABNT, 1997) apenas recomenda que o adesivo deve ser à prova de água mas, para escolher qual adesivo utilizar, deve-se levar em consideração o meio em que a estrutura será submetida, ou seja, temperatura e teor de umidade, sendo preciso escolher um adesivo que tenha no mínimo a mesma durabilidade que o elemento em MLC. Aspectos como se a estrutura está abrigada no interior da

edificação ou exposta ao tempo são determinantes para a escolha do adesivo (SZÜCS *et al.*, 2015).

O adesivo mais utilizado para a confecção de peças de MLC é o de fenol-resorcinol-formaldeído (PRF), o qual tem potencial cancerígeno e mutagênico para seres humanos, surgindo a necessidade de substituir este tipo de material por outros que não apresentem a mesma toxicidade (AZEVEDO, 2009; MIOTTO, 2009).

Além disso, produtos derivados de matérias-primas renováveis têm sido objeto de diversos estudos, inclusive os adesivos utilizados em madeira. Este interesse tornou-se maior com a crise do petróleo dos anos 70 e apresenta novo impulso com a preocupação acerca do aquecimento global, onde estão preferindo a não utilização de compostos orgânicos voláteis na sua composição (PIZZI, 2006).

Pesquisas enaltecem o emprego de adesivos poliuretanos que são alternativas para solucionar este problema, os quais produzem juntas de alta resistência (SILVA, 2014). Os adesivos de poliuretanos podem ser do tipo monocomponente ou bicomponente.

Os adesivos monocomponentes estão na forma de pré-polímero, normalmente são sintetizados com abundância de isocianato e a polimerização é conduzida em solução. O processo de cura completa é dado pela umidade do ar. São de fácil aplicação e não precisam de mistura prévia, porém, dependem da umidade relativa do ambiente, e não é possível estocar por longo tempo. Já os adesivos bicomponentes são adesivos de poliuretano onde o poliál e o isocianato estão separados, sendo misturados apenas no momento da aplicação, tendo a vantagem da ausência de solvente (WIRPSZA, 1993; VILAR, 2004; ALBINO, 2009).

Dentre os adesivos de poliuretano destaca-se o Purbond HB530 e o adesivo produzido a partir do óleo de mamona que foi desenvolvido pelo Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo. A mamona tem como vantagem a facilidade de propagação e adaptação em diferentes climas, podendo ser cultivada e encontrada em diversas regiões do mundo, sendo que o clima tropical predominante no Brasil auxiliou no seu alastramento pelo país (MIOTTO, 2009; OLIVEIRA, BARIANI e ZAPPA, 2009).

### 2.4.1 Adesivos à base de óleos vegetais

Nas últimas décadas, os óleos vegetais oriundos de fontes renováveis vêm sendo investigados, os quais são muito utilizados para a obtenção de biomateriais, apresentando grande potencial para a produção de diferentes tipos de adesivos poliméricos (SOMANI *et al.*, 2003; DESAI, PATEL e SINHA, 2003; CARDOSO, NUNES e FARIA, 2015).

Destes óleos, destaca-se o estudo e a utilização de óleos comestíveis derivados do milho, canola e soja, e também de óleos não comestíveis, como o óleo de mamona (também conhecido como óleo de rícino), dos quais são considerados excelentes matérias primas pela facilidade na obtenção, disponibilidade e o baixo custo (SHARMA e KUNDU, 2008). São apresentados na Tabela 2 alguns óleos vegetais que podem ser utilizados na obtenção de poliuretanos.

Tabela 2 – Composição de ácidos graxos de óleos vegetais que podem ser usados na confecção de poliuretanos

Ácidos graxos	Canola (%)	Milho (%)	Soja (%)	Mamona (%)
Mirístico (C 14:0)	≤0,2	≤0,3	≤0,2	-
Palmítico (C 16:0)	3,3 – 6	9,2 - 16,5	9,7 - 13,3	1 – 2
Palmitoleico (C 16:1)	0,1 - 0,6	≤0,4	≤0,2	-
Esteárico (C 18:0)	1,1 - 2,5	≤3,3	3 - 5,4	0,9 – 2
Oleico (C 18:1)	52 – 67	20 - 42,2	17,7 - 28,5	2,9 -6
Linoleico (C 18:2)	16 – 25	39,4 - 65,6	49,8 - 57,1	3 – 5
Linolênico (C 18:3)	6 – 14	0,5 - 1,5	5,5 - 9,5	0 - 0,5
Araquídico (C 20:0)	0,2 - 0,8	0,3 - 0,7	0,1 - 0,6	0,5
Eicosenoico (C 20:1)	0,1 - 3,4	≤0,4	≤0,3	-
Behênico (C 22:0)	≤0,5	≤0,5	0,3 - 0,7	2,1
Erúcico (C 22:1)	≤4,7	≤0,1	≤0,3	-
Ricinoleico (C 18:1)	-	-	-	88

Fonte: Campestre, 2017.

Para que os óleos possam ser utilizados como polióis, eles devem ser derivatizados, pois a maioria não possui hidroxilas no seu esqueleto carbônico, que é uma condição para a obtenção de um poliuretano. Normalmente as modificações



químicas são conduzidas com a quebra das insaturações presentes nos triacilgliceróis. Segundo Silva (2014) apenas o óleo de mamona não precisa de modificação química, por apresentar em sua composição cerca de 88% de ácido ricinoleico, que contém uma hidroxila no carbono.

Os poliuretanos provenientes do óleo de mamona são particularmente flexíveis, estáveis em condições ambientes e resistentes à água. A modificação química do óleo pode alterar algumas propriedades específicas dos poliuretanos obtidos, como o módulo de elasticidade, tempo de cura e resistência (VALERO, PULIDO e RAMÍREZ, 2008). O adesivo poliuretano termoendurecível à base de óleo de mamona é produzido através da reação com um isocianato aromático, que polimeriza a frio (AZAMBUJA e DIAS, 2006). O adesivo pode ser misturado e curado à temperatura ambiente, não sendo considerado agressivo tanto para os seres humanos quanto para o ambiente (WECHSLER *et al.*, 2013).

## 2.5 PÓRTICOS ESTRUTURAIS

As estruturas compostas por pilares e vigas trabalhando em conjunto são denominados pórticos. De acordo com Silva (2011), os pórticos podem ser classificados quanto à sua geometria, em planos ou espaciais, ou a sua estaticidade, em hipostáticos, isostáticos e hiperestáticos.

Os pórticos planos são estruturas lineares planas com solicitações coplanares, para pórticos espaciais, as barras possuem planos diversos. As cargas recebidas por um pórtico plano são conhecidas como co-planares ao pórtico. Os pórticos fundam o esqueleto resistente do sistema construtivo, juntamente com os componentes secundários, onde são unidos os componentes de cobertura e vedação lateral (SOUZA; RODRIGUES; MASCIA, 2008).

Com a decomposição do pórtico a partir dos nós, obtém-se elementos retos (pilares e vigas). A junção destes elementos geralmente é vista na forma de ligações perfeitamente articuladas. Porém, a junção entre componentes pré-moldados de concreto se comporta, na maioria das vezes, como sendo ligações deformáveis. De acordo com Souza, Rodrigues e Mascia (2008), levar em consideração a deformabilidade das ligações é de extrema importância para que a avaliação estrutural chegue o mais próximo possível do comportamento real da estrutura. O estudo mais

intensivo a respeito das ligações entre elementos pré-moldados, já que com o grande aumento do emprego de tais estruturas, aumenta também a responsabilidade dos envolvidos no projeto, que devem considerar a parcialidade da rigidez das ligações entre os componentes pré-moldados ao longo do cálculo estrutural (SOUZA; RODRIGUES; MASCIA, 2008).

Os pórticos são normalmente usados como sistema portante sobretudo de edificações designadas a galpões, coberturas de piscinas, ginásios de esporte ou estações rodoviárias com vãos livres variando entre 20 e 100 metros (PFEIL e PFEIL, 2003). A Figura 8 demonstra alguns exemplos de pórticos. No geral são estruturas biarticuladas ou triarticuladas. Os pórticos triarticulados são normalmente adotados pela rápida e fácil montagem - cada semipórtico é levantado por uma grua e fixado a articulação central. Também, não sofre esforços por variação de temperatura por ser uma estrutura isostática

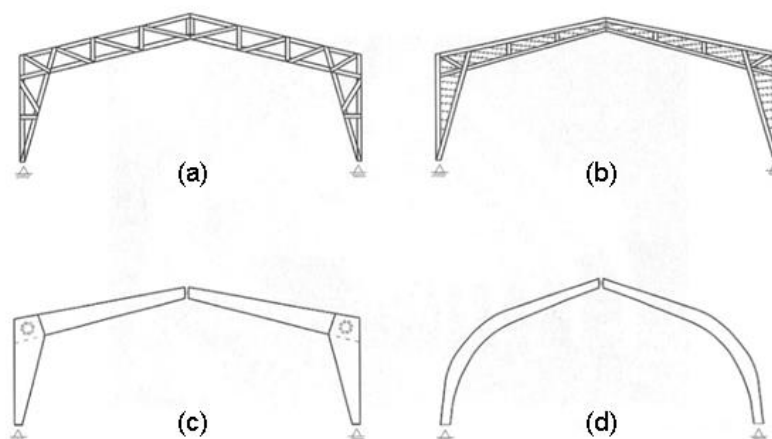


Figura 8 – Pórticos: (a) pórtico biarticulado treliçado; (b) pórtico biarticulado de alma de seção I; (c) e (d) pórticos triarticulados em madeira laminada e colada.

Fonte: Pfeil e Pfeil, 2003.

Para ampliar a capacidade de resistência aos esforços atuantes em pórticos estruturais sem a necessidade de aumentar significativamente suas dimensões, são empregados tirantes. Tal peça estrutural é constituída por um ou mais componentes resistentes à tração. A partir da disposição de tirantes, consegue-se reduzir os deslocamentos horizontais e os momentos nas colunas, e são indicados para

inclinações maiores que  $15^\circ$  (SOUZA; RODRIGUES; MASCIA, 2008). A Figura 9 apresenta um exemplo de pórtico hiperestático com tirante.

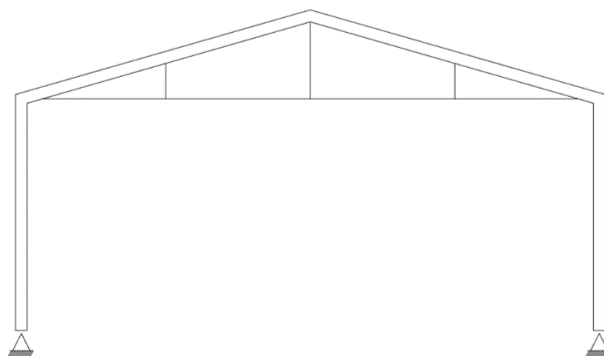


Figura 9 – Pórtico com tirante.

Fonte: adaptado de Souza, Rodrigues e Mascia, 2008.

As estruturas constituídas com pórticos apresentam diversas vantagens, tais como: facilidade de projeto e detalhamento como para implementar ampliações, simplicidade de vencer grandes vãos livres, manutenção fácil e grande compatibilidade com itens e sistemas construtivos industriais (GERDAU, 2018).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

A parte experimental do trabalho foi realizada nas dependências do Laboratório de Estruturas e Materiais de Engenharia – LEME e do Laboratório de Tecnologia e Estruturas de Madeira – LATEM do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas – CCET da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, no Campus de Cascavel–PR.

Os materiais que foram utilizados neste estudo foram a madeira de *Pinus sp.* e o adesivo bi componente à base de óleos vegetais. A madeira foi adquirida no comércio local, tendo sido possível selecionar entre aproximadamente 400 tábuas as mais adequadas para o estudo. Procurou-se evitar peças com defeitos que pudessem afetar significativamente sua resistência, como alta incidência de nós, presença de medula e rachaduras. Por fim, foram escolhidas 96 tábuas de seção transversal de 15 cm x 2,5 cm, e comprimento de três metros. Segundo o fornecedor, as árvores foram derrubadas com 16 anos de idade, e eram de produção própria. O lote das 96 tábuas foi entregue no LATEM no dia 08/05/2020, com umidade variando entre 13,1% a 18,7%. A partir deste momento, fez-se o acompanhamento da variação da umidade da madeira até que a mesma entrasse em equilíbrio com o ambiente.

Nesta pesquisa utilizou-se o adesivo à base de óleos vegetais da empresa KEHL® Indústria e Comércio, com sede na cidade de São Carlos – SP. O adesivo é fornecido em dois componentes: o poliol e o isocianato. Em todos os procedimentos de colagem, o adesivo foi aplicado em uma das faces e espalhado com um pincel. Utilizou-se o adesivo na proporção em massa de 1:1,5 de isocianato e poliol, com consumo igual a 300 g/m<sup>2</sup> e um tempo em fechado inferior a 30 minutos. Após a colagem, as peças recebiam uma pressão de 0,8 MPa controlada por meio do torquímetro eletrônico. Aferiu-se a pressão passado um período de 30 minutos, e por fim, as peças ficavam na prensa por um tempo mínimo de 12 horas.

A metodologia foi dividida em tópicos para facilitar o entendimento das etapas realizadas para a elaboração do experimento, visando alcançar os objetivos do trabalho.

### 3.1 CLASSIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS PEÇAS DE MADEIRA

Para a classificação e caracterização das peças de madeira da espécie *Pinus sp.* realizou-se ensaios para determinar suas propriedades físicas e mecânicas, a fim de conduzir as verificações estruturais do pórtico

Para se ter uma análise que melhor representasse o lote, decidiu-se por selecionar as peças de acordo com a densidade aparente, além de realizar uma classificação visual, analisando cada peça, quantificando a incidência de defeitos (tais como nós, rachaduras, medula, empenamentos) e anotando os comprimentos que efetivamente poderiam ser usados. Selecionou-se 37 das 96 tábuas que compunham o lote para determinar suas propriedades. Destas, foram extraídos trechos de 50 ou 100 cm.

Para o levantamento de algumas propriedades, foi necessário realizar a colagem de duas ou três lâminas de madeira, tanto para a caracterização da madeira quanto para a análise da resistência de juntas coladas. O processo de colagem para a confecção dos corpos de prova foi feito em ambiente que permitiu razoável controle de sua temperatura. Neste período a temperatura do ambiente variou entre 23,2°C a 24,4°C e a umidade relativa do ar variou entre 50,7% a 56,8%. A Figura 10 ilustra o processo.



Figura 10 – Aplicação do adesivo na lâmina de madeira, a esquerda e prensagem dos corpos de prova a direita.

Fonte: Autor, 2021.

Conforme a recomendação da NBR 7190 (ABNT, 1997), fez-se a correção de todos os resultados das propriedades de resistência e de rigidez da madeira encontradas para a umidade padrão de 12%, correspondentes à classe 1 de umidade. Utilizou-se a Equação 1 para corrigir a 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);

### 3.1.1 Densidade aparente

A densidade aparente é a relação entre a massa e o volume da madeira quando seca ao ar. Para obter o volume, padronizou-se as espessuras das tábuas de madeira para 2,5 cm, utilizando a plaina desengrossadeira, e verificou-se a largura e comprimento de cada peça. Com o auxílio de uma balança de precisão foi possível obter a massa das tábuas.

Posteriormente, renomeou-se as peças de forma decrescente de acordo com a densidade aparente da peça, sendo então armazenadas em ambiente seco e coberto, com espaçamento entre as camadas para permitir a livre passagem de ar, conforme ilustrado na Figura 11.



Figura 11 – Armazenagem das peças em local seco e coberto.

Fonte: Autor, 2021.

### 3.1.2 Caracterização da madeira

A caracterização da madeira foi feita, sempre que possível, conforme as recomendações da NBR 7190 (ABNT, 1997), onde foram realizados ensaios para se obter as seguintes propriedades mecânicas:

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

Conforme a NBR 7190 (ABNT, 1997) pode-se admitir que a resistência à tração paralelas às fibras seja igual a resistência à tração na flexão. Por isso, decidiu-se realizar o ensaio de flexão ao invés do ensaio à tração pela dificuldade de se confeccionar os corpos de prova nas dimensões estabelecidas pela norma.

A NBR 7190 (ABNT, 1997) recomenda o ensaio de no mínimo 6 corpos de prova, quando há análise de resistência de espécies usuais. Para os ensaios de compressão paralela às fibras e módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras foram confeccionados 16 corpos de prova, para o de cisalhamento paralelo às fibras foram 39 e para o ensaio à flexão foram 7.

A NBR 7190 (ABNT, 1997) especifica que os corpos de prova devem ter uma espessura de 5 cm. Como a madeira após processamento apresentava uma espessura de aproximadamente 2 cm, os corpos de prova, neste caso, foram confeccionados pela colagem de três lâminas de madeira.

Verificou-se a densidade aparente dos corpos de prova, selecionando peças que representassem a mesma proporção de densidade das peças do lote de madeira. Para a caracterização do lote, extraiu-se 65 peças com dimensões de 2,5 x 6 x 50 cm.

Após a extração das peças, estimou-se suas densidades. Para confeccionar os corpos de prova foram utilizados a desempenadeira, a serra circular e a plaina desengrossadeira. Tais máquinas são exibidas na Figura 12.



Figura 12 – Desempenadeira (a), serra circular (b) e plaina desengrossadeira (c).

Fonte: Autor, 2021.

O processo de colagem foi feito conforme descrito no início deste capítulo. A confecção final dos corpos de prova foi realizada após um período de sete dias de cura do adesivo. Vale ressaltar que se acompanhou a umidade média do lote em todas as etapas.

As dimensões dos corpos de prova para os ensaios de compressão e cisalhamento são apresentadas na Figura 13. Todas as dimensões foram adotadas conforme as indicações da NBR 7190 (ABNT, 1997). Para o ensaio de cisalhamento 20 corpos de prova foram confeccionados de modo a promover o cisalhamento perpendicularmente aos planos de colagem das lâminas e 19 de modo que o cisalhamento acontecesse paralelamente aos planos de colagem.



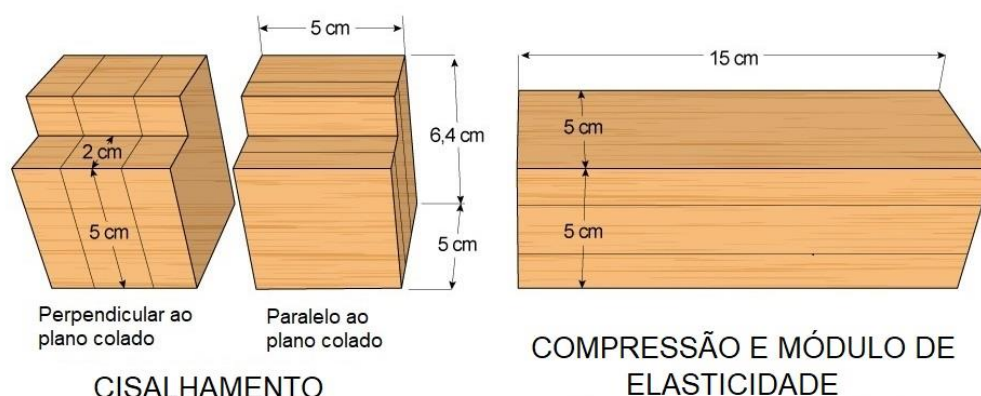


Figura 13 – Corpos de prova para cisalhamento, compressão e módulo de elasticidade.

Fonte: adaptado de Wei, 2017.

Para o ensaio à flexão, os corpos de prova foram confeccionados com seção transversal quadrada de 3,65 cm de lado e ensaiados em aparato que permitiu 60 cm de vão. A aplicação de carga foi feita no centro deste vão, conforme recomendação da NBR 7190 (ABNT, 1997). A aferição das flechas foi feita por meio de um relógio comparador, com resolução de 0,01 mm, localizado no meio do vão. A resistência da madeira à flexão foi determinada a partir da Equação 3 e foi possível verificar o módulo de elasticidade à flexão com a utilização da Equação 4. A realização destes ensaios está ilustrada na Figura 14.

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

Em que:

$f_M$  = resistência da madeira à flexão (N/m<sup>2</sup>);

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

$W_e$  = módulo de resistência elástico da seção transversal (m<sup>3</sup>)

$$E = \frac{\Delta P \times L^3}{48 \times \Delta \delta \times I} \quad (4)$$

Onde:

$E$  = Módulo de elasticidade (kN/m<sup>2</sup>);

$\Delta P$  = Incremento de força (kN);

$L$  = Distância entre os apoios (m);

$\Delta \delta$  = incremento da flecha (m);

$I$  = Inércia da seção (m<sup>4</sup>).

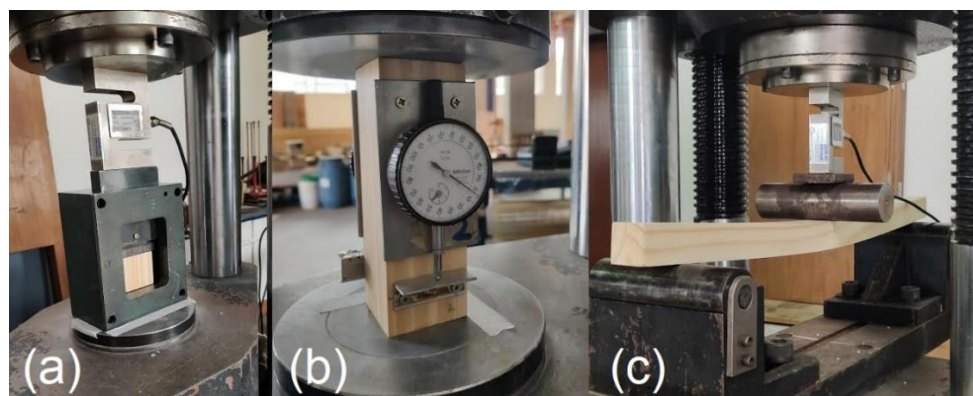


Figura 14 – Execução dos ensaios de cisalhamento (a), compressão (b) e flexão (c).

Fonte: Autor, 2021.

### 3.1.3 Resistência de juntas coladas

Para analisar o comportamento do adesivo à base de óleos vegetais quanto à adesão com a madeira de *Pinus sp.*, foi realizado o ensaio normatizado pela *American Society for Testing and Material* – ASTM D 905 (2013) para determinar a resistência ao cisalhamento na compressão de juntas coladas.

A ASTM D 905 (2013) recomenda que pelo menos 20 corpos de prova devem ser testados. Para este trabalho foram ensaiados 58 corpos de prova, sendo 32 confeccionados com as juntas coladas com as fibras paralelas e 26 com as juntas coladas com as fibras perpendiculares. A geometria final dos corpos de prova é apresentada na Figura 15.

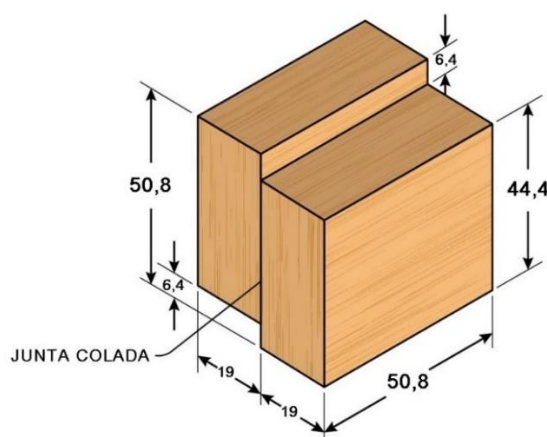


Figura 15 – Corpo de prova para o ensaio de resistência de juntas coladas, dimensões em mm.

Fonte: Autor, 2021.

Extraíu-se peças de 2,5x6x50 cm do lote para a confecção dos corpos de prova. Conforme prescreve a norma (ASTM, 2013), não foram utilizadas peças com defeitos e as peças que foram coladas apresentavam um teor de umidade de equilíbrio de 10 a 12%, já que não há recomendação do fabricante do adesivo.

Vale ressaltar que foram selecionadas peças que melhor representem a variabilidade da densidade do lote. Após a extração, foi registrada a massa e o volume das peças para determinar a densidade aparente de cada uma para, posteriormente, confeccionar as juntas a partir da colagem de duas lâminas com densidades próximas.

Para a confecção dos corpos de prova utilizou-se os mesmos equipamentos descritos anteriormente. Antes do processo de colagem as peças foram usinadas e limpas e os corpos de prova foram extraídos nas dimensões especificadas após o tempo de cura do adesivo. Os corpos de prova já nas dimensões estabelecidas pela ASTM D 905 (2013) são ilustrados na Figura 16.



Figura 16 – Corpos de prova para o ensaio de resistência de juntas coladas com as fibras paralelas (acima) e com as fibras perpendiculares (abaixo).

Fonte: Autor, 2021.

A resistência foi analisada pelos critérios da norma americana D 2559 (ASTM, 2016) e da norma brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997). A norma americana determina que a resistência das juntas coladas deve ser no mínimo igual à resistência média da madeira ao cisalhamento, para o teor de umidade-padrão a 12%. A norma brasileira determina o mesmo critério, mas com a diferença de utilizar o conceito de resistência característica.

#### 3.1.4 Resistência ao cisalhamento na torção de juntas coladas

Segundo Couri Petrauski (2012), o desempenho de pórticos de madeira multilaminados, com colagem de juntas em ângulo, depende da rigidez e da resistência manifestada pela ligação dos nós rígidos. Das solicitações que irão atuar nestes nós, destaca-se o momento fletor ( $M_d$ ) que age como momento de torção nas ligações, solicitando os planos de colagem por meio de tensões de cisalhamento.

Nesse contexto, é de suma importância obter dados sobre a resistência à torção de juntas coladas. Por não existir uma norma técnica específica para se obter esta resistência, foi utilizada a metodologia proposta por Petrauski *et. al.* (2020), que

já foi adotada por outros autores como parte do dimensionamento de ligações coladas de pórticos laminados colados (STRINGARI *et. al.*, 2020; FILIPPINI, 2020).

Esta metodologia consiste na utilização de um aparato que sujeita o plano colado do corpo de prova apenas ao esforço de torção. Obtém-se a resistência ao cisalhamento na torção aplicando-se na Equação 5. Na Figura 17 é exibido o aparato já instalado na Máquina Universal de Ensaios.

$$\tau_{max} = \frac{2.M}{I_p} \quad (5)$$

Onde:

$\tau_{max}$  = tensão máxima ao cisalhamento na torção de juntas coladas (Pa);

$M$  = momento na ruptura (N.m);

$I_p$  = momento polar de inércia (m<sup>4</sup>).



Figura 17 – Ensaio de cisalhamento na torção com o aparato na Máquina Universal de Ensaios.

Fonte: Stringari, 2019.

O corpo de prova apresentava geometria similar à proposta pela norma ASTM D 905 (2013), conforme apresentado na Figura 18. Foram confeccionados 56 corpos

de prova onde 31 tiveram as juntas coladas com as fibras de madeira paralelas entre si, e a 25 com as fibras perpendiculares entre si. Fatores como a densidade e teor de umidade da madeira foram aferidos em todas as etapas do ensaio, tomando os mesmos cuidados descritos nos ensaios citados anteriormente.

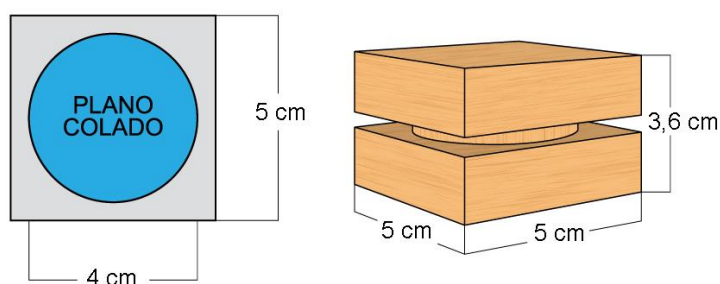


Figura 18 – Corpo de prova para ensaio da resistência ao cisalhamento na torção.

Fonte: Autor, 2021.

Os corpos de prova foram extraídos a partir das lâminas provenientes do lote, retirando-se peças de 2,5x6x50 cm. A confecção dos mesmos foi de acordo com o descrito no item 3.1.4, sendo feita a colagem de duas lâminas com densidades próximas. Na Figura 19 são ilustrados a confecção dos corpos de prova, e os mesmos já com suas dimensões finais.

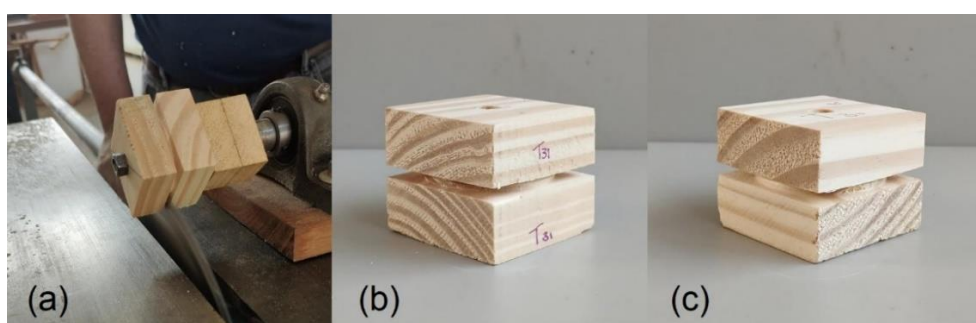


Figura 19 – Confecção dos corpos de prova para o ensaio da resistência ao cisalhamento na torção (a), corpos de prova com as dimensões finais com as juntas coladas com as fibras paralelas (b) e com as fibras perpendiculares (c).

Fonte: Autor, 2021.

### 3.2. PÓRTICO COM TIRANTE

Para a execução do pórtico com tirante foi considerada uma geometria similar a utilizada por Stringari (2019). O pesquisador realizou o experimento com base em aviários de postura utilizados pela Cooperativa Agroindustrial LAR (Figura 20). Como apresentado, são pórticos com vão livre e altura de pilar de cinco metros. O diferencial entre este projeto e o de Stringari *et. al.* (2020) é que se utilizou como solução uma cobertura em telha cerâmica francesa. Justifica-se a utilização do tirante dada a massa significativamente maior que o emprego da telha cerâmica promove na estrutura.

Adotou-se o ângulo de inclinação do telhado de  $22,9^\circ$ , correspondente a inclinação de 42,2%, seguindo as especificações técnicas elaboradas por Scherer e Scherer (CERÂMICA SÃO LUIZ, 2012), que aponta que para telhas cerâmicas francesas é indispensável uma declividade mínima de 35%.

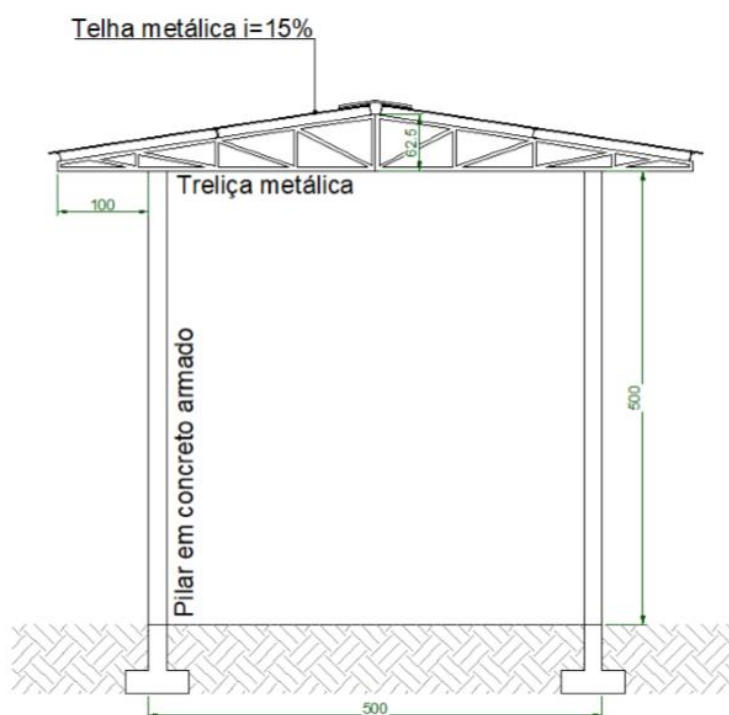


Figura 20 – Geometria adotada pela Cooperativa LAR para aviários de postura, dimensões em cm.

Fonte: Stringari, 2019.



Em relação às estruturas de Stringari *et. al.* (2020) e de Filippini (2020) foi necessário reduzir o modelo experimental por limitações encontradas no Quadro de Reação existente no LEME. Assim, decidiu-se adotar um vão livre de 1,90 metros e uma altura de pilar de 1,83 metros. Desta forma a altura total do pórtico foi de 2,21 metros, considerada a inclinação da cobertura.

### 3.2.1 Redução da inércia

Visando uma estrutura segura e ao mesmo tempo econômica, em regiões menos solicitadas foi reduzida a inércia da barra de cobertura ao longo do seu comprimento, o que foi feito de forma linear.

Por utilizar o programa Ftool para a análise dos esforços, foi necessário fazer essa variação de inércia em trechos por não ser possível efetuar a variação de forma contínua. Assim, dividiu-se a cobertura em 14 trechos de 9,6 cm em projeção horizontal (aproximadamente 10,23 cm de comprimento efetivo) e verificou-se a resistência da estrutura para cada trecho para a sua respectiva solicitação. A Figura 21 ilustra os trechos definidos para a variação da inércia.

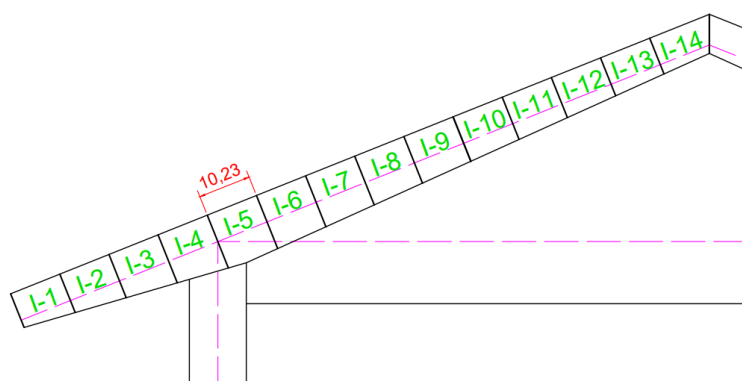


Figura 21 – Geometria adotada para diminuição da inércia no programa Ftool, dimensão em cm.

Fonte: Autor, 2021.



### 3.2.2 Verificação da estrutura para o Estado Limite Último

Frente aos valores encontrados na caracterização da madeira, foi assumido para fins de verificações do pórtico, os valores de resistência média do lote, sem minoração, ou coeficientes de segurança.

Considerando algumas análises preliminares, incluso a geometria estabelecida, adotou-se uma carga de ruptura 46,5 kN para a verificação estrutural do pórtico. Quanto à análise estrutural, os diagramas de esforço cortante, momento fletor e esforço normal para o carregamento foram obtidos por meio do programa Ftool, da PUC-Rio (<https://www.ftool.com.br/Ftool/>, 2017).

À semelhança do realizado por Stringari *et. al.* (2020) e Filippini (2020), empregou-se cinco lâminas coladas para a confecção das barras do pórtico. A única exceção foi o beiral onde utilizou-se três lâminas resistentes. Decidiu-se também prolongar o comprimento das lâminas externas resistentes da viga no sentido do beiral. Este prolongamento foi de aproximadamente 13 cm, conforme é possível ver na Figura 22.

Vale salientar que para a região da ligação colada pilar-viga, foi considerado que duas lâminas do pilar e três da cobertura constituem a ligação sendo unidas por meio do adesivo, conforme ilustra a Figura 22. Mesmo procedimento já foi adotado por alguns pesquisadores (COURI PETRAUSKI, 2012; STRINGARI *et. al.*, 2020; FILIPPINI, 2020). Ainda, adotou-se uma espessura de 15 mm para todas as lâminas.

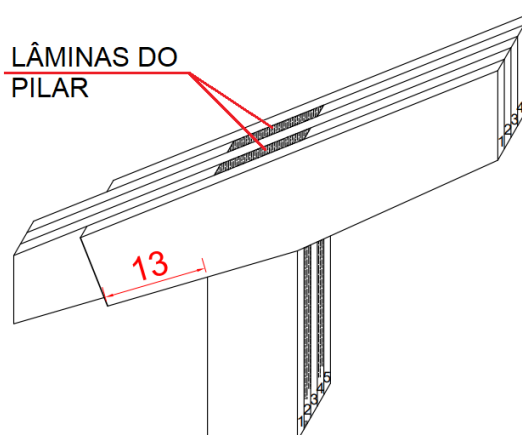


Figura 22 – Esquema da ligação rígida do pórtico, medidas em centímetros.

A verificação da estrutura para flexão simples, quando ocorresse, foi realizada respeitando a Equação 6, seguindo a NBR 7190 (ABNT, 1997). A Equação 7 representa a tensão máxima atuante do momento fletor ( $\sigma_M$ ) para perfis retangulares.

$$\sigma_M \leq f_{c0} \quad (6)$$

Onde:

$\sigma_M$  = tensão máxima devido à flexão (Pa);

$f_{c0}$  = resistência à compressão paralela às fibras (Pa).

$$\sigma_M = \frac{6.M}{b.h^2} \quad (7)$$

Em que:

$M$  = valor do momento fletor (N.m);

$b$  = largura da peça (m);

$h$  = altura da peça (m).

Para o esforço cortante ( $V$ ), as verificações com base na NBR 7190 (ABNT, 1997) utilizaram a Equação 8.

$$f_{v0} \geq \frac{3.V}{2.b.h} \quad (8)$$

Onde:

$f_{v0}$  = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (Pa);

$V$  = valor do esforço cortante (N);

Barras submetidas à compressão foram verificadas conforme a orientação da NBR 7190. Primeiramente foi feita a verificação para a estabilidade, conforme item 7.5 da norma. Posteriormente, aplicou-se a verificação à flexo-compressão. O índice de esbeltez da peça foi calculado conforme a Equação 9.

$$\lambda = \frac{\sqrt{12} \cdot L_0}{b} \quad (9)$$

Onde:

$\lambda$  = índice de esbeltez (adimensional);

$L_0$  = comprimento de flambagem (m);

$b$  = dimensão da seção retangular na direção de análise (m).

Conforme ilustra a Figura 23, neste trabalho foi adotado a orientação  $x$  paralela ao plano do pórtico e na direção do vão da estrutura. A orientação  $y$ , também paralela ao plano e na direção do eixo do pilar, e a direção  $z$ , perpendicular ao plano do pórtico e representando a espessura dos elementos.

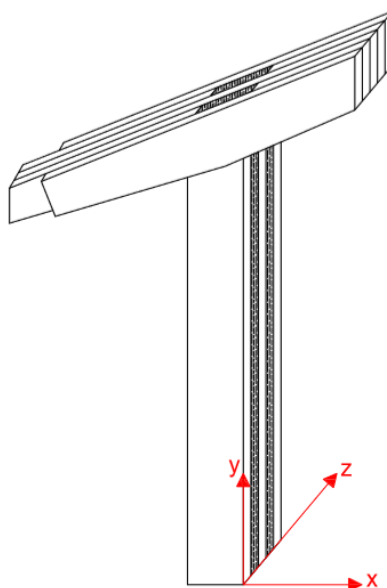


Figura 23 – Sistemas de coordenadas global adotado para o projeto.

Autor: 2021.

A NBR 7190 (ABNT, 1997) aconselha valores para o comprimento de flambagem de  $L_0 = L$  para peças onde ambas extremidades são indeslocáveis e  $L_0 = 2 \cdot L$  para peças que apresentam uma extremidade engastada e a outra livre. Por tratar-se de um pórtico, buscou-se encontrar valores que representassem melhor as suas extremidades. Assim, adotou o valor de comprimento de flambagem estabelecido pelo

Projeto de Revisão NBR 7190 (ABNT, 2011) de  $L_0 = 2,40.L$  representando uma extremidade com rotação livre e translações impedidas e a outra extremidade com a rotação impedida e translações livres.

A NBR 7190 (ABNT, 1997) estabelece a Equação 10 para a verificação de peças sob compressão, com índice de esbeltez superior a 40. A tensão devido à força normal ( $\sigma_N$ ) foi calculada utilizando-se da Equação 11.

$$\frac{\sigma_N}{f_{c0}} + \frac{\sigma_M}{f_{c0}} \leq 1 \quad (10)$$

Onde:

$\sigma_N$  = tensão máxima relativo à força normal (Pa).

$$\sigma_N = \frac{N}{A} \quad (11)$$

Em que:

$N$  = Força normal (N);

$A$  = área da seção transversal analisada (m<sup>2</sup>).

As seções transversais submetidas à flexo-compressão foram verificadas utilizando-se das Equações 12 e 13 fornecidas pela NBR 7190 (ABNT, 1997). Por ser uma seção retangular adotou-se para o coeficiente de correção ( $k_M$ ) o valor de 0,5.

$$\left(\frac{\sigma_N}{f_{c0}}\right)^2 + \frac{\sigma_{Mx}}{f_{c0}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{Mz}}{f_{c0}} \leq 1 \quad (12)$$

$$\left(\frac{\sigma_N}{f_{c0}}\right)^2 + k_M \cdot \frac{\sigma_{Mx}}{f_{c0}} + \frac{\sigma_{Mz}}{f_{c0}} \leq 1 \quad (13)$$

Onde:

$\sigma_{Mx}$  = tensão máxima de flexão atuante na direção y (Pa);

$\sigma_{My}$  = tensão máxima de flexão atuante na direção z (Pa);

$k_M$  = coeficiente de correção (adimensional).

### 3.2.3 Verificação da estrutura para o Estado Limite de Utilização

O estado limite de utilização foi verificado conforme recomenda a NBR 7190 (ABNT, 1997) aplicando-se a Equação 14, neste caso, uma combinação de longa duração. Para estruturas comuns, esta norma orienta não ter flechas admissíveis ( $f_{adm}$ ) superiores à 1/200 para meio de vãos e 1/100 para estruturas em balanço do comprimento correspondente.

$$f \leq f_{adm} \quad (14)$$

Em que:

$f$  = flecha obtida da combinação aplicável (m);

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

### 3.2.4 Verificação da ligação colada

A solução adotada para o pórtico exige uma ligação colada entre a viga e o pilar com inclinação diferente de 0°. Esta ligação é o ponto mais crítico da estrutura por ser uma região onde os esforços são máximos. Isto já foi demonstrado em pesquisas anteriores (COURI PETRAUSKI, 2012; STRINGARI *et. al.*, 2020; FILIPPINI, 2020). Tendo em vista que um bom desempenho da estrutura está estritamente ligado à rigidez e resistência apresentada pela ligação, é necessário realizar sua verificação. A NBR 7190 (ABNT, 1997) não contempla um método para sua verificação. Sendo assim, adotou-se um critério estabelecido por Couri Petruski (1999) e Petruski (2000).

Este critério considera que as ligações coladas estão sujeitas aos esforços de momento fletor e torção e força normal e cortante que serão absorvidos nos planos de contato entre as barras. Portanto, a ligação precisa de uma área resistente que seja superior à soma das áreas necessárias para combater os esforços atuantes. A área resistente é dada pela área do paralelogramo ABCD, conforme ilustra na Figura 24.

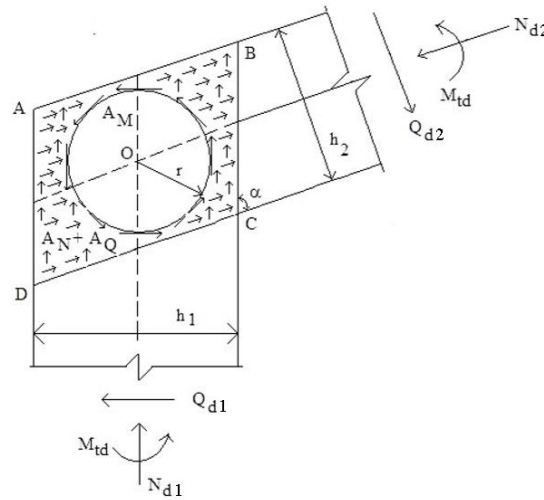


Figura 24 – Esquema de análise da ligação colada.

Fonte: Couri Petrauski, 2012.

Foi utilizada a Equação 15 concebida por Petrauski (2000) para a verificação da ligação colada que considera as peças dispostas sob diferentes ângulos entre as fibras. Neste trabalho o momento torçor ( $M_t$ ) é igual ao valor do momento fletor ( $M$ ).

$$\left( \frac{2 \cdot M_t \cdot \pi^{1/2}}{n \cdot f_{tor90}} \right)^{2/3} + \frac{N}{n \cdot f_{v\alpha}} + \frac{V}{n \cdot f_{v90}} \leq \frac{h_1 \cdot h_2}{\text{sen}(\alpha)} \quad (15)$$

Em que:

$M_t$  = momento torçor (N.m);

$n$  = número de faces coladas numa dada ligação;

$f_{tor90}$  = resistência à torção de juntas coladas com fibras à 90° entre si (Pa);

$f_{v\alpha}$  = resistência ao cisalhamento de juntas coladas inclinadas em relação as fibras (Pa);

$f_{v90}$  = resistência ao cisalhamento de juntas coladas à 90° entre si (Pa);

$h_1$  = altura da barra 1 (m);

$h_2$  = altura da barra 2 (m).

Uma verificação adicional que foi feita para a ligação colada é a averiguação do raio mínimo necessário ( $r_{min}$ ) para combater o momento torçor atuante na ligação, dada pela Equação 16.

$$r_{min} = \sqrt{\pi \cdot \left( \frac{2 \cdot M_t \cdot \pi^{1/2}}{n \cdot f_{tor90}} \right)} \quad (16)$$

### 3.2.5 Tirante

Visando uma solução mais econômica, optou-se como solução construtiva empregar tirantes na estrutura para reduzir os esforços atuantes. Pelo fato da ligação pilar-viga ser o ponto crítico da estrutura e ser necessário perfurar a seção para “fixar” o tirante de forma adequada, considerou-se não ser viável fazer uso do tirante no centro da ligação. Assim, foi colocado o tirante 12 cm abaixo do eixo, conforme ilustra a Figura 25.

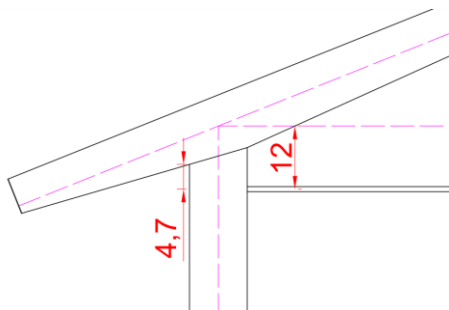


Figura 25 – Excentricidade da posição do tirante, dimensões em cm.

Fonte: Autor, 2021.

Decidiu-se utilizar para o tirante barras rosqueadas de 3/8” por ser possível realizar a protensão, garantindo o seu real funcionamento. As barras rosqueadas foram adquiridas em comércio local com comprimento total de três metros.

Retirou-se 70 cm de cada barra rosqueada para determinar a resistência à tração das mesmas, em ensaio de tração direta em máquina universal de ensaio.

### 3.2.6 Geometria do pórtico com tirante

Na Figura 26 é apresentada a configuração geométrica do pórtico com tirante que foi confeccionado em madeira laminada colada e na Figura 27 é mostrada detalhadamente a viga de cobertura em escala reduzida.

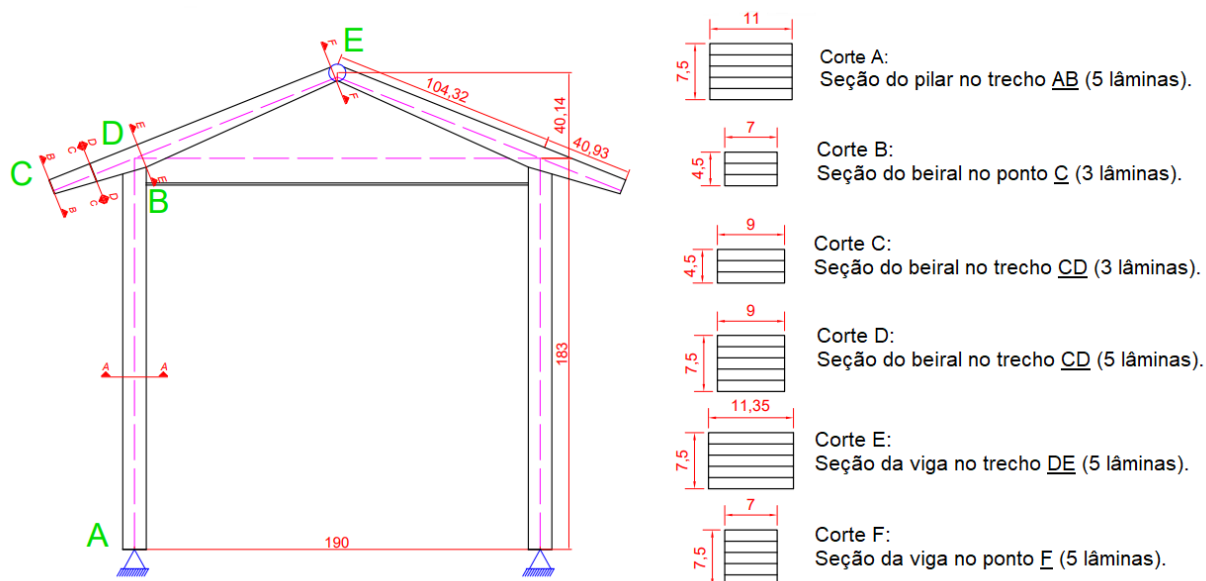


Figura 26 – Configuração geral do pórtico, dimensões em cm.

Fonte: Autor, 2021.

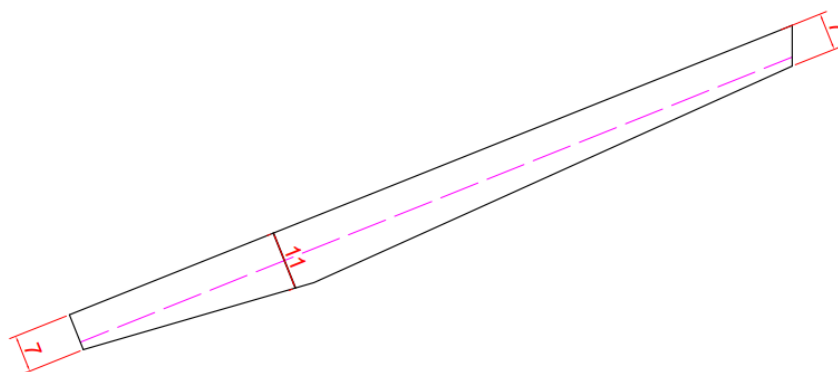


Figura 27 - Configuração geométrica da viga de cobertura do pórtico, dimensões em cm.

Fonte: Autor, 2021.



O pórtico triarticulado teve sua composição final dada por:

- Cinco lâminas na região do pilar com seção de 11 cm x 7,5 cm;
- Três lâminas na região do beiral com seção iniciando em 7 cm x 4,5 cm e chegando na ligação com cinco lâminas de seção 11 cm x 7,5 cm;
- Cinco lâminas para a região da viga, iniciando com uma seção de 11 cm x 7,5 cm na ligação e reduzindo até chegar na cumeeira com uma seção de 7 cm x 7,5 cm.

### 3.3 EXECUÇÃO DOS PÓRTICOS

Foram confeccionados quatro pórticos com tirantes com diferentes classes de densidade da madeira. O pórtico P1 foi considerado de alta densidade, o pórtico P2 de medianamente alta, o pórtico P3 de medianamente baixa e o pórtico P4 de baixa.

Cada pórtico foi confeccionado em duas partes distintas, onde ambas as partes foram formadas por pilar, viga e beiral sendo unidas, posteriormente, utilizando-se de um pino metálico no nó E.

Primeiramente, as peças passaram por um processamento inicial, com a utilização da plaina desengrossadeira, desempenadeira e serra circular, para obter-se lâminas com dimensões próximas às estabelecidas no projeto atingindo-se em processamento final às dimensões necessárias. No processamento inicial foi realizada a redução da seção das peças da viga e do beiral, para isto foi confeccionado um gabarito em madeira (Figura 28) com a possibilidade de ajuste do ângulo de redução, caso necessário.

Foram confeccionados dois gabaritos para a montagem/colagem das metades dos pórticos adequadas às dimensões estabelecidas no projeto, tendo a possibilidade de produzir um pórtico por dia, conforme ilustrado na Figura 29. No processamento final, realizado no dia da colagem, as lâminas foram processadas na plaina desengrossadeira e serradas na serra circular para se obter as dimensões e ângulos estabelecidos em projeto. Embora a estrutura seja complexa, foram necessários apenas quatro ângulos para realizar os cortes de encaixe da cumeeira e da ligação pilar-viga. Após, as lâminas foram limpas, com o auxílio de ar comprimido e escova, para eliminar sujeiras e acúmulos de pó, para obter um bom resultado na colagem. A Figura 28 ilustra as peças que compõem um pórtico após o processamento final.



Figura 28 – Gabarito em madeira para auxiliar na redução de inércia das peças, a esquerda, e lâminas após processamento final e prontas para a colagem, a direita.

Fonte: Autor, 2021.

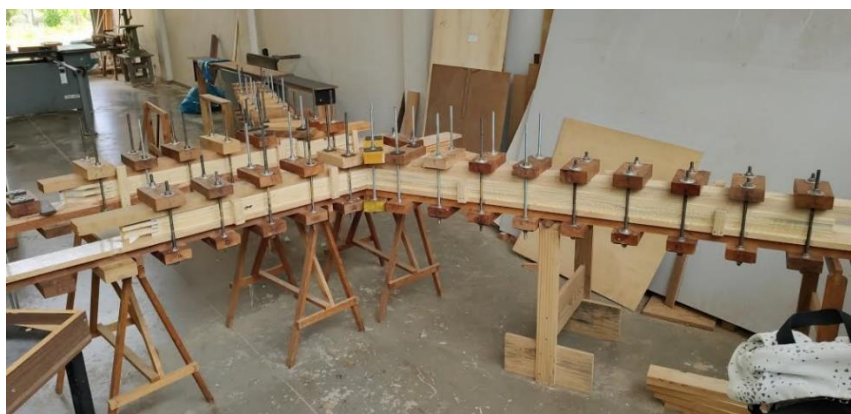


Figura 29 – Gabarito de prensagem.

Fonte: Autor, 2021.

Foi realizada uma montagem preliminar, sem adesivo, para conferir todas as peças e encaixes. Informações quanto ao teor de umidade da madeira e temperatura inicial e final do ambiente no momento da colagem foram aferidos no dia, e estão apresentados na Tabela 3. Para determinar o teor de umidade médio retirou-se seis peças após o processamento final das lâminas, sendo duas retiradas do pilar, duas da viga e duas do beiral.

Tabela 3 – Informações referente às condições ambientais do dia de colagem dos pórticos

	Pórtico P1	Pórtico P2	Pórtico P3	Pórtico P4
Temperatura inicial (°C)	27	29	26,5	29
Temperatura final (°C)	27,5	29	24,5	25
Teor de umidade médio (%)	12,4	12,34	12,13	12,18

Fonte: Autor, 2021.

Foram adotados os mesmos padrões de colagem descritos no início do Capítulo 3. A quantidade de adesivo necessária para a colagem foi mensurada e separada em quatro recipientes, sendo um para cada camada, e o mesmo foi espalhado por meio de um pincel, conforme ilustra a Figura 30.

Desejava-se realizar a colagem em tempo inferior à 30 minutos, devido à rápida alteração da viscosidade do adesivo. Tendo-se registrado os tempos de colagem para todas as unidades, obteve-se a média de 9 min e 35 s.

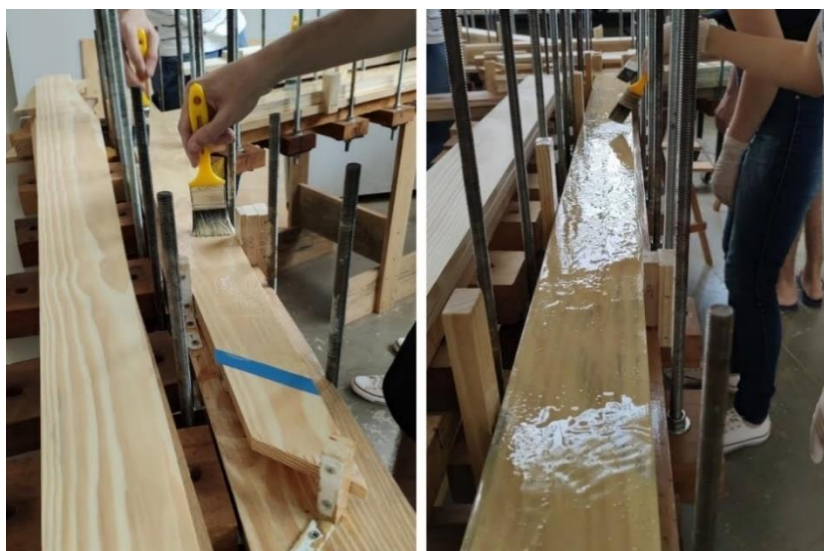


Figura 30 – Aplicação do adesivo nas lâminas.

Fonte: Autor, 2021.

Após a aplicação do adesivo em todas as camadas e posicionamento das lâminas no gabarito, foi iniciada a prensagem da estrutura. A pressão foi controlada por meio de um torquímetro eletrônico, onde realizou-se o aperto do conjunto de

parafusos, fixados no gabarito, até que fosse alcançada a pressão especificada. O equipamento foi calibrado em todos os dias em que realizou-se a colagem. Na Figura 31 é possível visualizar o torquímetro. O processo desde o início da colagem até o aperto dos parafusos para cada lado do pórtico foi realizado em tempo médio de 42 min.

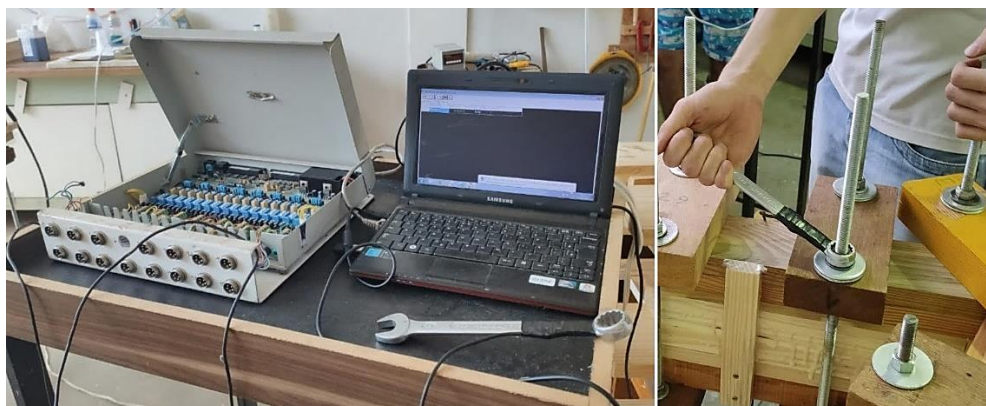


Figura 31 – Torquímetro eletrônico, à esquerda, e aplicação da pressão com a sua utilização, à direita.

Fonte: Autor, 2021.

Passados 30 minutos do aperto dos parafusos, foi feito um reaperto para conferir se todos os parafusos estavam na pressão adequada. Passado o período de 12 horas, a estrutura foi retirada e armazenada por um período mínimo de dez dias antes do ensaio, conforme recomendação do fabricante do adesivo.

### 3.5 ENSAIO DOS PÓRTICOS

Os pórticos foram ensaiados individualmente utilizando-se o quadro de reação em concreto armado disponível no LEME, apresentado na Figura 32. Foi necessário a utilização de alguns aparatos que foram construídos exclusivamente para a realização do ensaio, tal como o sistema de aplicação de cargas, sistema de aquisição de forças aplicadas, sistema de contraventamento, apoio dos pórticos e sistema de leitura dos deslocamentos.

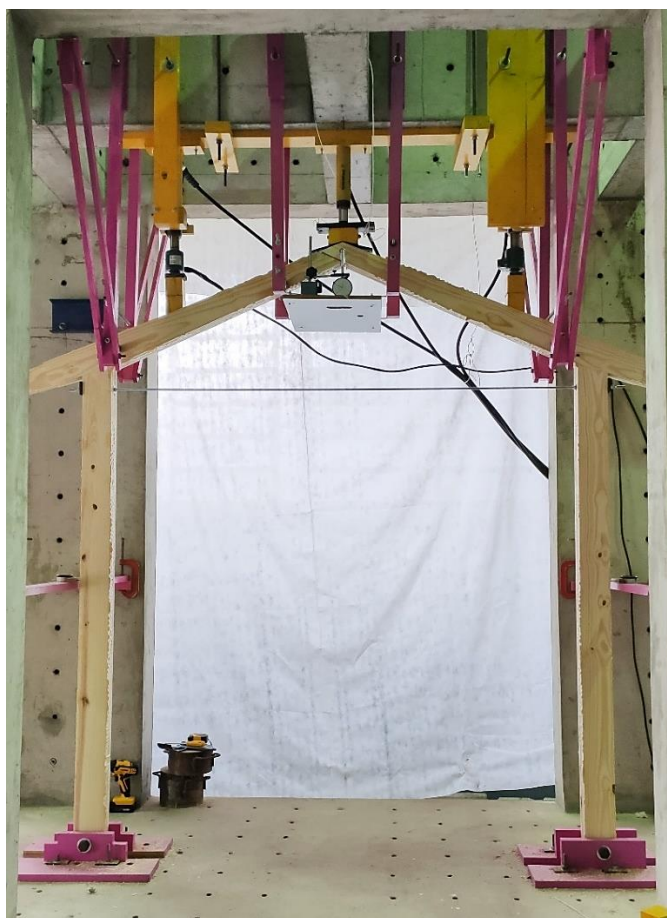


Figura 32 – Quadro de reações com os aparatos.

Fonte: Autor, 2021.

O sistema de aplicação de cargas foi composto por três cilindros hidráulicos que foram fixados no quadro de reação nos locais ilustrados na Figura 33. Foram utilizados aparatos de madeira para a adequada transmissão de carga dos cilindros para a estrutura, conforme apresentado na Figura 34.



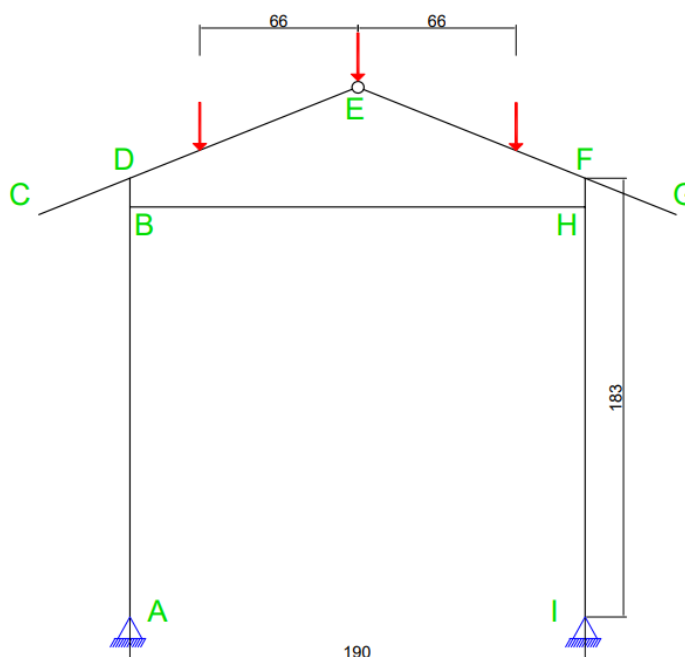


Figura 33 – Pontos de aplicação de carga.

Fonte: Autor, 2021.

Em relação à aquisição de forças aplicadas, instalou-se duas células de carga nos cilindros laterais, que foram colocadas entre o cilindro e a estrutura. O sistema de contraventamento serve para impedir o deslocamento horizontal da estrutura e permitir o livre deslocamento na direção da carga, simulando o contraventamento teórico considerado em projeto. Para o contraventamento utilizou-se um conjunto de rolamentos metálicos localizados em diferentes pontos da viga de cobertura.

Para o apoio dos pórticos foram utilizados aparatos que funcionam como apoios de segundo gênero, impedindo o deslocamento horizontal e vertical da estrutura. O sistema foi fixado ao quadro de reação localizado na base dos pórticos.

A leitura dos deslocamentos do pórtico foi realizada por meio de três relógios comparadores, com resolução de 0,01 mm, localizados em pontos pré-estabelecidos. Tais pontos foram definidos com base nos maiores deslocamentos encontrados em simulação feita no programa Ftool. Na Figura 34 é possível ver a disposição dos relógios comparadores, bem como os outros aparatos citados anteriormente.

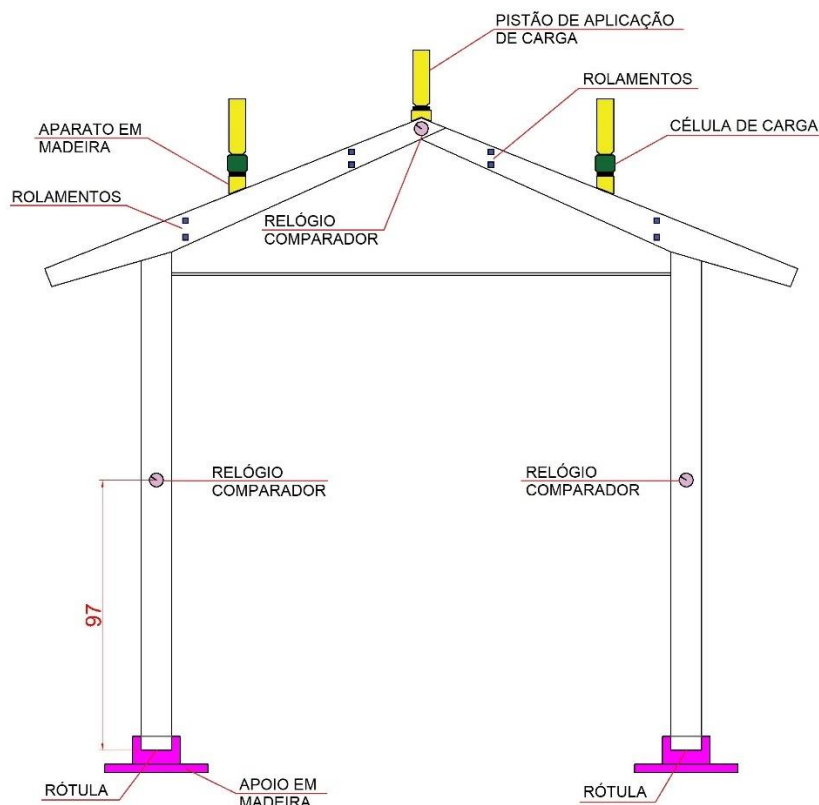


Figura 34 – Disposição dos aparatos para o ensaio.

Fonte: Autor, 2021.

Após a instalação de todos os aparatos foi iniciado o ensaio. Primeiramente aplicou-se duas vezes uma carga para a “acomodação” da estrutura de aproximadamente 3 kN e realizou-se o pré-tensionamento do tirante. Após o descarregamento da carga de acomodação os relógios comparadores foram “zerados”. Então, o ensaio foi conduzido conforme as seguintes etapas:

- I. Aplicação de carga total aproximada de 12 kN, registro dos deslocamentos apresentados nos relógios comparadores e descarregamento da carga;
- II. Repetição da etapa I;
- III. Aplicação do carregamento até a ruptura da estrutura ensaiada, com registro dos deslocamentos apresentados pelos relógios comparadores até a carga total mínima de 33 kN e, após, remoção dos relógios comparadores.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS PEÇAS DE MADEIRA

#### 4.1.1 Densidade aparente

O lote de madeira de *Pinus sp.* utilizado para o estudo era composto por 96 tábuas com densidade variando entre 0,42 g/cm<sup>3</sup> a 0,75 g/cm<sup>3</sup>, sendo a densidade média do lote igual a 0,52 g/cm<sup>3</sup> com um coeficiente de variação de 13,2%. Nas Figuras 35 e 36 é possível visualizar o histograma e o boxplot, respectivamente, referente à densidade aparente do lote de madeira de *Pinus sp.* Ambos foram obtidos por meio do software RStudio.

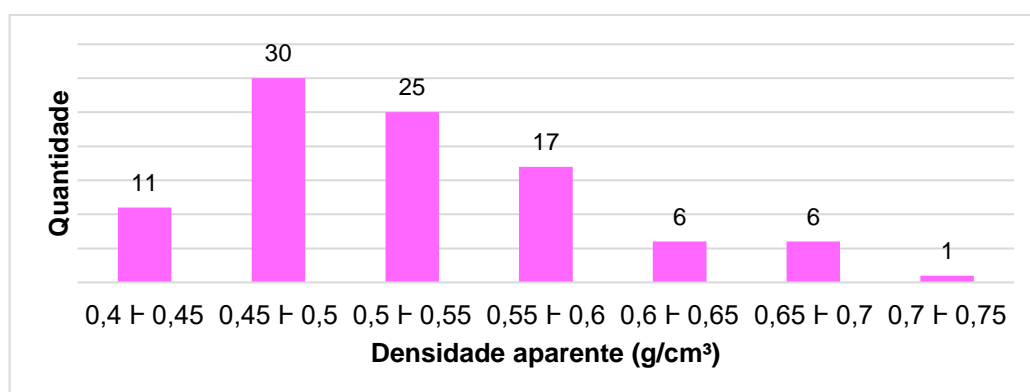


Figura 35 - Histograma: quantidade de tábuas por densidade aparente.

Fonte: Autor, 2021.

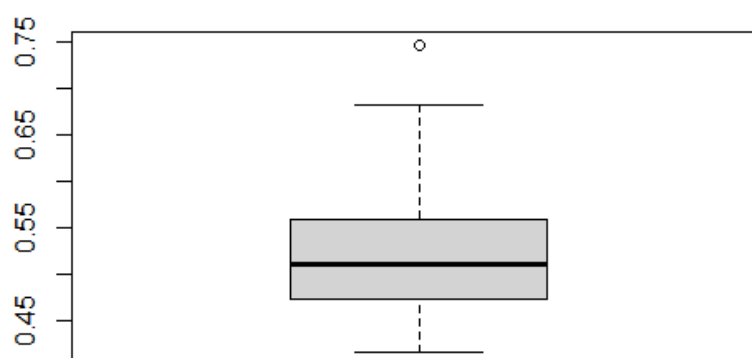


Figura 36 – Boxplot: densidade aparente do lote de madeira.

Fonte: Autor, 2021.



Apenas uma tábuas de *Pinus sp.* exibiu valor de densidade discrepante do restante do lote e cerca de metade das tábuas apresentaram uma densidade aparente entre 0,47 g/cm<sup>3</sup> a 0,56 g/cm<sup>3</sup>. A densidade aparente deste lote teve menor variação quando comparada ao lote utilizado por Ulanovicz (2019), cuja densidade aparente oscilou entre 0,39 g/cm<sup>3</sup> a 0,88 g/cm<sup>3</sup>.

Analisando-se o boxplot, é possível notar que as tábuas entre o 3º Quartil e o limite superior, que representa as tábuas com maior densidade aparente, expõe valores mais dispersos de densidade, enquanto em relação às demais, nota-se uma menor variabilidade.

O lote de madeira foi separado em quatro grupos conforme suas densidades, sendo elas:

- Baixa: 24 tábuas de densidade variando de 0,42 a 0,47 g/cm<sup>3</sup>;
- Medianamente baixa: 23 tábuas de densidade variando de 0,47 a 0,51 g/cm<sup>3</sup>;
- Medianamente alta: 24 tábuas de densidade variando de 0,51 a 0,56 g/cm<sup>3</sup>;
- Alta: 25 tábuas de densidade variando de 0,56 a 0,75 g/cm<sup>3</sup>.

O fato do grupo de alta densidade ter uma tábuas a mais, deve-se por ter sido utilizado o gráfico de boxplot para fazer a separação, e ter uma peça com valor discrepante do restante. Essa tábuas com valor fora do intervalo estabelecido não foi utilizada para a obtenção das propriedades físicas e mecânicas da madeira, mas posteriormente foi utilizada para a confecção dos pórticos.

#### 4.1.2 Caracterização da madeira

Na Tabela 4 são apresentados os resultados da caracterização física e mecânica da madeira de *Pinus sp.* Determinou-se o teor de umidade e densidade aparente de todos os corpos de prova ensaiados. Os teores de umidades médios mostrados referem-se à umidade dos corpos de prova no dia em que foram testados.

Tabela 4 – Resultados da caracterização física e mecânica do *Pinus sp.*

	Resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{c0}$ )	Módulo de elasticidade à compressão ( $E_{c0}$ )	Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras ( $f_{v0}$ )	Resistência à tração na flexão ( $f_{t0}$ )	Módulo de elasticidade à flexão ( $E_{M0}$ )
Nº de corpos de prova	16	16	39	7	7
Teor de umidade médio (%)	9,71	9,71	10,27	14,98	14,98
Densidade aparente média (g/cm³)	0,54	0,54	0,54	0,537	0,537
Valores médios (MPa)	48,88	13316	12,29	71,92	10739
Valores médios, 12% de umidade (MPa)	45,54	12709	11,48	78,2	11358
Valores característicos, 12% de umidade (MPa)	38,46	-	8,12	56,96	-
Coefficiente de variação* (%)	19,79	19,54	21,89	28,94	39,43

Fonte: Autor, 2021.

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

A NBR 7190 (ABNT, 1997) admite para esforços normais um coeficiente de variação de 18% e para esforços tangenciais 28%. Nesta caracterização, alguns dos valores de resistência obtidos apresentaram um coeficiente de variação superior ao recomendado, sendo para o ensaio de flexão o valor mais discrepante. Este valor pode ser justificado devido aos poucos corpos de prova ensaiados à flexão, tendo sido confeccionado apenas sete.

Comparando os resultados obtidos com os encontrados por Ulanovicz (2019), este lote demonstrou valores similares e comparando com a norma brasileira o lote

apresenta valores semelhantes à de uma conífera de classe C 30. As propriedades obtidas por Ulanovicz (2019) estão apresentadas a seguir:

- $f_{ck} = 32,75$  MPa
- $E_{cm} = 14528$  MPa
- $f_{v0} = 8,98$  MPa

Os resultados de todos os ensaios para cada corpo de prova podem ser encontrados no Apêndice A.

#### 4.1.3 Resistência ao cisalhamento de juntas coladas à compressão e à torção

Os resultados da resistência ao cisalhamento direto e por torção das juntas coladas de *Pinus sp.* estão apresentados na Tabela 5 e as resistências obtidas para cada corpo de prova estão detalhadas no Apêndice A.

Tabela 5 - Resultados da resistência ao cisalhamento na compressão e na torção de juntas coladas

	Resistência ao cisalhamento direto		Resistência ao cisalhamento por torção	
	Fibras paralelas ( $f_{vc0}$ )	Fibras perpendiculares ( $f_{vc90}$ )	Fibras paralelas ( $f_{vt0}$ )	Fibras perpendiculares ( $f_{vt90}$ )
Nº de corpos de prova	32	26	31	23
Teor de umidade médio (%)	9,62	9,33	10,27	10,41
Densidade aparente média (g/cm³)	0,54	0,54	0,54	0,54
Valores médios (MPa)	11,09	4,45	8,92	5,72
Valores médios, 12% de umidade (MPa)	10,3	4,09	8,47	5,54
Valores característicos, 12% de umidade (MPa)	7,78	2,64	6,55	4,09

Tabela 5 – Continuação

	Resistência ao cisalhamento direto		Resistência ao cisalhamento por torção	
	Fibras paralelas ( $f_{vc0}$ )	Fibras perpendiculares ( $f_{vc90}$ )	Fibras paralelas ( $f_{vt0}$ )	Fibras perpendiculares ( $f_{vt90}$ )
Coeficiente de variação* (%)	14,84	34,23	21,12	30,54

Fonte: Autor, 2021.

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

Este lote apresentou uma resistência ao cisalhamento na compressão com as fibras paralelas superior ao lote ensaiado por Ulanovicz (2019), sendo 8% maior que o valor exibido em seu estudo. O autor encontrou uma resistência média de 13,23 MPa.

Petrauski *et al.* (2020) ao apresentarem resultados de resistência de juntas coladas ao cisalhamento na compressão e na torção encontraram, para juntas coladas paralelamente ( $f_{v0}$ ) e perpendicularmente ( $f_{v90}$ ) às fibras, a mesma tendência. Para os autores, independentemente do ensaio (compressão ou torção), as menores resistências ocorrem quando a colagem se dá com lâminas perpendiculares entre si. Ainda, entre as quatro respostas, o melhor e o pior desempenho foram encontrados no ensaio de compressão. Juntas coladas paralelas foram as mais resistentes e aquelas coladas perpendiculares entre si foram as de pior desempenho.

#### 4.3 VERIFICAÇÃO DO PÓRTICO

Nesta seção são apresentadas as principais verificações estruturais conduzidas para confirmar que a solução apresentada na Figura 26 poderia fazer frente a um carregamento total da ordem de 46,5 kN, conforme mencionado no item 3.2.2 deste trabalho.

Sendo assim, as análises foram conduzidas no programa Ftool, para o carregamento total de 46,5 kN, conforme indica a Figura 37. Os diagramas de momento fletor, esforço cortante e esforço normal gerados pelo programa estão dispostos no Apêndice B.

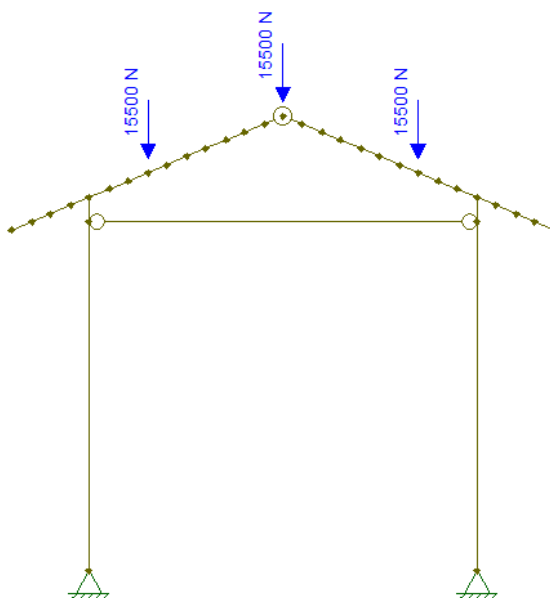


Figura 37 – Carga de projeto do pórtico.

Fonte: Autor, 2021.

As verificações aqui apresentadas compreendem em: verificações do pilar do pórtico, nas direções x e z, envolvendo estabilidade e flexo-compressão; verificações à flexo-compressão para as lâminas de madeira na região da ligação; verificações para a ligação multilaminada colada dos nós rígidos (ligações pilar-viga); verificação ao cisalhamento para as lâminas do pilar na região da ligação; verificação do tirante.

Nestas verificações foram admitidas as recomendações e/ou formulações apresentadas pela NBR 7190 (1997) e outras apresentadas por bibliografias de Resistência dos Materiais ou mesmo de autores da área de estruturas de madeira. Ainda, no cálculo do índice de esbeltez do pilar do pórtico, adotou-se a recomendação do Projeto de Revisão da NBR 7190 (2011).

#### 4.3.1 Verificações para o pilar

Considerou-se que o pilar recebia os esforços em sua extremidade superior, conforme indicado na Figura 38. Haja vista a seção transversal indicada e a situação de vínculos admitida nas direções x e z, também ilustrada na figura, procedeu-se o cálculo do índice de esbeltez ( $\lambda$ ) nas duas direções por meio da Equação 9.

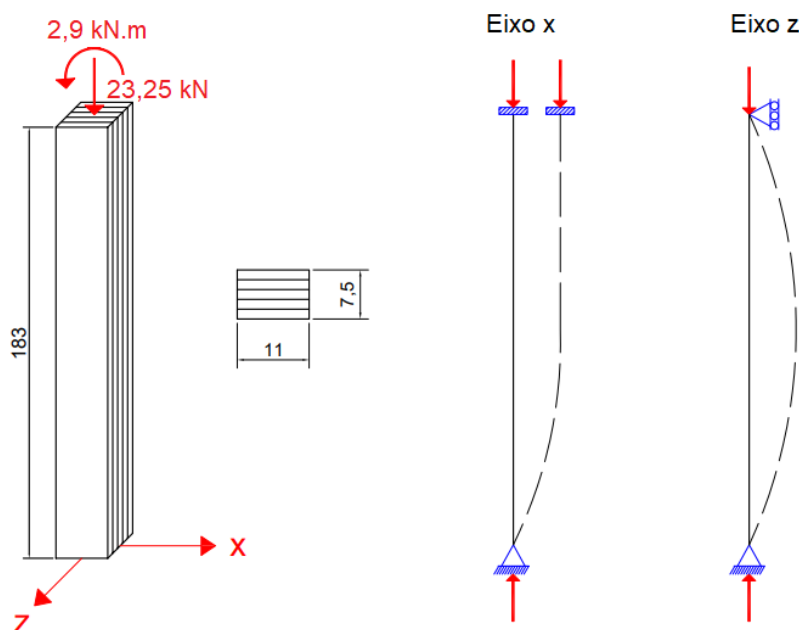


Figura 38 – Seção transversal e tipologia dos apoios adotados para o pilar.

Fonte: Autor, 2021.

$$\lambda_x = \frac{\sqrt{12} \cdot L_0}{h} \therefore \lambda_x = \frac{\sqrt{12}}{0,11} (2,4 \cdot 1,83) = 138,3 \Rightarrow \text{peça esbelta}$$

$$\lambda_z = \frac{\sqrt{12} \cdot L_0}{h} \therefore \lambda_z = \frac{\sqrt{12}}{0,075} (1,83) = 84,5 \Rightarrow \text{peça esbelta}$$

#### 4.3.1.1 Verificações associadas à estabilidade.

Para a direção de x os cálculos realizados estão dispostos a seguir. No cálculo das excentricidades, admitiu-se que

$$e_i = \frac{M_{i,x}}{N} = \frac{2899}{23250} = 0,124 \text{ m} \quad (17)$$

A excentricidade acidental ( $e_a$ ) foi admitida como sendo de 1 cm uma vez que o valor orientado pela NBR foi superior e, acredita-se, que as condições de execução não iriam gerar excentricidade superior ao valor adotado. A excentricidade inicial foi calculada de acordo com a norma em vigor, como mostra a Equação 17, consequência da análise estrutural, conforme obtida do programa Ftool. Por fim, assumiu-se que a

excentricidade suplementar ( $e_c$ ) é nula, uma vez que, supõe-se, não haveria tempo da fluência se manifestar. Como consequência, a excentricidade de primeira ordem é exibida pela Equação 18.

$$e_{1,ef} = e_i + e_a + e_c = 0,124 + 0,01 + 0 \therefore e_{1,ef} = 0,134 \text{ m} \quad (18)$$

Conforme orienta a NBR 7190 (1997) e Pfeil e Pfeil (2003), a estabilidade de pilares esbeltos dependerá da magnitude do momento fletor máximo que irá agir, na direção de análise, como consequência da interação entre a força normal e o momento atuante, quando a carga for excêntrica. Nestes casos a estimativa para o máximo momento fletor atuante pode ser obtida pela equação a seguir.

$$M_{máx} = e_{1,ef} \cdot \left( \frac{FE}{FE - N} \right) \cdot N \quad (19)$$

Calculando-se  $FE$ , para a situação em análise, tem-se:

$$FE = \frac{\pi^2 \cdot 12709 \times 10^6 \cdot \frac{0,075 \cdot 0,11^3}{12}}{(2,4 \cdot 1,83)^2} = 54,1 \text{ kN} \quad (20)$$

Como consequência, o máximo momento fletor atuante e associado à normal  $N$ , seria:

$$M_{máx,x} = 0,134 \cdot \left( \frac{54093}{54093 - 23250} \right) \cdot 23250 = 5,49 \text{ kN.m}$$

De posse de que o esforço normal atuante é de 23,25 kN e o momento fletor máximo é de 5,49 kN.m, pode-se calcular as respectivas tensões normais. Nesta direção, portanto, estima-se:

$$\sigma_N = \frac{N}{A} = \frac{23250}{0,075 \cdot 0,11} = 2,82 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Mx} = \frac{6 \cdot M}{b \cdot h^2} = \frac{6 \cdot 5492}{0,075 \cdot 0,11^2} = 36,31 \text{ MPa}$$

Então, pode-se aplicar a equação de verificação (Equação 10).

$$\frac{\sigma_N}{f_{c0}} + \frac{\sigma_{Mx}}{f_{c0}} \leq 1 \quad \therefore \quad \frac{2,82}{45,54} + \frac{36,31}{45,54} \leq 1 \quad \therefore \quad 0,86 < 1 \Rightarrow \text{condição satisfeita}$$

Deste resultado, pressupõe-se que, na direção x, o pilar do pórtico, para este carregamento experimental (46,5 kN), estaria próximo do limite de resistência.

Então realizou-se a verificação para a direção z. No cálculo das excentricidades, admitiu-se:

Nesta direção z, a excentricidade acidental ( $e_a$ ) foi admitida como sendo de valor igual à recomendação da NBR (ABNT, 1997) uma vez que foi inferior à unidade. A excentricidade inicial foi nula, pelo fato da estrutura estar carregada no próprio plano. Por fim, assumiu-se excentricidade suplementar ( $e_c$ ) nula, pela razão exposta anteriormente.

Como consequência, a excentricidade de primeira ordem foi:

$$e_{1,ef} = 0,0061 + 0 + 0 \quad \therefore \quad e_{1,ef} = 0,0061 \text{ m} \quad (21)$$

Então, para a carga crítica  $FE$ , tem-se:

$$FE = \frac{\pi^2 \cdot 12709 \times 10^6 \cdot \frac{0,11 \cdot 0,075^3}{12}}{(1,83)^2} = 144,84 \text{ kN} \quad (22)$$

$$M_{\text{máx}} = e_{1,ef} \cdot \left( \frac{FE}{FE - N} \right) \cdot N = 0,0061 \cdot \left( \frac{144845}{144845 - 23250} \right) \cdot 23250 = 0,17 \text{ kN.m}$$

De posse que o esforço normal é de 23,25 kN e que é o momento fletor é de 0,17 kN.m, pode-se calcular as respectivas tensões normais. Nesta direção, portanto, estima-se:

$$\sigma_N = \frac{23250}{0,075 \cdot 0,11} = 2,82 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Mx} = \frac{6.168,94}{0,11 \cdot 0,075^2} = 1,64 \text{ MPa}$$



Então, pode-se aplicar a equação de verificação (Equação 10).

$$\frac{\sigma_N}{f_{c0}} + \frac{\sigma_{Mx}}{f_{c0}} \leq 1 \quad \therefore \quad \frac{2,82}{45,54} + \frac{1,64}{45,54} \leq 1 \quad \therefore \quad 0,10 < 1 \Rightarrow \text{condição satisfeita}$$

Deste resultado, pressupõe-se que, na direção z, o pilar do pórtico, para este carregamento experimental (46,5 kN), estaria trabalhando sem risco. Com a realização destes cálculos concluiu-se que, quanto à estabilidade, a verificação crítica para o pilar é na direção x.

#### 4.3.1.2 Verificações associadas à flexo-compressão.

Aplicou-se nas Equações 12 e 13 para a verificação à flexo-compressão do pilar. Como a tensão de flexão atuante na direção z é menor que a tensão de flexão atuante na direção x, a Equação 12 foi a mais rigorosa. Assim, compreendeu-se:

$$\left(\frac{\sigma_N}{f_{c0}}\right)^2 + \frac{\sigma_{Mx}}{f_{c0}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{Mz}}{f_{c0}} \leq 1 \quad \therefore \quad \left(\frac{2,82}{45,54}\right)^2 + \frac{36,31}{45,54} + 0,5 \cdot \frac{1,64}{45,54} \leq 1 \quad \therefore \quad 0,82 < 1$$

Portanto, o pilar satisfaz às verificações aplicáveis, para a carga experimental pretendida com considerável margem de segurança.

#### 4.3.2 Verificação da madeira na região da ligação, à flexo-compressão

##### 4.3.2.1 Lâminas do pilar

Na região desta ligação, apenas duas lâminas do pilar resistem ao esforço atuante, conforme apresenta a Figura 39.

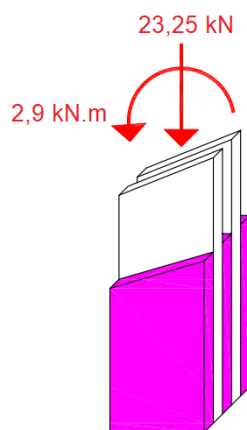


Figura 39 – Lâminas resistentes do pilar que compõem a ligação rígida.

Fonte: Autor, 2021.

Nesta verificação admitiu-se, portanto, conforme resultados do programa Ftool, que o esforço normal é de 23,25 kN, o momento fletor na direção x é de 2,9 kN.m e não há momento fletor atuando na direção z. As respectivas tensões geradas, são:

$$\sigma_N = \frac{23250}{0,03 \cdot 0,11} = 7,04 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Mx} = \frac{6.2899}{0,03 \cdot 0,11^2} = 47,91 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Mz} = 0$$

Aplicou-se os resultados nas Equações 12 e 13, como a tensão de flexão na direção z é nula a mais rigorosa entre as duas (Equação 12) é apresentada a seguir:

$$\left(\frac{\sigma_N}{f_{c0}}\right)^2 + \frac{\sigma_{Mx}}{f_{c0}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{Mz}}{f_{c0}} \leq 1 \quad \therefore \left(\frac{7,04}{45,54}\right)^2 + \frac{47,91}{45,54} + 0,5 \cdot \frac{0}{45,54} \leq 1$$

$$1 = 1 \Rightarrow \text{condição satisfeita no limite}$$

Como consequência desta verificação, supõe-se que para cargas totais superiores à 46,5 kN, já pode iniciar-se o processo de ruína das estruturas.

#### 4.3.2.2 Lâminas da viga

Procedeu-se a verificação à flexo-compressão para a viga. Conforme é apresentado na Figura 40, três lâminas provenientes da viga compõem a ligação colada. O esforço normal na viga é de 29,66 kN e o momento fletor é de 2,9 kN.m, para a direção z não há momento fletor atuante. Então, segue-se os cálculos.

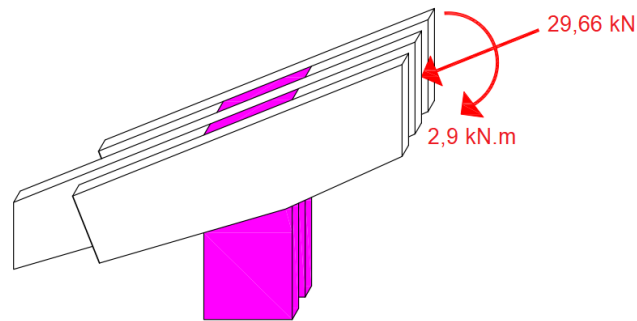


Figura 40 - Lâminas resistentes da viga que compõem a ligação rígida.

Fonte: Autor, 2021.

$$\sigma_N = \frac{29664}{0,045 \cdot 0,11} = 5,99 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Mx} = \frac{6.2899}{0,045 \cdot 0,11^2} = 31,94 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Mz} = 0$$

Aplicou-se os resultados nas Equações 12 e 13, tem-se para a mais rigoroso entre elas:

$$\left(\frac{\sigma_N}{f_{co}}\right)^2 + \frac{\sigma_{Mx}}{f_{co}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{Mz}}{f_{co}} \leq 1 \quad \therefore \quad \left(\frac{5,99}{45,54}\right)^2 + \frac{31,94}{45,54} + 0,5 \cdot \frac{0}{45,54} \leq 1$$

$$0,72 < 1 \Rightarrow \text{condição satisfeita com folga}$$

Desta verificação conclui-se que a viga, na região da ligação, para a carga total estimada de 46,5 kN, não deve apresentar problemas.

#### 4.3.3 Verificação da ligação colada

Realizou-se a verificação da ligação colada conforme o item 3.2.4, utilizando-se a Equação 15. Conforme verificado no programa Ftool e estabelecido em projeto, utilizou-se para as variáveis  $h_1$  e  $h_2$  o valor de 11 cm, momento torçor atuante de 2,9 kN.m, esforço normal de 29,66 kN, esforço cortante igual a 22,39 kN e ângulo de inclinação das fibras do pilar em relação ao da barra da cobertura de 67,09°. Aplicando-se na equação, vem:

$$\left(\frac{2.2899 \cdot \pi^{1/2}}{4.5,54 \times 10^6}\right)^{2/3} + \frac{29664}{4.4,46 \times 10^6} + \frac{22396}{4.4,09 \times 10^6} \leq \frac{0,11 \cdot 0,11}{\sin(67,09)} \therefore 0,006 + 0,0017 + 0,0014 \leq 0,013$$

$$0,0091 \text{ m}^2 < 0,013 \text{ m}^2 \Rightarrow \text{condição satisfeita}$$

Percebeu-se que a parcela de área necessária para resistir ao momento fletor (59,88 cm<sup>2</sup>) é significativamente superior às demais. Isto é coerente com o tipo da estrutura verificada que, trabalha fundamentalmente à flexão.

Por fim, a área circular necessária para resistir ao momento fletor exige, neste caso, um raio interno mínimo de:

$$r \geq \sqrt{\frac{59,88}{\pi}} \therefore r > 4,36 \text{ cm}$$

Como dispõe-se de um raio interno de até 5,5 cm, a condição está também satisfeita.

Como consequência desta verificação, percebe-se que a área reservada para a ligação no sentido de solidarizar as lâminas do pilar em relação às lâminas da viga, está satisfatória e exigindo apenas algo em torno de 70% da área disponível.

#### 4.3.4 Verificação das lâminas do pilar na ligação, frente ao cisalhamento

As duas lâminas do pilar, na região da ligação, devem resistir à um esforço de cisalhamento igual a 22,39 kN. Aplicando-se na Equação 8, tem-se:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{3.22396}{2.0,03.0,11} \leq 11,48$$

$$10,18 \text{ MPa} < 11,48 \text{ MPa} \Rightarrow \text{condição satisfeita próxima ao limite}$$

#### 4.3.5 Verificação do tirante

O tirante utilizado consistiu em barras rosqueadas com diâmetro de 3/8". Para determinar sua resistência foram extraídos de cada uma das quatro barras adquiridas, uma amostra de aproximadamente 70 cm. Estes quatro corpos foram submetidos à tração em Máquina Universal de Ensaio existente no LEME até a sua ruptura.

Os resultados indicaram uma resistência máxima média à tração de 30,6 kN. Em contrapartida, os resultados do programa Ftool quanto ao esforço normal no tirante, para uma carga total de 46,5 kN nos pórticos, indicou uma força de tração igual a 23,76 kN. Neste sentido, assumiu-se que tais tirantes seriam adequados ao experimento. Destaque-se que não há no mercado de Cascavel-PR tirantes de bitolas superiores no comprimento necessário à pesquisa.

#### 4.3.6 Verificação para o Estado limite de Serviço.

Verificou-se as estimativas das flechas apresentadas pelo pórtico com tirante por meio do programa Ftool. Para a carga de 46,5 kN, o deslocamento apresentado pela região da cumeeira foi de 4,7 mm e o deslocamento exibido para o pilar a uma altura de 97 cm a partir da base foi de 0,76 mm.

Segundo a NBR 7190 (ABNT, 1997), a máxima flecha admissível permitida para meios de vãos é 1/200. Desta forma, a flecha admissível para esta estrutura é de 9,5 mm para a cumeeira e de 9,15 mm para os pilares. As estimativas de deslocamentos previstas pelo programa Ftool são bem inferiores às estabelecidas

pela norma. Desta forma, conclui-se que as flechas para a carga de 46,5 kN atendem as verificações da norma.

#### 4.4 RESULTADOS DA ANÁLISE EXPERIMENTAL DO PÓRTICO

##### 4.4.1 Resistência apresentada pelas estruturas

Os quatro pórticos foram ensaiados até a ruptura para analisar seu comportamento e a sua resistência. Na Tabela 6 são apresentadas informações acerca da resistência de cada pórtico, bem como sua massa, densidade e locais de ruptura.

Tabela 6 – Valores de resistência das estruturas

Pórtico	Massa sem tirante(kg)	Densidade média aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Local de Ruptura	Carga de Ruptura* (kN)
P1	32,2	0,62	Nó D e F	71,47
P2	27,4	0,53	Nó D e F	67,62
P3	25,2	0,49	Nó F	60,19
P4	23,1	0,45	Nó D e F	55,02
Média	26,98	0,52	-	63,58

Fonte: Autor, 2021.

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

Todas as estruturas apresentaram ruptura na região da ligação rígida (nós D ou F), localizada na transição do pilar para a viga. Ainda, o pórtico P3 exibiu ruptura de uma das lâminas da cumeeira (Nó E), mas não foi o responsável pela ruína da estrutura. Tal fratura pode ter ocorrido durante a liberação da energia acumulada no momento da ruptura, o que é capaz de danificar outros pontos da estrutura.

Nos trabalhos realizados por Couri Petrauski (2012), Stringari *et. al.* (2020) e Filippini (2020) os pórticos também romperam nas ligações rígidas (nós D ou F). Tal ocorrência parece ser esperada uma vez que a região da ligação é a mais solicitada por momento fletor, inclusive nesta pesquisa.

Couri Petrauski (2012) e Stringari *et. al.* (2020), ainda, obtiveram, em algumas lâminas, na região da ligação, rupturas por tração perpendicular às fibras, relacionadas provavelmente ao elevado momento fletor. Filippini (2020), ao contrário, conseguiu eliminar esta ocorrência nas lâminas externas utilizando-se de um prolongamento destas lâminas para além da região da ligação. Nesta pesquisa adotou-se o mesmo procedimento da autora, conforme indicado anteriormente na Figura 22. Desta forma, também conseguiu-se evitar ruptura por tração perpendicular às fibras, naquela região.

Ao contrário das estruturas ensaiadas por Stringari *et. al.* (2020) e Filippini (2020), os pórticos não manifestaram rompimento brusco na cumeeira (nó E). Pode-se justificar tal diferença por conta da utilização do tirante, que diminui consideravelmente a deformação na cumeeira.

Embora os pórticos tenham sido dimensionados para uma carga de 46,5 kN, a ruína das estruturas só ocorreu para uma carga mínima de 55,02 kN. A média observada para os 4 exemplares foi de 63,6 kN. Neste sentido, pode-se interpretar que, face ao apresentado no item 4.3, especialmente em relação à verificação à flexo-compressão para as lâminas do pilar, cargas superiores à 46,5 kN poderiam iniciar a ruptura dos modelos. Por conta da elevada carga ao qual estavam submetidas, acredita-se que a face interna da ligação rígida dos pórticos já havia sido rompida à compressão antes de manifestar a ruptura à tração. Contudo, devido ao excesso de adesivo presente nesta região a verificação de rompimentos à compressão foi comprometida.

A utilização do tirante para reduzir os esforços atuantes na ligação rígida teve um reflexo positivo na resistência das estruturas. Apesar deste estudo não ter as configurações geométricas idênticas dos estudos feitos por Stringari *et. al.* (2020) e Filippini (2020), por se tratar de pórticos muito similares, comparou-se as suas de resistências. Os pórticos com uso de tirante apresentaram um aumento de resistência de 121% em comparação aos pórticos de Stringari *et. al.* e de 67% em comparação aos pórticos com reforço de Filippini. A média de ruptura dos pórticos de Stringari foram de 28,79 kN e os de Filippini foram de 38,02 kN.

As Figuras 41, 42, 43 e 44 ilustram os locais de ruptura das estruturas ensaiadas, evidenciando a rotação da ligação quando ocorreu a ruptura.



Figura 41 – Detalhes de ruptura do pórtico P1, nó D e nó F, respectivamente.

Fonte: Autor, 2021.



Figura 42 – Detalhes de ruptura do pórtico P2, nó D e nó F, respectivamente.

Fonte: Autor, 2021.





Figura 43 – Detalhes da ruptura do pórtico P3, vista frontal e em perspectiva do nó F e a vista frontal do nó E, respectivamente.

Fonte: Autor, 2021.



Figura 44 – Detalhes da ruptura do pórtico P4, vista frontal do nó D e vista frontal do nó F, respectivamente.

Fonte: Autor, 2021.

Outro fator importante que pode ser analisado por meio da Figura 45 é que os pórticos mais densos apresentaram uma maior resistência comparando-se aos menos densos. Esta é uma evidência relevante de que a densidade se relaciona positivamente com a resistência. Stringari *et. al.* (2020) apresenta dados que permitem afirmar que, naquela pesquisa, o coeficiente de correlação entre a densidade e resistência foi de 0,82. Neste caso a correlação apontou valor igual a 0,95. Como

consequência, fica a evidência da importância da seleção da madeira por meio da densidade.

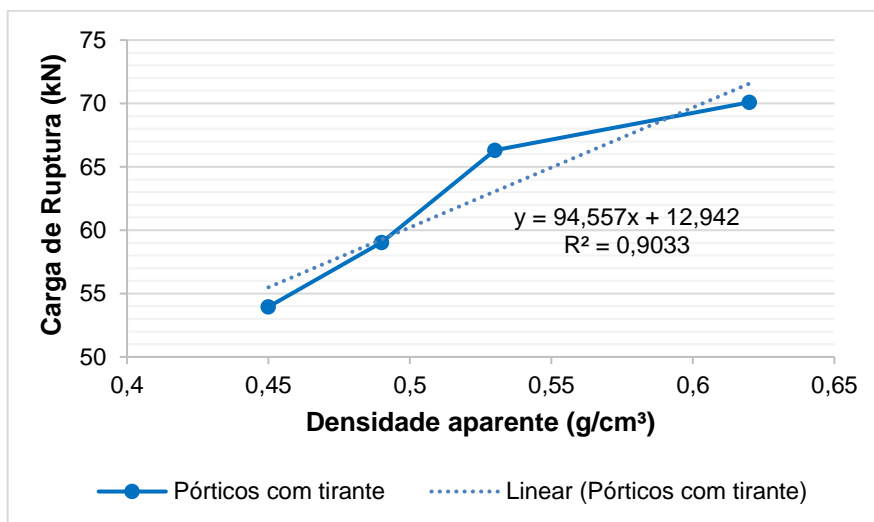


Figura 45 – Diagrama de resistência x densidade aparente dos pórticos com tirante.

Fonte: Autor, 2021.

#### 4.4.2 Rigidez apresentada pelas estruturas

Analisou-se a rigidez exibida pelas estruturas utilizando-se de três relógios comparadores, com resolução de 0,01 mm, localizados nos pontos apresentados na Figura 46. Os pontos foram definidos com base nos deslocamentos exibidos em análise feita por meio do programa Ftool.

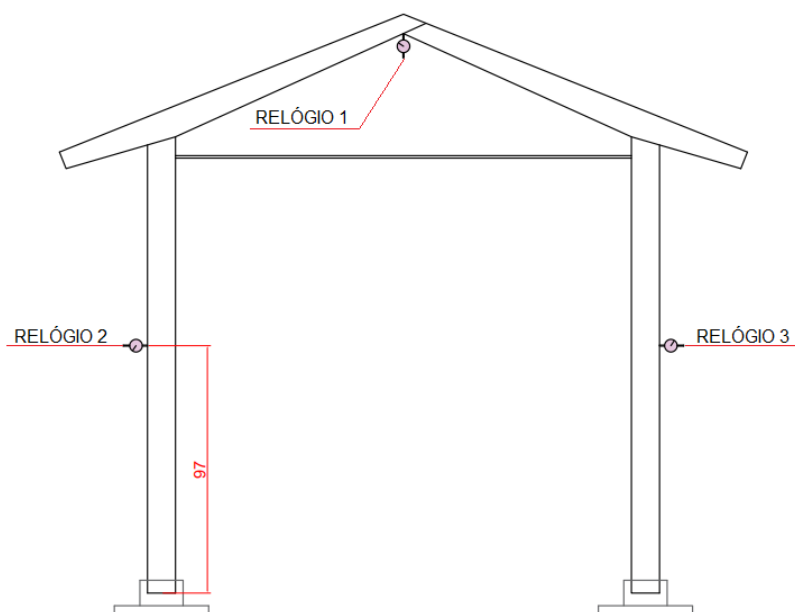


Figura 46 – Nomenclatura dos relógios comparadores.

Fonte: Autor, 2021.

As médias gerais dos deslocamentos exibidos nos relógios são apresentadas na Tabela 7, os valores correspondem às leituras médias feitas para o carregamento de 12 kN o que equivale à 18% da carga média de ruptura das estruturas. Utilizou-se este valor de carga uma vez que, em todos os ensaios, esta carga foi aplicada em dois ciclos de carregamento. Apresentou-se as médias dos valores de leitura dos relógios 2 e 3 por corresponderem a mesma posição para cada lado simétrico da estrutura.

Tabela 7 – Valores de deslocamentos médios (mm) para a carga de 12 kN

Pórtico	Relógio 1 (cumeeira)	Relógios 2 e 3 (pilares)
P1	3,69	1,08
P2	3,18	0,86
P3	2,92	0,97
P4	3,89	1,21
Média	3,42	1,03
Coeficiente de variação (%)	13,08	14,45

Fonte: Autor, 2021.

Calculou-se o coeficiente de variação com o intuito de verificar a variabilidade dos dados entre si. Os coeficientes de variação encontrados para o Relógio 1 e para os Relógios 2 e 3 foram de 13,08% e 14,45%, respectivamente. Os dados podem ser classificados como homogêneos por ter uma baixa dispersão.

Conforme se previa em teoria, as estruturas apresentaram um aumento de rigidez com a utilização do tirante. As estruturas ensaiadas por Stringari *et. al.* (2020) e Filippini (2020), que não utilizaram tirante, apresentaram na região da cumeeira deformações de 6,45 mm e 5,73 mm, respectivamente, para o carregamento total de 6,946 kN, significativamente menor que o aqui apresentado.

Em comparação as estruturas de Filippini (2020), onde o carregamento de 6,946 kN também corresponde à 18% da carga média de ruptura, os pórticos deste estudo exibiram deslocamentos 40% menor que o da pesquisadora na região da cumeeira.

Tratando-se da relação flecha/vão das estruturas, constatou-se o valor de 0,0018, significativamente menor que a relação das estruturas ensaiadas por Stringari *et. al.* (2020) e Filippini (2020) para o carregamento de 6,946 kN, onde os mesmos obtiveram valores de 0,0034 e 0,0028, respectivamente. Tais resultados evidenciam a melhor rigidez dos pórticos com o uso do tirante em relação aos pórticos sem a sua utilização.

Todas as estruturas testadas mostraram a mesma tendência de deslocamentos, conforme é ilustrado na Figura 47.

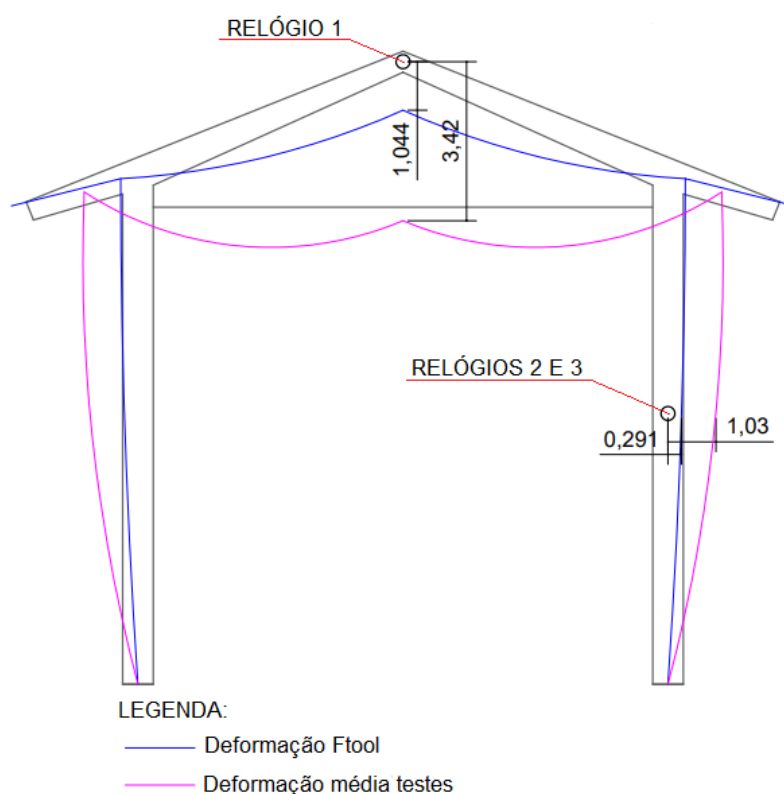


Figura 47 – Comparação entre o deslocamento estimado pelo programa Ftool e as médias dos deslocamentos obtidos pelas estruturas para um carregamento de 12 kN, em milímetros.

Fonte: Autor, 2021.

Os deslocamentos apresentados pelas estruturas foram maiores em comparação às estimativas do programa Ftool, tanto na cumeeira quanto nos pilares. Esta situação pode estar relacionada com eventual deficiência na protensão do tirante e, ainda, com deformações excessivas por compressão normal às fibras, na região de ancoragem dos tirantes. Isto fica evidente numa observação mais detalhada das Figuras 42 e 44.

Os gráficos de cargas x deslocamentos para o relógio 1 da cumeeira e para os relógios 2 e 3 referentes aos pilares são apresentados nas Figuras 48 e 49, respectivamente.

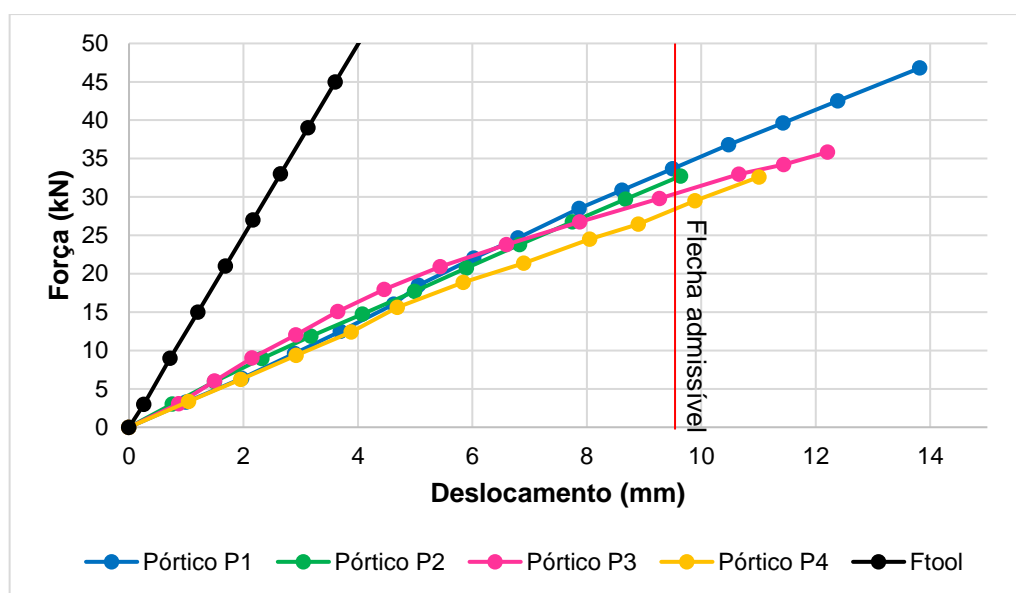


Figura 48 – Diagrama carga x deslocamento apresentado pelo relógio 1, cumeeira.

Fonte: Autor, 2021.

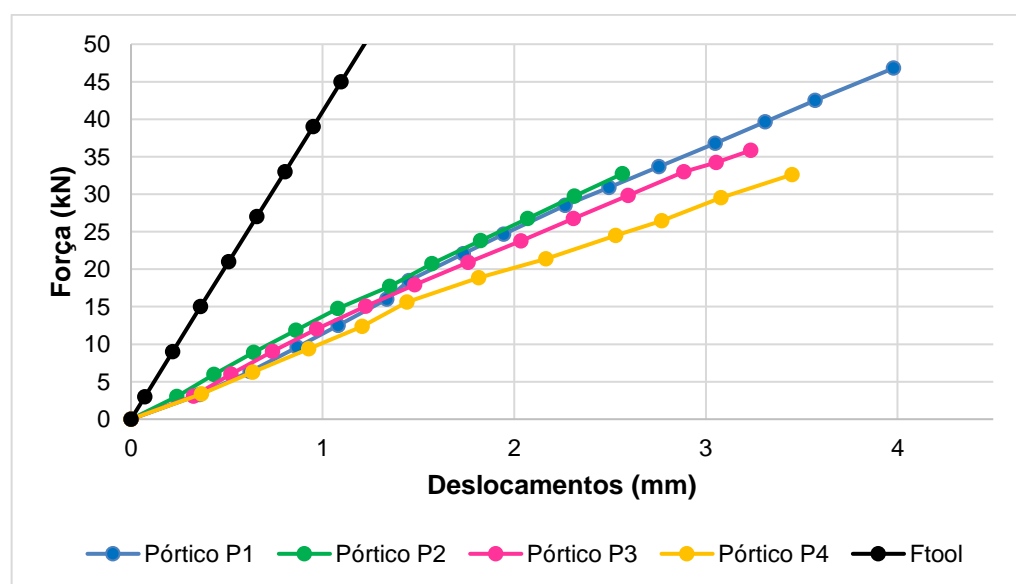


Figura 49 – Diagrama carga x deslocamento apresentado pelos relógios 2 e 3, pilares.

Fonte: Autor, 2021.

Segundo a NBR 7190 (ABNT, 1997), a flecha máxima admissível para este tipo de estrutura não deve ser maior que  $L/200$ , sendo  $L$  o vão livre da estrutura. Assim, para este estudo, a flecha máxima admissível é de 9,5 mm. A partir da Figura

49 nota-se que as estruturas só atingiram tal deformação com carregamentos acima de 30 kN, com exceção do Pórtico P4 que para a carga de 29,5 kN já exibiu um deslocamento de 9,9 mm. Já para os pilares, nenhuma das estruturas testadas chegou próximo ao valor da flecha máxima admissível.

Os deslocamentos das estruturas até a carga de 12 kN apresentaram comportamento semelhante. A partir de cargas mais elevadas, pode-se observar que os pórticos com maior densidade exibiram uma rigidez maior quando comparados aos pórticos de menor densidade. O mesmo comportamento foi constatado por Stringari *et. al.* (2020) em suas estruturas.

Embora o Pórtico P3 tenha uma densidade medianamente baixa, a estrutura apresentou inicialmente melhor rigidez na região da cumeeira comparando-se às outras estruturas. Estas deformações podem ter sido influenciadas pela geometria do pórtico que não apresentou a mesma precisão quanto ao ângulo de inclinação da barra de cobertura em relação aos demais pórticos.

Na Figura 50 é apresentado o diagrama carga x deslocamento médio para a região da cumeeira dos pórticos com tirante em comparação aos pórticos semelhantes sem a sua utilização, desenvolvidos por Stringari *et. al.* (2020) e Filippini (2020).

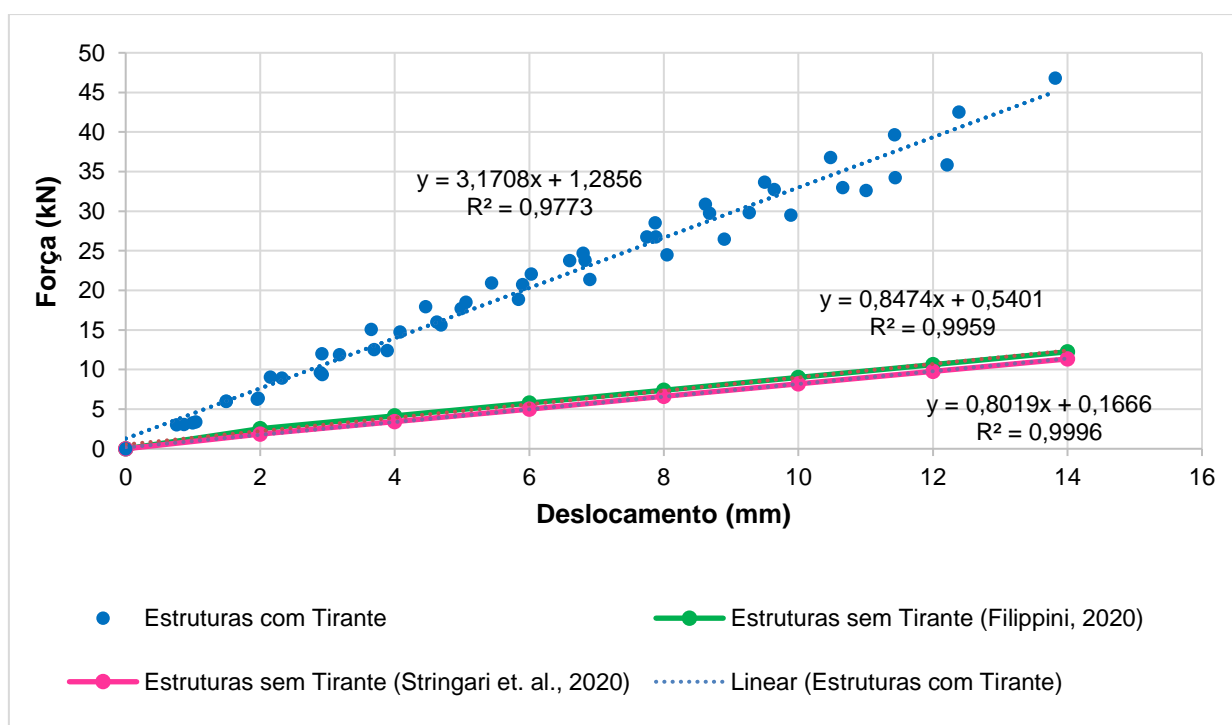


Figura 50 – Diagrama de carga x deslocamento das médias apresentadas pelo relógio da cumeeira para estruturas com tirante e sem tirante (Stringari *et. al.*, 2020; Filippini, 2020).

Fonte: Autor, 2021.

As estruturas com a utilização do tirante apresentaram deslocamentos inferiores às estruturas sem a sua utilização. A aplicação do tirante acarretou pórticos 3,95 vezes mais rígidos que ao de Stringari *et. al.* (2020) e 3,74 vezes mais rígidos que ao de Filippini (2020). Deste modo, fica evidente que o tirante contribui significativamente no aumento da rigidez da estrutura.



## 5 CONCLUSÕES

Consideradas as condições de desenvolvimento desta pesquisa e os critérios adotados para a análise, acerca dos pórticos em madeira laminada colada com tirante, pode-se concluir que:

- O critério geral adotado para as verificações de resistência mostrou-se consistente. Isto se justifica uma vez que o critério apontava risco de ruína para cargas totais superiores a 46,5 kN, na região da ligação;
- Quanto à resistência, as estruturas romperam para cargas variando entre 55 kN a 71,5 kN, com média de 63,6 kN. Estes valores compreenderam 1,37 vezes mais do que a carga de verificação estabelecida. Neste sentido, as estruturas executadas apresentaram comportamento resistente muito satisfatório;
- Quanto à rigidez, as estruturas exibiram deslocamentos menores comparando-se às estruturas sem o tirante, a exemplo de Stringari et. al. (2020) e Filippini (2020). Neste trabalho os pórticos só atingiram as flechas admissíveis para carregamentos totais da ordem de 30 kN, enquanto que as estruturas dos autores citados, chegaram a este limite para carregamentos da ordem de 10 kN;
- Comparando-se as estimativas de deslocamentos geradas pelo programa Ftool, as estruturas ensaiadas apresentaram deslocamentos significativamente maiores. Acredita-se que este problema possa estar associado à deficiência de protensão no tirante e ao esmagamento da madeira à compressão normal, na ancoragem do tirante;
- Obteve-se elevada correlação positiva entre a densidade aparente da madeira dos pórticos com suas resistências. O coeficiente de correlação encontrado foi da ordem de 0,95. Assim, evidencia-se que a seleção prévia da madeira a ser utilizada, principalmente em regiões mais solicitadas, acarreta um melhor desempenho da estrutura;
- De maneira geral, as evidências obtidas indicaram que o emprego de tirantes em pórticos laminados e colados promoveu a melhoria do desempenho mecânico quanto à resistência e rigidez. De maneira ilustrativa as estruturas

desta pesquisa apresentaram resistência 221% superior às de Stringari *et.al.* (2020) e 167% superior às de Filippini (2020);

Acredita-se que a inserção dos tirantes representou um aspecto inovador no contexto do desenvolvimento de pórticos em madeira laminada colada. Contudo, espera-se que ainda se possa melhorar seu desempenho mecânico e/ou econômico. Neste sentido, visando pesquisas futuras, recomenda-se:

- Execução de pórticos com tirantes e reforços na ligação, à semelhança do proposto por Filippini (2020);
- Utilização de diferentes adesivos, com adesivo de melhor desempenho na região da ligação e adesivo mais econômico nas regiões de menores solicitações;
- Execução de pórticos com redução de inércia nas barras dos pilares;
- Estudos mais conclusivos sobre ligações tirante-madeira.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFONSO, Ana Carolina Baptista. **O consumidor verde: perfil e comportamento de compra**. 2010. 117f. Dissertação (Mestrado em Marketing) – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010.

ALBINO, Vanessa Cristina do Sacramento. **Estudo do comportamento da colagem da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden com adesivo termoendurecedor resorcinol - formaldeído**. 2009. 89f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

ALMEIDA, Diego Henrique; SCALIANTE, Ricardo de Mello; MACEDO, Laurenn Borges de; MACÊDO, Alcebiades Negrão; DIAS, Antonio Alves; CHRISTOFORO, André Luis; CALIL JR., Carlito. Caracterização completa da madeira de espécie amazônica paricá (*Schizolobium amazonicum* HERB) em peças de dimensões estruturais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37. n. 6. p. 1175-1181, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 2559**: Standard Specification for adhesives for bonded structural wood products for use under exterior exposure conditions. Pennsylvania, 2016.

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, Mônica Duarte. **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.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto revisão NBR 7190**: Projeto de estruturas em madeira. Rio de Janeiro, 2011.

AZAMBUJA, Maximiliano dos Anjos; DIAS, Antonio Alves. Use of castor oil-based polyurethane adhesive in the production of glued laminated timber beams. **Materials Research**. v. 9. n. 3. p. 287-291, 2006.

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

BIANCHE, Juliana Jerásio. **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.

BISSOLI-DALVI, Márcia; FERRES, Soyana Corrêa; ALVAREZ, Cristina Engel de; FUICA, Gerardo Erich Saelzer. Avaliação da sustentabilidade da madeira por meio da ferramenta ISMAS. **Floresta e Ambiente**. v. 24. e00077214, 2017.

BRITO, Leandro Dussarrat; CALIL JR., Carlito. Manual de projeto e construção de estruturas com peças roliças de madeira de reflorestamento. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 12, n. 56, p. 57-77, 2010.

BRUNDTLAND, Gro Harlem. Our Common Future. **World Commission on Environment and Development**. Oxford University, Oxford University Press, 1987. Disponível em: <<http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>>. Acesso em: 19 abr. 2020.

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

CANADIAN WOOD COUNCIL. **Wood-Frame Housing – A North American Marvel**. Ottawa: CWC, 2002.

CARDOSO, Solange; NUNES, Lina; FARIA, Paulina. Utilização de colas naturais para placas de derivados de madeira – uma síntese. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**. v. 27, p. 143-151, 2015.

COURI PETRAUSKI, Sandra Maria Ferreira. **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.

COURI PETRAUSKI, Sandra Maria Ferreira. **Desenvolvimento e teste de pórticos treliçados feitos de madeira de *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus grandis* laminada e colada**. Viçosa, 1999. 129f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1999.

DESAI, Sandip. D.; PATEL, Jigar V.; SINHA, Vijay Kumar. Polyurethane adhesive system from biomaterial-based polyol for bonding wood. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, v. 23, p. 393-399, 2003.

DI MAURO, Fábio João Paulo. DEMARZO, Mauro Augusto. A Certificação da Madeira Destinada à Construção Civil e Estruturas. **XXXV Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural**, Rio de Janeiro, 19 a 21 set 2012.

DI MAURO, Fabio João Paulo. **Madeira na construção civil: da ilegalidade à certificação**. 2013. 267f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

FAO. **FAOSTAT**: Land Use. Rome, c2019. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/RL/visualize>>. Acesso em: 16 mai. 2020.

FILIPPINI, Daniele Finger. **Construção e ensaio de pórticos em madeira colada com reforço nas ligações**. 2020. 67f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, Cascavel, 2020.

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

FREAS, Alan D'Yarmett; SELBO, Magnus Leonard. **Fabrication and Design of Glued Laminated Wood Structural Members**. Washington: United States Department of Agriculture, 1954.

FRIHART, Charles R.; HUNT, Christopher G. Adhesives with wood materials bond formation and performance. **General Technical Report FPL-GTR-190**. Madison, chap. 10, 2010.

FUNDAÇÃO DOM CABRAL. **Relatório de pesquisa**: Como anda a gestão da sustentabilidade no setor da construção? Nova Lima, 2013.

GALEMBECK, Fernando; GANDUR, Marcelo Catanoe. Cientistas explicam o fenômeno da adesão. **Química e Derivados**, v. 399, p. 24-32, 2001. Disponível em: <<https://www.quimica.com.br/adesivos-cientistas-explicam-o-fenomeno-da-adesao/>>. Acesso em: 8 jun 2020.

GANDINI, João Marcelo Danza. **Aplicação de conceitos de sustentabilidade no desenvolvimento de projeto de componentes estruturais pré-fabricados com emprego de madeira de florestas plantadas**. 2016. 225f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

GERDAU. **Galpões em pórticos com perfis estruturais laminados**. 7 ed. 2018. Disponível em: <<https://www2.gerdau.com.br/downloadable-resource/galpoes-em-porticos-com-perfis-estruturais-laminados>>. Acesso em: 16 jun. 2020.

GOMES, Nádia Barros. **Análise de elementos estruturais de MLC na flexão com base na versão de revisão da norma ABNT NBR 7190: 2013**. 2018. 148f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018.

HORYUJI: A Brief History. **Horyuji Temple - 法隆寺**, 2020. Disponível em: <<http://www.horyuji.or.jp/en/garan/>>. Acesso em: 26 mai. 2020.

IBÁ e PÖYRY. **Relatório IBÁ 2019**. São Paulo: Studio 113, 2019.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura 2018**. Rio de Janeiro, v. 33, p. 1-8, 2018

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Dados Estatísticos**. São Paulo, 2020. Disponível em: <<https://www.iba.org/dados-estatisticos>>. Acesso em: 12 mai. 2020.

MARQUES, Jeanne Letícia da Silva. **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.

MARTENS, Mauro Luiz; KNISS, Claudia Terezinha; MARTENS, Cristina Dai Pra; MONTEIRO CARVALHO, Marly. Um estudo de inovação sustentável em projeto de desenvolvimento de produtos. **Exacta**, v. 14, n. 3. p. 477-494, 2016.

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

MIGLIANI, Audrey. O que é Madeira Laminada Colada (MLC ou Glulam)? **ArchDaily**, 2019. Disponível em: [https://www.archdaily.com.br/br/928061/o-que-e-madeira-laminada-colada-mlc-ou-glulam#:~:text=A%20madeira%20laminada%20colada%20\(MLC,resina%20de%20melamina%20ou%20poliuretano\)>](https://www.archdaily.com.br/br/928061/o-que-e-madeira-laminada-colada-mlc-ou-glulam#:~:text=A%20madeira%20laminada%20colada%20(MLC,resina%20de%20melamina%20ou%20poliuretano)>). Acesso em: 3 jun. 2020.

MIOTTO, José Luiz. **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.

ÓLEOS vegetais. **Campestre**, c2017. Disponível em: <http://www.campestre.com.br/oleos-vegetais/>. Acesso em: 6 jun. 2020.

OLIVEIRA, Leandro Rodrigues; BARIANI, Mário Henrique; ZAPPA, Vanessa. Utilização da mamona na medicina veterinária. **Revista Científica Eletrônica de Medicina Veterinária**. Garça, ano VII, n.12, 2009.

OLIVEIRA, Rafael Gonçalves Espósito de. **Desempenho da madeira laminada colada de eucalipto**. 2018, 70f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2018.

PETRAUSKI, Alfredo. **Comportamento de ligações adesivas e avaliação experimental de tesouras de telhados feitas de laminado colado em madeira de *Eucalyptus grandis***. 2000, 128f. Dissertação (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000.

PETRAUSKI, Alfredo; COURI PETRAUSKI, Sandra Maria Ferreira; DELLA LUCIA, Ricardo Marius; PETRAUSKI; Mateus Couri. Methodology and device to obtain torsional shear strength of glued joints. **Floresta**, Curitiba, v. 50, n. 4, p. 1921-1930, 2020.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de madeira**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

PIZZI, Antonio. **Advanced wood adhesives technology**. 1 ed. Boca Raton: CRC Press, 1994.

PIZZI, Antonio. Recent developments in eco-efficient bio-based adhesives for wood bonding: opportunities and issues. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 20, n. 8, p. 829-846, 2006.

PRODUTOS madeireiros e não madeireiros. **Ministério do Meio Ambiente**, 2020. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/florestas/manejo-florestal-sustent%C3%A1vel/produtos-madeireiros-e-n%C3%A3o-madeireiros.html>>. Acesso em: 08 mai. 2020.

SCHERER, Reinaldo. SCHERER, Edelar. Projeto interno telha francesa. **Cerâmica São Luiz**, 2012. Disponível em: <<http://ceramicasaoluiz.ind.br/produtos/telha/Francesa>>. Acesso em: 13 out. 2019.

SCOTT, Gerald. **Mechanisms of Polymer Degradation and Stabilisation**. Elsevier Applied Science: London, 1990.

SEGUNDINHO, Pedro Gutemberg de Alcântara; FRANÇA, Lélío Caiado Abreu; NETO, Pedro Nicó de Medeiros; GONÇALVES, Fabricio Gomes; OLIVEIRA, José Tarcisio da Silva. Madeira lamelada colada (MLC) com *Acacia mangium* e adesivos estruturais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 107, p.533-540, 2015.

SHARMA, Vinay; KUNDU, Patit Paban. Condensation polymers from natural oils. **Progress in Polymer Science**. v.33, p. 1199–1215, 2008.

SILVA, Bianca Bairros Rabello 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, Cristina Evangelista. **Sistema de cobertura com pórticos de estabilização bidirecionais em perfis metálicos de seção circular com costura para construção residencial industrializada**. 2011. 181f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

SILVA, Simone Adriane da. **Síntese e caracterização de poliuretanos – espumas flexíveis puras e compósitos a partir de polióis à base de óleo de milho: adesivos à base de derivados de óleo de ricino**. 2014, 208f. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

SOMANI, Keyur P., KANSARA, Sujata S., PATEL, Natvar K. & RAKSHIT, Animesh K. Castor oil based polyurethane adhesives for wood-to-wood bonding. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 23, p. 269– 275, 2003.

SOUZA, Marta Francisca Suassuna Mendes de; RODRIGUES, Rafael Bezerra; MASCIA, Nilson Tadeu. **Sistemas estruturais de edificações e exemplos**. Apostila do Departamento de Estruturas da Universidade Estadual de Campinas, 2008.

STRINGARI, Eduardo Henrique. **Construção e ensaio de pórticos em madeira laminada colada visando emprego em aviários de postura**. 2019. 64f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2019.

STRINGARI, Eduardo Henrique; PETRAUSKI, Alfredo; COURI PETRAUSKI, Sandra Maria Ferreira; AZEVEDO, Ricardo Lessa; SAVARIS, Gustavo. 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.

SZÜCS, Carlos Alberto; TEREZO, Rodrigo Figueiredo; VALLE, Angela do; MORAES, Poliana Dias de. **Estruturas de Madeira**. Apostila do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

TAMBOSI, Silvana Silva Vieira; MONDINI, Vanessa Edy Dagnoni; BORGES, Gustavo da Rosa; HEIN, Nelson. Consciência ambiental, hábitos de consumo sustentável e intenção de compra de produtos ecológicos de alunos de uma IES de Santa Catarina. **Revista Eletrônica de Administração e Turismo**, v. 5, n. 3, 2014.

ULANOVICZ, Murilo Barbosa. **Construção e ensaio de viga em perfil I com madeira laminada colada**. 2019. 58f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2019.

VALERO, Manuel F.; PULIDO, Jorge E.; RAMÍREZ, Álvaro. Síntesis de poliuretanos a partir de polioles obtenidos a partir del aceite de higuera modificado por transesterificación con pentaeritritol. **Quim. Nova**, v. 31, n. 8, p. 2076–2082, 2008.

VILAR, Wagner. **Química e Tecnologia dos Poliuretanos**. 3 ed. 2004. Disponível em: <<https://www.poliuretanos.com.br/>>. Acesso em: 9 jun. 2020.

WECHSLER, A. ZAHARIA, M. CROSKY, A. JONES, H. RAMIREZ, M. BALLERINI, A. NUNEZ, M. SAHAJWALLA, V. Macadamia (*Macadamia integrifolia*) shell and castor (*Ricinus communis*) oil based sustainable particleboard: A comparison of its properties with conventional wood based particleboard. **Materials and Design**, v. 50, p. 117-123, 2013.

WEI, Shen Chiao. **Caracterização da madeira de *Araucaria angustifolia* e projeto de pórticos em madeira laminada colada para cobertura metálica**. 2017. 76f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2017.

WIRPSZA, Zygmunt. **Polyurethanes**: chemistry, technology and applications. Ellis Horwood: Michigan, 1993.

ZANGIÁCOMO, André Luiz. **Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada**. 2003. 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

ZENID, Geraldo José. **Madeira**: uso sustentável na construção civil. 2. ed. São Paulo: IPT, 2009.



## APÊNDICES

### APÊNDICE A

Classificação e caracterização das peças de madeira.

Tabela 8 – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade na compressão

<b>Corpo de prova</b>	<b>d (g/cm³)</b>	<b>Ruptura (kN*)</b>	<b>Ec0 (MPa)</b>	<b>U (%)</b>	<b>Ec0 12% (MPa)</b>
1.1	0,730	168,4	16744	9,82	16016
1.2	0,721	159,8	20258	9,96	19431
3.1	0,602	124	10517	9,86	10066
3.2	0,627	120,9	12093	9,56	11502
4.1	0,570	114,4	11996	9,75	11457
4.2	0,576	125,4	14917	9,69	14227
6.1	0,534	129,1	14128	9,97	13553
6.2	0,542	132,4	14567	9,65	13882
7.1	0,487	123,5	14863	9,51	14122
7.2	0,492	121,5	13737	9,56	13066
9.1	0,484	109,4	12483	9,54	11869
9.2	0,485	114,5	12756	9,86	12210
10.1	0,460	102,4	11398	9,67	10867
10.2	0,462	106,2	11249	9,63	10716
12.1	0,428	100,4	10313	9,42	9780
12.2	0,438	102,8	11036	9,93	10579

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

Tabela 9 – Resultados do ensaio de compressão paralela as fibras

<b>Corpo de prova</b>	<b>d (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Ruptura (kN*)</b>	<b>fc0 (MPa)</b>	<b>U (%)</b>	<b>fc0 12% (MPa)</b>
1.1	0,730	168,4	67,36	9,82	62,97
1.2	0,721	159,8	63,91	9,96	59,99
3.1	0,602	124	49,61	9,86	46,42
3.2	0,627	120,9	48,37	9,56	44,83
4.1	0,570	114,4	45,75	9,75	42,67
4.2	0,576	125,4	50,15	9,69	46,67
6.1	0,534	129,1	51,62	9,97	48,47
6.2	0,542	132,4	52,97	9,65	49,23
7.1	0,487	123,5	49,38	9,51	45,68
7.2	0,492	121,5	48,58	9,56	45,03
9.1	0,484	109,4	43,78	9,54	40,55
9.2	0,485	114,5	45,8	9,86	42,86
10.1	0,460	102,4	40,96	9,67	38,1
10.2	0,462	106,2	42,49	9,63	39,47
12.1	0,428	100,4	40,16	9,42	37,06
12.2	0,438	102,8	41,12	9,93	38,56

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

Tabela 10 – Resultados do ensaio de cisalhamento paralela as fibras

<b>Corpo de prova</b>	<b>d (g/cm³)</b>	<b>Ruptura (kN*)</b>	<b>fv0 (MPa)</b>	<b>U (%)</b>	<b>fv0 12% (MPa)</b>
1.1	0,738	40,3	17,6	10,30	16,71
1.2	0,715	44,3	19,28	10,45	18,38
2.1	0,632	34,3	14,96	10,35	14,22
2.2	0,636	36,4	15,93	10,67	15,29
2.3	0,640	35,2	15,11	10,51	14,43
2.4	0,627	34,1	14,91	10,75	14,36
2.5	0,640	32,85	14,34	10,25	13,59
2.6	0,639	34,25	14,98	10,13	14,14
3.1	0,618	35,9	15,64	10,10	14,75
3.2	0,637	33,4	14,57	11,06	14,16
4.1	0,588	31,3	13,42	9,84	12,55
4.2	0,568	31,9	13,86	10,00	13,03
5.1	0,546	31	13,48	10,53	12,89
5.2	0,558	30,2	13,13	10,38	12,49
5.3	0,561	28,85	12,54	10,18	11,86
5.4	0,565	28	12,22	10,17	11,55
5.5	0,561	30,45	13,27	9,80	12,4
5.6	0,561	29,8	13,03	9,89	12,2
6.1	0,542	27,9	12,2	10,30	11,58
6.2	0,550	23,6	10,28	9,82	9,61
7.1	0,492	21,65	9,44	10,76	9,09
7.2	0,501	27,2	11,76	10,95	11,39
8.1	0,478	24,7	10,75	10,46	10,25
8.2	0,494	27,15	11,8	10,00	11,09
8.3	0,507	26,4	11,49	10,57	11
8.4	0,520	26,6	11,57	10,00	10,88
8.5	0,512	23,2	10,1	9,77	9,42
8.6	0,509	26,2	11,46	10,00	10,77
9.1	0,488	29,2	12,78	10,63	12,25
9.2	0,488	27,95	12,08	10,51	11,54
10.1	0,471	22,2	9,69	10,08	9,13
10.2	0,451	21,6	9,39	10,57	8,99
11.1	0,433	21,5	9,33	10,86	9,01
11.2	0,422	21,7	9,47	10,61	9,07
11.3	0,425	19,9	8,65	10,09	8,16
11.4	0,425	18,9	8,32	10,31	7,89
11.5	0,426	19,8	8,61	10,44	8,21
11.6	0,434	21,9	9,57	8,71	8,62
12.2	0,451	19,1	8,3	9,67	7,72

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

Tabela 11 – Resultados do ensaio de cisalhamento à compressão de juntas coladas com as fibras paralelas entre si

<b>Corpo de prova</b>	<b>d (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Ruptura (kN*)</b>	<b>fvc0 (MPa)</b>	<b>U (%)</b>	<b>fv0 12% (MPa)</b>
1.1	0,664	16,9	8,38	9,57	7,77
1.2	0,667	24,75	12,23	9,18	11,2
1.3	0,676	18	8,89	9,42	8,2
1.4	0,680	27,2	13,5	10,03	12,71
2.1	0,582	24,7	12,26	10,12	11,57
2.2	0,603	20	9,93	10,28	9,42
2.3	0,613	20	9,86	9,96	9,26
2.4	0,613	26,25	12,83	10,07	12,08
3.1	0,631	27,7	13,6	9,68	12,65
3.2	0,627	29,2	14,38	9,73	13,4
3.3	0,608	23,8	11,78	9,61	10,93
3.4	0,587	23,7	11,69	9,73	10,89
4.1	0,530	21,75	10,81	10,33	10,27
4.2	0,542	19	9,21	9,84	8,61
4.3	0,537	24,2	11,96	10,22	11,32
4.4	0,528	23,55	11,76	10,36	11,18
5.1	0,503	24,2	11,95	9,56	11,08
5.2	0,500	23,75	11,75	9,55	10,88
5.3	0,499	19,8	9,79	9,95	9,19
5.4	0,493	26,55	13,1	9,26	12,02
6.1	0,455	23,85	11,71	9,52	10,84
6.2	0,461	20,7	10,22	9,48	9,45
6.3	0,469	20,9	10,28	9,30	9,45
6.4	0,471	24	11,85	8,88	10,74
7.1	0,434	19,25	9,5	9,84	8,89
7.2	0,459	17,4	8,55	8,76	7,72
7.3	0,468	17,5	8,58	9,45	7,93
7.4	0,478	21,15	10,41	9,05	9,49
8.1	0,445	25,5	12,28	9,48	11,36
8.2	0,445	18,6	9,18	9,31	8,44
8.3	0,441	20,9	10,34	9,48	9,56
8.4	0,446	25,65	12,29	8,70	11,07

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

Tabela 12 – Resultados do ensaio de cisalhamento à compressão de juntas coladas com as fibras perpendiculares entre si

<b>Corpo de prova</b>	<b>d (g/cm³)</b>	<b>Ruptura (kN*)</b>	<b>fvc90 (MPa)</b>	<b>U (%)</b>	<b>fvc90 12% (MPa)</b>
1.1	0,664	15,4	7,45	9,36	6,86
1.2	0,665	14,2	6,86	7,90	6,01
1.3	0,705	13,55	6,61	10,00	6,22
2.1	0,624	9,15	4,49	8,96	4,09
2.2	0,636	8,15	3,98	9,69	3,7
2.3	0,613	10,3	4,96	9,32	4,56
2.4	0,629	17,7	8,63	9,66	8,02
3.1	0,693	12,1	5,93	9,54	5,5
3.2	0,562	9,5	4,67	8,76	4,22
3.3	0,566	8,7	4,29	9,52	3,97
4.1	0,508	6,4	3,13	9,21	2,87
4.2	0,524	7,5	3,67	10,17	3,47
4.3	0,535	5,35	2,62	9,79	2,44
4.4	0,546	6,2	3,02	9,36	2,78
5.1	0,517	6	2,95	9,73	2,76
5.2	0,494	8,65	4,21	8,85	3,81
5.3	0,513	6,6	3,26	9,48	3,01
6.1	0,465	6,3	3,11	8,87	2,82
6.2	0,463	7,9	3,85	9,57	3,57
6.3	0,466	7,2	3,52	8,49	3,15
7.1	0,460	11,1	5,45	9,29	5,01
7.2	0,457	9,35	4,64	9,14	4,24
7.3	0,459	7,1	3,53	9,52	3,27
8.1	0,444	7,4	3,62	9,50	3,35
8.2	0,432	6,8	3,35	9,34	3,09
8.3	0,427	8,15	4	9,42	3,69

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

Tabela 13 – Resultados do ensaio de cisalhamento à torção de juntas coladas com as fibras paralelas entre si

<b>Corpo de prova</b>	<b>d (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Ruptura (kN*)</b>	<b>fvt0 (MPa)</b>	<b>U (%)</b>	<b>fvt0 12% (MPa)</b>
1.1	0,659	2,2	8,51	9,46	7,86
1.2	0,675	2,45	9,51	10,59	9,11
1.3	0,689	2,7	10,29	10,18	9,73
1.4	0,688	2,7	10,22	10,03	9,62
2.1	0,581	3,55	13,5	10,91	13,06
2.2	0,593	3	11,76	9,89	11,02
2.3	0,603	3,1	11,95	10,77	11,51
2.4	0,626	3,45	13,12	10,86	12,67
3.1	0,633	2,6	10,07	10,06	9,48
3.2	0,621	2,5	9,63	10,38	9,16
3.3	0,596	2,4	9,27	10,65	8,9
3.4	0,572	2	7,58	9,60	7,03
4.1	0,535	2,35	8,43	10,82	8,13
4.2	0,537	2,5	9,67	11,11	9,42
4.3	0,540	2,2	8,74	10,89	8,45
4.4	0,529	2,15	8,31	10,64	7,97
5.2	0,496	1,9	7,29	10,34	6,93
5.3	0,499	2,5	9,58	10,04	9,02
5.4	0,489	2,45	9,47	9,91	8,87
6.1	0,459	2	8,11	9,59	7,52
6.2	0,456	2,3	9,09	9,25	8,34
6.3	0,464	2,15	8,43	10,48	8,04
6.4	0,470	1,7	6,54	10,26	6,2
7.1	0,441	1,9	7,16	9,95	6,72
7.2	0,461	1,7	6,45	10,85	6,23
7.3	0,475	1,8	6,74	10,19	6,37
7.4	0,479	1,8	6,83	10,38	6,5
8.1	0,444	1,8	6,75	11,01	6,55
8.2	0,451	2,1	8,05	10,23	7,62
8.3	0,446	1,9	7,17	9,31	6,59
8.4	0,442	2,2	8,43	9,86	7,88

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

Tabela 14 – Resultados do ensaio de cisalhamento à torção de juntas coladas com as fibras perpendiculares entre si

Corpo de prova	d (g/cm <sup>3</sup> )	Ruptura (kN*)	fvt0 (MPa)	U (%)	fvt0 12% (MPa)
1.1	0,662	1,8	7,2	10,56	6,89
1.2	0,708	2,45	9,51	10,13	8,97
1.3	0,674	2,15	8,35	10,46	7,96
2.1	0,633	2,1	7,89	10,39	7,51
2.2	0,602	1,35	5,17	10,51	4,94
2.3	0,631	2	7,66	9,79	7,15
2.4	0,612	1,3	4,93	10,62	4,72
3.1	0,559	2	7,42	9,91	6,95
3.2	0,586	2	7,49	11,11	7,29
3.3	0,540	2	7,41	10,27	7,03
4.1	0,527	1,25	4,86	10,68	4,63
4.2	0,532	1,3	4,85	10,66	4,66
4.3	0,516	0,7	2,82	10,04	2,65
4.4	0,537	1,4	5,4	10,44	5,15
5.2	0,507	1,4	5,34	9,92	5,01
5.3	0,511	1,5	5,94	10,29	5,64
6.1	0,467	1,2	4,66	10,55	4,45
6.2	0,458	0,7	2,63	10,43	2,51
6.3	0,463	1,1	4,16	9,545	3,85
7.1	0,466	1,45	5,43	10,68	5,22
7.2	0,458	1,4	5,33	11,06	5,19
7.3	0,438	1,6	5,79	9,90	5,43
8.1	0,435	1,1	4,25	10,65	4,05
8.2	0,437	0,8	3,2	10,53	3,06
8.3	0,429	1,4	5,38	11,17	5,25

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

Tabela 15 – Resultados do ensaio de tração na flexão

Corpo de prova	d (g/cm <sup>3</sup> )	Ruptura (kN*)	fM (MPa)	U (%)	fM 12%(MPa)
1	0,418	2,6	47,94	15,68	53,22
2	0,457	3,2	59,23	15,57	65,57
3	0,493	3,35	62,19	14,29	66,45
4	0,475	3,2	59,23	14,76	64,13
5	0,535	3,9	72,18	15,34	79,41
6	0,686	5,6	104,2	14,56	112,21
7	0,697	5,3	98,46	14,69	106,4

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

Tabela 16 – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade na flexão

<b>Corpo de prova</b>	<b>d (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Ruptura (kN*)</b>	<b>E (MPa)</b>	<b>U (%)</b>	<b>EM 12%(MPa)</b>
1	0,418	2,6	5868	15,68	6515
2	0,457	3,2	7850	15,57	8691
3	0,493	3,35	10286	14,29	10991
4	0,475	3,2	8646	14,76	9362
5	0,535	3,9	11472	15,34	12621
6	0,686	5,6	19244	14,56	20724
7	0,697	5,3	11813	14,69	12765

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



## APÊNDICE B

Diagramas gerados pelo programa Ftool.

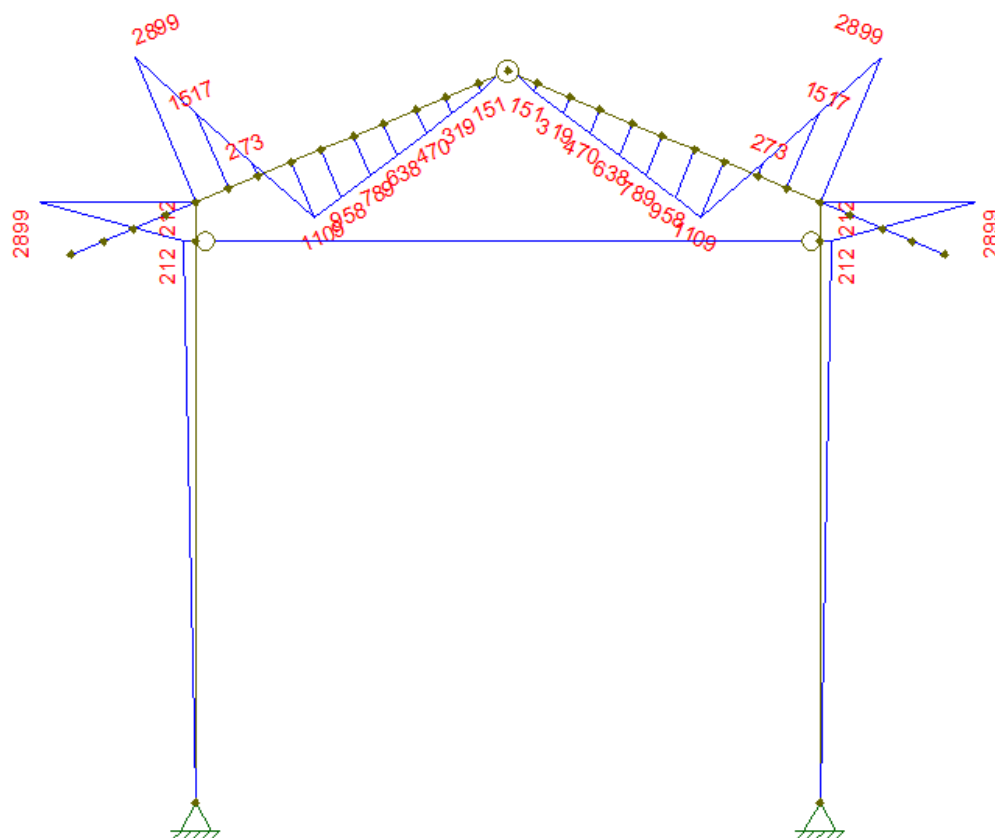


Figura 51 – Diagrama de momento fletor para a carga de 46,5 kN, em N.m.

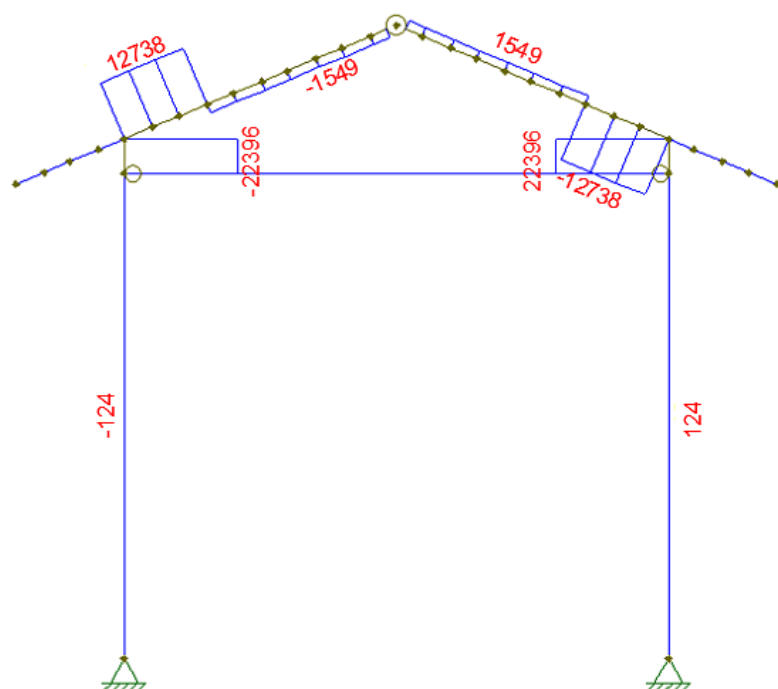


Figura 52 – Diagrama de esforço cortante para a carga de 46,5 kN, em N.

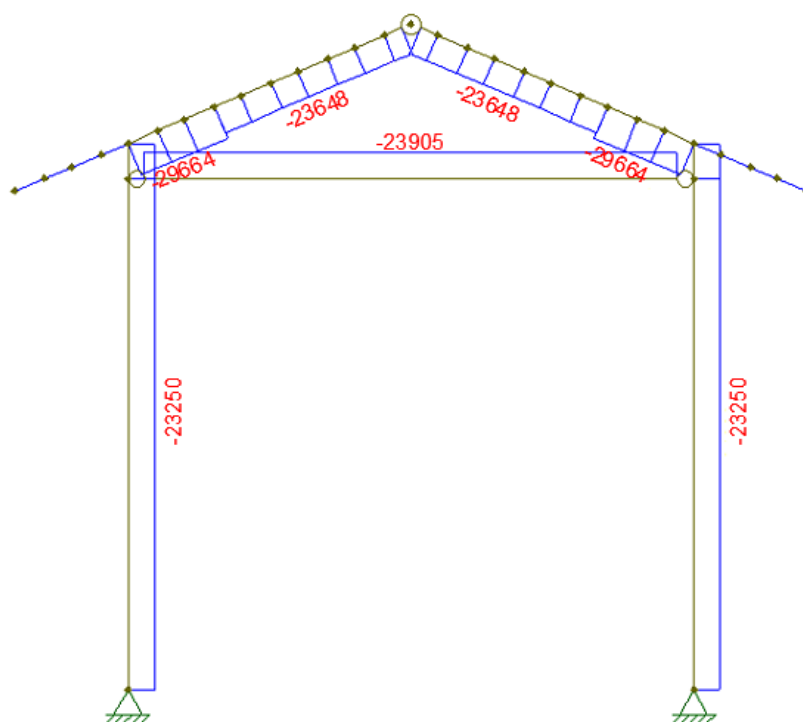


Figura 53 – Diagrama de esforço normal para a carga de 46,5 kN, em N.