

DANIELE FINGER FILIPPINI

CONSTRUÇÃO E ENSAIO DE PÓRTICOS EM MADEIRA COLADA
COM REFORÇO NAS LIGAÇÕES

CASCABEL
PARANÁ – BRASIL
MARÇO – 2020

DANIELE FINGER FILIPPINI

**CONSTRUÇÃO E ENSAIO DE PÓRTICOS EM MADEIRA COLADA
COM REFORÇO NAS LIGAÇÕES**

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

Orientador: Prof. Dr. Alfredo Petrauski

CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
MARÇO – 2020

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

Filippini, Daniele Finger

Construção e ensaio de pórticos em madeira colada com reforço nas ligações / Daniele Finger Filippini; orientador(a), Alfredo Petruski, 2020.

56 f.

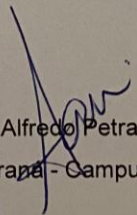
Dissertação (mestrado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, 2020.

1. Estruturas de madeira. 2. Madeira laminada colada.
3. Pórticos. I. Petruski, Alfredo. II. Título.

DANIELE FILIPPINI

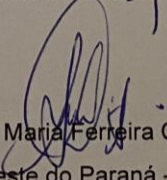
Construção e ensaio de pórticos em madeira colada com reforço nas ligações

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



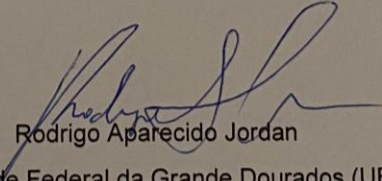
Orientador(a) - Alfredo Petrauski

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



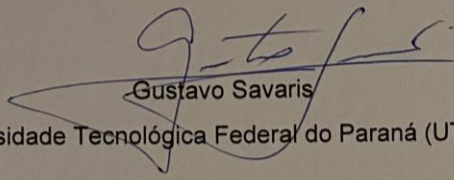
Sandra Maria Ferreira Couri Petrauski

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



Rodrigo Aparecido Jordan

Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD)



Gustavo Savaris

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Cascavel, 11 de março de 2020

*“Podem abalar-se montanhas e águas
Rochedos derreter-se como cera diante de vossa face:
Para aqueles que vos temem sereis sempre propício.”*

- Livro de Judite 16, 15

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, meu carinhoso Pai, a essência do meu ser;

Aos meus pais e irmã, por serem os responsáveis por tudo que tenho. Saibam que vocês são o motivo da minha vida;

Ao Eduardo, meu companheiro de profissão e de vida, por despertar em mim as alegrias de partilhar a vida com quem se ama;

Aos meus avós Osvaldo, Olímpio e Libera pelo exemplo de vida, e à vó Ida que nos enche de eterna saudade;

Aos meus familiares, tão presentes no meu dia-a-dia, por me rodearem de carinho e alegrias;

Ao meu orientador e amigo, Professor Petrauski, pela orientação e compreensão, por acreditar em mim mais uma vez e fazer essa conquista possível;

À Professora Sandra, pela ajuda na graduação e pós graduação, pelos conselhos, amizade e por sempre nos alegrar com sua presença;

Aos membros da banca, pela disponibilidade e participação, pelas melhorias propostas que enriqueceram este trabalho;

Aos Engenheiros Maxer, Desirè, Padilha, Murilo e Letícia, pela disposição e auxílio constante nos experimentos;

Aos Engenheiros e amigos Shen, Ana e Stringari pelos valiosos dados;

A CAPES, por possibilitar a realização deste trabalho por meio da bolsa concedida;

Ao LEME e à Coordenação da Pós-Graduação pelo auxílio financeiro concedido para a compra do adesivo; e,

À UNIOESTE pela formação gratuita e de qualidade para tantos estudantes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Composição da área de árvores plantadas por segmento de utilização em 2018.	4
Figura 2 – Sobreposição das lâminas na vertical (a) e (b), e na horizontal (c).....	6
Figura 3 – Geometria básica adotada pela cooperativa LAR para aviários de postura.	16
Figura 4 – Geometria final do pórtico em escala reduzida (em cm).	17
Figura 5 – Carga de projeto final (em kN) para o pórtico reduzido (em cm).....	17
Figura 6 – Detalhe da configuração do pilar (a), viga de cobertura (b) e transpasse das peças (c) para formar a ligação.	19
Figura 7 – Área de uma ligação colada sujeita aos esforços de momento, normais e de cisalhamento.	24
Figura 8 – Detalhe do pórtico com reforço na ligação.	26
Figura 9 – Pontos de aplicação de carga no teste-piloto (em cm).....	27
Figura 10 – Diagrama carga x deslocamento na cumeeira.	27
Figura 11 – Ruptura por tração perpendicular às fibras em estrutura sem reforço. ..	28
Figura 12 – Solução final das ligações com reforço.	29
Figura 13 – Mesa de prensagem (a) e sistema de aquisição de dados (b).....	30
Figura 14 – Quadro de reações.....	31
Figura 15 – Disposição geral dos aparatos para o teste.	32
Figura 16 – Pórtico e aparatos instalados para o teste.	33
Figura 17 – Bandejas para aplicação de carga nos beirais.....	33
Figura 18 – Detalhes de ruptura do pórtico 1, nó C, vistas lateral e interna.....	36
Figura 19 – Detalhes de ruptura do pórtico 2, vista superior do nó C e frontal do nó D, respectivamente.	37
Figura 20 – Detalhes de ruptura do pórtico 3, vistas frontais dos nós C e D, respectivamente.	37
Figura 21 – Detalhe de ruptura do pórtico 4, nó E.....	37
Figura 22 – Detalhes de ruptura do pórtico 5, vista frontal dos nós C e D, respectivamente.	38
Figura 23 – Nomenclatura dos relógios comparadores.....	44
Figura 24 – Esquema de deformação apresentada pelos pórticos a partir do Ftool.	44
Figura 25 – Comparação entre o deslocamento esperado pelo Ftool, média dos deslocamentos obtidos pelas estruturas sem reforço (Stringari, 2019) e com reforço, em mm, para carregamento de projeto.	46
Figura 26 – Diagrama carga x deslocamento apresentado pelo relógio 1, cumeeira, com aplicação de carga nos beirais.	47
Figura 27 – Diagrama carga x deslocamento apresentado pelo relógio 1, cumeeira, sem aplicação de carga nos beirais.	47
Figura 28 – Diagrama de carga x deslocamento das médias apresentadas pelo relógio 1, para as estruturas com reforço e sem reforço (Stringari, 2019), com carregamento nos beirais.	48
Figura 29 – Diagrama de carga x deslocamento das médias apresentadas pelo relógio 1, para as estruturas com reforço e sem reforço (Stringari, 2019), sem carregamento nos beirais.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização da madeira e resistências características ao cisalhamento das juntas coladas.....	15
Tabela 2 – Esforços de cálculo atuantes no nó C	20
Tabela 3 – Valores de resistência das estruturas.....	35
Tabela 4 – Estimativas dos esforços médios atuantes na ligação rígida, no momento da ruptura.....	40
Tabela 5 – Tensões estimadas no momento da ruptura, comparativamente às tensões resistentes, para as estruturas reforçadas.....	41
Tabela 6 – Valores de deslocamento médios (mm) para carga de projeto (6,946 kN) para os testes com carregamento no beiral	45

FILIPPINI, Daniele Finger. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, março de 2020. **Construção e ensaio de pórticos em madeira colada com reforço nas ligações**. Professor Orientador: Dr. Alfredo Petrauski.

RESUMO

Materiais provenientes de fontes renováveis vêm sendo cada vez mais utilizados na construção civil a fim de reduzir os processos de aumento da temperatura global. A utilização da madeira para finalidades estruturais apresenta-se como uma solução ambientalmente vantajosa nesse quesito, especialmente se provinda de florestas plantadas. Um dos sistemas estruturais mais utilizados no Brasil para execução de galpões compreende o uso de pórticos, compostos por pilares e vigas trabalhando em conjunto, que são utilizados geralmente em construções rurais, comerciais e industriais. Apesar de eficazes, análises experimentais do comportamento de pórticos em madeira laminada colada (MLC) são raros. Ainda, pesquisas recentes com pórticos em MLC despertam para a possibilidade de otimização desses sistemas utilizando reforços em pontos chave desse tipo de estrutura. Após um teste-piloto, conduzido com uma estrutura remontada de Stringari (2019), obteve-se um aumento de resistência de 42% quando da inclusão de reforços laterais nas ligações principais das estruturas utilizadas pelo pesquisador. Assim, o presente trabalho teve por finalidade construir e ensaiar cinco pórticos em madeira laminada colada, confeccionados utilizando madeira da espécie *Araucaria angustifolia* e adesivo de poliuretano à base de óleos vegetais. Os pórticos mantiveram a geometria do trabalho de Stringari (2019), porém com reforços nas ligações entre as vigas de cobertura e os pilares. Os valores de força de ruptura das estruturas foram em média 38,02 kN, aproximadamente 5,47 vezes a carga de projeto e representaram um aumento de 32% de resistência se comparadas às estruturas não reforçadas de Stringari (2019). Os deslocamentos observados, com destaque para a cumeeira, não atingiram o limite normativo brasileiro para a carga de projeto e apresentaram comportamento linear para forças superiores a três vezes às de projeto. Desta forma, as estruturas apresentaram um comportamento estrutural satisfatório e a utilização de MLC e do adesivo à base de óleos vegetais pode ser considerada viável para a execução de pórticos.

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

PALAVRAS-CHAVE: estruturas de madeira; madeira laminada colada; pórticos.

FILIPPINI, Daniele Finger. State University of West Paraná, March 2020. **Construction and testing of frame structures in glued laminated timber and with reinforcements in connections**. Advisor Professor: Dr. Alfredo Petrauski.

ABSTRACT

Building materials from sustainable sources have been increasingly used in construction sites in order to avoid the processes of global warming. Using wood for structural purposes has presented itself as an environmentally advantageous solution, especially if it comes from planted forests. One of the most used structural systems in Brazil for building sheds are portics. They are structures composed of pillars and beams working together as one, which are generally used in rural, commercial and industrial construction. Although effective, experimental analyzes of glued laminated timber portics behavior – glulam portics are still rare. In addition, recent researches with glulam frame structures raise the possibility of optimizing these systems using reinforcements at specific key points of the structure. After an initial test, conducted with the reassembled structure from Stringari (2019), a 42% increase in strength was obtained when including lateral reinforcements in the main connections of the researcher's structures. Therefore, the purpose of the present work is to build and test five framed structures of glued laminated timber, built using *Araucaria angustifolia* wood and polyurethane adhesive based on vegetable oils. The frames maintained the geometry of Stringari's (2019) work, but with reinforcements on the connections between the roof beams and the pillars. The rupture force values of the structures were, on average, 38.02 kN, approximately 5.47 times the design load and showed an increase of 32% of resistance when compared to the non-reinforced structures of Stringari (2019). The measured displacements, especially on the ridge, did not reach the Brazilian normative limit for the design load and presented a linear behavior for forces greater than three times the designed ones. The structures presented a satisfactory structural behavior and the use of glulam and adhesive based on vegetable oils can be considered viable for the execution of portics.

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

KEYWORDS: frame structures, glued laminated timber; wood structures.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS	2
1.1.1. Objetivo Geral.....	2
1.1.2. Objetivos Específicos	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Contextualização da produção florestal e madeireira no Brasil	3
2.2. Uso da madeira como material estrutural	5
2.3. Madeira laminada colada.....	6
2.4. Adesivos	8
2.5. Adesivos à base de óleos vegetais.....	9
2.5.1. Adesivo à base de óleo de mamona	10
2.6. Pórticos estruturais	11
2.6.1. Pórticos em aviários de postura.....	12
3. MATERIAL E MÉTODOS	14
3.1. Características dos materiais.....	14
3.2. Projeto	16
3.2.1. Verificação da madeira para o momento fletor:.....	22
3.2.2. Verificação da ligação colada:.....	23
3.2.3 - Teste-piloto	25
3.3. Seleção da madeira.....	29
3.4. Execução	29
3.5. Ensaio experimentais.....	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1. Resistência das estruturas.....	35
4.1.1. Considerações gerais sobre a resistência observada experimentalmente	35
4.1.2. Revisão da carga de projeto sem reforço.....	39
4.1.3. Análise das tensões de ruptura do pórtico com reforço	40
4.1.4. Verificações à flexo-compressão e ligação colada para o pórtico com reforço	42
4.2. Rigidez das estruturas	43
5. CONCLUSÕES	50
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

1. INTRODUÇÃO

A busca pela utilização de materiais provenientes de fontes renováveis é crescente em todo o mundo. Pesquisas nos mais diversos segmentos colocam em pauta a necessidade de substituição da utilização de matérias-primas à base de combustíveis fósseis. Essa substituição visa a redução da emissão de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera, um dos gases do efeito estufa.

Promove-se, então, o aumento da utilização de materiais chamados “Carbono Neutro”, ou seja, materiais que emitem e consomem a mesma quantidade de CO_2 para sua produção. Nesse âmbito, a madeira é um material extremamente vantajoso, pois utiliza o dióxido de carbono (CO_2), combinado com água e luz solar, para o crescimento da árvore. A madeira utilizada para fins de longa duração como, por exemplo, em estruturas, prolonga a vida útil desse material aumentando a eficiência do processo.

Neste sentido, o Brasil ainda não é modelo de utilização de madeira na construção, se comparado a países europeus e norte-americanos. Um dos motivos da estagnação do uso de madeira em estruturas é a falta de comércio de peças pré-fabricadas, especialmente por meio do uso de técnicas como a da Madeira Laminada Colada (MLC). Peças em MLC oferecem diversas possibilidades de uso em estruturas, além de possibilitarem o uso de espécies de madeira reflorestada (COURI PETRAUSKI, 2012).

O uso da técnica de madeira laminada colada em sistemas estruturais permite a execução de inúmeras geometrias e dimensões, principalmente por não ter um limitante de comprimento. Pórticos em madeira laminada colada são, ainda, pouco estudados e, alguns autores, como Couri Petrauski (2012) e Stringari (2019), evidenciaram sua viabilidade. Essas pesquisas apresentaram resultados satisfatórios quanto ao seu desempenho.

Entretanto, a busca por soluções mais seguras em pórticos é passível de investigação. Seria desejável, ainda, conciliar maior segurança com economia. Assim sendo, no presente trabalho, foram executados e ensaiados experimentalmente, pórticos triarticulados com reforços nas ligações principais, objetivando-se avaliar possíveis ganhos de resistência e/ou rigidez nestas estruturas.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. *Objetivo Geral*

Avaliar o efeito de reforços das ligações no comportamento estrutural de pórticos em madeira laminada colada, feitos com *Araucaria angustifolia* e adesivo a base de óleos vegetais.

1.1.2. *Objetivos Específicos*

- Realizar a montagem de cinco pórticos em escala reduzida utilizando madeira laminada colada e com reforços nas ligações principais, de modo a satisfazer as exigências estruturais de aviários de postura;
- Avaliar a resistência, sob teste individual de forças, das estruturas executadas por meio do registro de cargas e modos de ruptura;
- Avaliar a rigidez das estruturas executadas, sob teste individual de forças, por meio do registro de deslocamentos em pontos específicos dos pórticos;
- Concluir, com base nas evidências obtidas e disponíveis na literatura, sobre o desempenho estrutural dos pórticos com reforços.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Contextualização da produção florestal e madeireira no Brasil

Mudanças para obter produtos sustentáveis, provenientes de matérias primas consideradas limpas, processos produtivos sustentáveis e aumento da utilização de fontes renováveis são tendências no mercado mundial. Somado a isso, a redução de desperdícios e não geração de resíduos poluentes são práticas que vêm recebendo investimento de empresas a fim de diminuir o impacto ambiental (VENTURA, RAMOS e PEREIRA, 2013; SILVA, MORAES e MACHADO, 2015).

Nesse âmbito, as práticas florestais vêm ganhando destaque, tanto no aumento da produção quanto da exportação, especialmente no Brasil, devido ao grande potencial florestal do país. Segundo o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2019), a atividade florestal é de grande importância no Brasil, não só pela extensa cobertura de florestas existente no país, mas também pelas suas funções sociais e econômicas, por meio de geração de empregos, atividades industriais, e de compra e venda.

Em 2016 o valor da produção florestal chegou a R\$ 18,5 bilhões. Enquanto a silvicultura foi responsável por 76,1% desse valor, o extrativismo vegetal representou 23,9% (IBGE, 2016). Essa produção empregou diretamente 510 mil pessoas, mas caso sejam considerados os mais diversos postos relacionados às atividades florestais esse número deve estar na casa de 3,7 milhões, segundo dados da IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores (PNDFP, 2018). A IBÁ afirma ainda que o setor de árvores representa 6,1% no PIB industrial do país (IBÁ, 2019).

O Plano Nacional de Desenvolvimento de Florestas Plantadas, promovido pelo governo brasileiro, apresenta medidas de fomento ao cultivo de florestas por meio de financiamento para o setor, pois acredita-se que o aumento da produção pode gerar ganhos significativos em todas as regiões do país, seja por meio de empregos, exportação, ou ainda novos mercados em ascensão (PNDFP, 2018).

Já são inúmeros os produtos obtidos a partir das árvores de florestas plantadas. Os que mais se destacam são: a celulose, o papel, o carvão vegetal, os painéis de madeira, pisos laminados e os produtos sólidos de madeira. Entretanto, diversos outros produtos utilizam-se de matéria prima florestal como sorvetes, xaropes, molhos, sucos, ração, esmalte, cápsulas de remédio, entre muitos outros

(IBÁ, 2019). As porcentagens de produção para cada segmento são representadas na Figura 1.

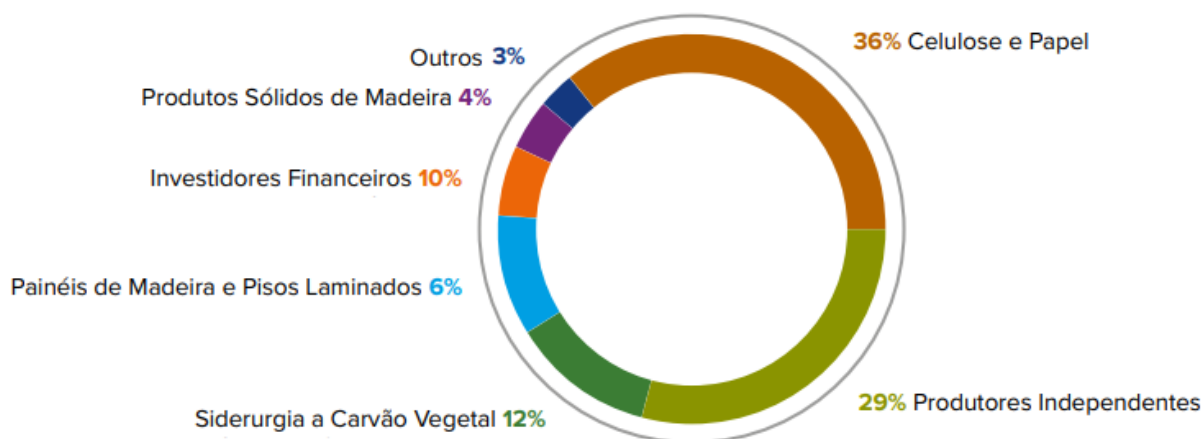


Figura 1 – Composição da área de árvores plantadas por segmento de utilização em 2018.

Fonte: Adaptado de IBÁ (2019).

O Ministério do Meio Ambiente classifica a produção florestal de duas maneiras: produtos não madeireiros e madeireiros. Os produtos não madeireiros são aqueles de origem vegetal (resinas, cipós, óleos, sementes, plantas ornamentais e medicinais), porém não lenhosos. Os produtos madeireiros, por sua vez, são todos aqueles chamados lenhosos, ou seja, capazes de serem utilizados em serrarias, ou ainda para estacas, lenha, postes e outros (MMA, 2019).

O Brasil possui um potencial de crescimento madeireiro muito elevado, considerando que, atualmente, apenas 1% do território nacional é utilizado para produção de florestas plantadas. Nestas florestas destacam-se especialmente o cultivo de eucalipto, pinus, acácia, araucária, paricá e teca (IBÁ, 2017). Apesar de ser uma pequena parcela territorial, o setor é responsável por 91% da madeira utilizada para produção industrial do Brasil (PNDFP, 2018).

Além de ser um material renovável, o custo energético da madeira pode ser considerado baixo, pois o nível de poluição dispensado para sua produção é muito menor que dos outros materiais utilizados, com destaque para o aço e concreto. Além disto, durante seu crescimento, a madeira “sequestra” carbono do meio onde está, auxiliando na redução de um dos principais gases de efeito estufa, o dióxido de carbono (CORREIA, 2009; MIRANDA, 2012).

Outra característica importante da madeira é sua alta relação resistência/peso (CALIL NETO e LAHR, 2013), ou seja, é um material com baixo peso específico e elevada resistência. Essa relação entre a resistência e o peso específico chega a ser superior à do aço. Pode ser considerada ainda, um material durável, de grande apelo arquitetônico e de fácil manuseio, oferecendo, portanto, possibilidades ilimitadas (CORREIA, 2009).

O uso da madeira na construção civil ocorre das mais diversas maneiras, e fica sujeito a esforços diferentes, pois é um material que se comporta razoavelmente bem a esforços de tração e compressão, e por consequência, à flexão. Sendo assim, pode ser utilizada em diversos sistemas estruturais (CORREIA, 2009).

2.2. Uso da madeira como material estrutural

A utilização da madeira como material estrutural vem crescendo nos últimos anos, especialmente devido às suas propriedades mecânicas, além de ser um material fácil de trabalhar e de aspecto visual agradável (GONÇALVES, 2014). Amorim (2010) ressalta as vantagens de utilização da madeira devido suas características ambientais, arquitetônicas, estruturais e de trabalhabilidade positivas.

Entretanto, Almeida (2014) chama a atenção para o dimensionamento de estruturas de madeira, já que a utilização da mesma como elemento estrutural requer um conhecimento amplo de suas propriedades físicas e mecânicas.

Essa tarefa é peculiar pois, em se tratando de madeira, seu crescimento e anatomia próprias produz um material heterogêneo e anisotrópico que, por sua vez, não resiste do mesmo modo nas diferentes direções de análise. (AMORIM, 2010).

Quanto aos sistemas estruturais, Amorim (2010) afirma que os pórticos em madeira, construídos respeitando a parametrização da norma, apresentaram um aumento na sua utilização nos últimos anos, pois são versáteis e podem ser utilizados para as mais diversas finalidades, desde residências, indústrias, comércio, espaços agrícolas, espaços de lazer e sociais.

Um dos principais elementos das estruturas de madeira são as ligações. As ligações desempenham um papel essencial, e requerem atenção especial em seu dimensionamento por serem os pontos mais vulneráveis da mesma (AMORIM, 2010). Esses pontos são sujeitos a esforços e tensões localizados que devem manter a estabilidade global da estrutura (CALIL NETO e LAHR, 2013).

As ligações mecânicas das peças de madeira podem ser feitas a partir de pinos metálicos: pregos, parafusos, cavilhas e conectores, como os anéis e placas dentadas (CORREIA, 2009).

Para suprir as limitações das dimensões transversais das peças de madeira serrada, utilizam-se geralmente compósitos e produtos derivados da madeira, como painéis em MDF (“medium density fiberboard”) e chapas de OSB (“oriented strand board”). Já para vencer as limitações de comprimento das peças utilizam-se juntas dentadas e técnicas de laminação (CORREIA, 2009).

A Madeira Laminada Colada (MLC), por sua vez, é uma técnica de laminação extremamente vantajosa para vencer vãos que peças de tamanhos comerciais não seriam capazes, além de reduzir a necessidade de utilização de peças de elevada qualidade (MIOTTO e DIAS, 2010).

2.3. Madeira laminada colada

Peças em Madeira Laminada Colada (MLC) são estruturas feitas a partir da colagem de lâminas de madeira serrada de maneira que as fibras das peças estejam paralelas entre si (CORREIA, 2009). As tábuas de madeira serrada podem ser sobrepostas vertical ou horizontalmente, conforme apresentado na Figura 2 (AMORIM, 2010).

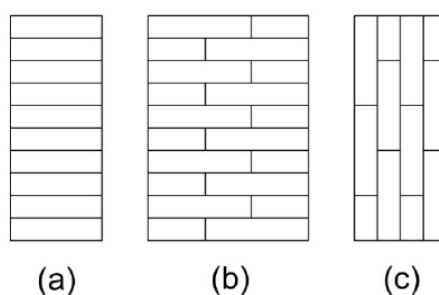


Figura 2 – Sobreposição das lâminas na vertical (a) e (b), e na horizontal (c).

Fonte: Amorim (2010)

As lâminas possuem espessuras usuais de 19 a 50 milímetros, já os comprimentos das lâminas a serem coladas variam geralmente entre os 1,5 e 5 metros de comprimento, dificilmente ultrapassando esses valores. Entretanto, caso seja necessário, podem ser feitas ligações entre peças em MLC, usualmente

transpassando as lâminas ou por meio de entalhes, como as “*finger joints*”, que possibilitam, portanto, a execução de peças de quaisquer comprimentos (CORREIA, 2009; AMORIM, 2010).

Uma das principais vantagens da utilização de peças em MLC é que os defeitos naturais da madeira, como nós, desvios de fibra ou peças com menor densidade, podem ser distribuídos mais homoganeamente, resultando na execução em, peças com maior resistência e, por consequência, que apresentem maior confiabilidade à estrutura (MARTINS, 2010).

Peças em madeira laminada colada são geralmente dimensionadas à flexão, em que as tensões costumam ser maiores nas extremidades das seções. A partir disso, entende-se que, se dispormos de lâminas melhores, ou seja, que apresentem menos defeitos nas extremidades e lâminas mais “fracas” no centro das seções, as peças poderão apresentar um comportamento melhor se fossem dispostas aleatoriamente (CORREIA, 2009).

Sendo assim, as peças de madeira laminada colada permitem a execução de peças com qualidade superior, além de peças de quaisquer tamanhos e formatos. Quando utilizam-se ligações adequadas, a limitação do comprimento será baseada exclusivamente pelas condições de transporte (MARTINS, 2010).

Estruturas em MLC apresentam ainda, uma qualidade estética capaz de compor conjuntos de maneira agradável, apresentando ainda valores de peso reduzidos, o que facilita a montagem e desmontagem das peças e pode gerar economia nas fundações (SZUCS *et al.*, 2016).

Martins (2010) afirma, ainda, que o processo de laminar e colar a madeira, com a finalidade de diminuir a influência dos defeitos naturais, só foi possível graças aos progressos realizados frente às características apresentadas pelos adesivos para madeira.

Segundo a NBR 7190 (ABNT, 1997), as ligações em juntas longitudinais de madeira laminada colada podem ser feitas com cola. A cola utilizada, tanto nas juntas de ligações quanto entre as lâminas para a execução de peças de MLC, devem obedecer às prescrições técnicas das mesmas, além da resistência das juntas que deve ser de valor igual ou superior ao da resistência ao cisalhamento longitudinal da madeira. O adesivo utilizado para a execução dessas estruturas necessita de um rigoroso controle de qualidade, já que é parte vital da composição de uma estrutura em MLC (AMORIM, 2010).

2.4. Adesivos

Os adesivos são substâncias químicas à base de polímeros capazes de unir materiais por meio da adesão entre eles (SERRANO, 2009).

A adesão pode ser feita de duas maneiras: mecânica e química. A adesão química baseia-se na interação entre as ligações químicas do adesivo e do aderente, que por meio das forças básicas de ligações químicas primárias, criam resistência entre as peças. Já na adesão mecânica, aplica-se adesivo em sua forma líquida em duas superfícies porosas, que, por sua vez, são aderidos nos poros das superfícies, e, após o endurecimento da cola (processo de cura), acarreta na adesão das partes. Em ambos os casos, fatores como a estrutura superficial do substrato, a pressão de colagem e a viscosidade do adesivo são essenciais (AZEVEDO, 2009).

O sucesso de uma ligação adesiva depende diretamente do desempenho do sistema adesivo/aderente, e a qualidade da aderência entre a cola e o substrato depende principalmente do adesivo a ser utilizado, da superfície a ser colada (madeira) e do próprio processo de colagem (AZEVEDO, 2009; SERRANO, 2009).

O adesivo deve, primeiramente, ser escolhido de acordo com a finalidade a ser utilizado, a fim de a estrutura ter um desempenho satisfatório frente aos esforços, temperatura e teor de umidade que será submetida (SZÜCZ *et al.*, 2016). Conhecer as características próprias do adesivo a ser utilizado, como a viscosidade, solubilidade e o tempo de pega, também é essencial para a correta utilização do mesmo (AZEVEDO, 2009; MARQUES, 2009).

Quando o substrato for a madeira, as peças a serem coladas devem passar por uma preparação mecânica, utilizando maquinário específico, a fim de apresentar uma superfície perfeitamente limpa com poucas ou nenhuma ondulações e rugosidades (MARQUES, 2009).

Já o processo de colagem envolve os fatores relativos à execução das juntas, ou seja, a espessura da linha de cola e a pressão aplicada sobre as peças, bem como a distribuição dessa pressão de maneira igualitária (AZEVEDO, 2009).

A pressão é essencial no processo de colagem, pois influencia diretamente o endurecimento do adesivo entre as peças de MLC. Caso a pressão seja muito alta, o adesivo movimenta-se excessivamente, transbordando para fora da junta colada. Já se a pressão for muito baixa, a penetração do adesivo pela madeira pode ser insuficiente para garantir a consolidação da peça (TELES, 2009). O tempo de cura

também deve ser respeitado, conforme as orientações do fabricante, pois, caso o tempo sob pressão exceda os limites máximos ou mínimos, o mesmo não será capaz de promover uma cura completa e unir adequadamente as peças (SERRANO, 2009).

Os adesivos podem ser classificados segundo sua origem, podendo ser de origem natural, semissintética e sintética. Os adesivos de origem natural são feitos a partir de animais (sebo, gordura, ossos), óleos vegetais (trigo, milho, soja) ou ainda de fontes inorgânicas (fosfato e silicato de minerais). Os de origem semissintética são derivados de produtos naturais que foram modificados quimicamente (nitrato de celulose, por exemplo). Já os de origem sintética são feitos a partir de reações químicas, como poliadição, policondensação, entre outros (MARQUES, 2009).

Dentre as opções de adesivos disponíveis no mercado para madeira, deve ser levado em consideração o aumento da demanda de aplicação de produtos naturais. Polímeros obtidos por fontes renováveis podem competir ou até superar compostos produzidos a partir do petróleo, tanto no quesito ambiental quanto na relação custo/benefício (LLIGADAS *et al.*, 2013). Nesse sentido, adesivos à base de óleos vegetais apresentam-se como uma alternativa vantajosa por serem feitos a partir de fontes renováveis.

2.5. Adesivos à base de óleos vegetais

A utilização de óleos vegetais vêm sendo destaque na indústria química devido as suas diversas vantagens, como disponibilidade em larga escala, biodegradabilidade, baixo custo, baixa toxicidade ao meio ambiente e aos seres humanos. Pesquisas com polímeros derivados de óleos vegetais revelam diversos usos interessantes na indústria, como na fabricação de tintas, revestimentos, medicamentos e também produção de adesivos (LLIGADAS *et al.*, 2013).

O adesivo bi componente à base de óleos vegetais da Kehl Indústria e Comércio LTDA, é, na verdade o adesivo que surgiu como substituto do adesivo à base de óleo de mamona. Segundo o fabricante, é um adesivo semi flexível, composto de matérias primas 75% naturais e de fontes renováveis. É chamado bi componente pois o isocianato e o polioli, que são os elementos componentes do adesivo, são comercializados em dois recipientes separados e devem ser misturados no momento da colagem. O adesivo é um substitutivo dos convencionais

derivados de petróleo, não contém solvente e não agride a natureza (KEHL, 2019).

A composição exata do adesivo produzido pela Indústria Kehl não é disponibilizada pelo fabricante, porém, acredita-se que seu comportamento seja muito similar ao do adesivo à base de óleo de mamona, que era previamente produzido pela empresa, além de ser ainda um dos componentes principais da nova mistura de óleos. Sendo assim, a descrição do comportamento deste adesivo, obtida de trabalhos anteriores como os de Couri Petrauski (2012) e Stringari (2019), apresentados a seguir, será feita baseada no adesivo à base de óleo de mamona.

2.5.1. Adesivo à base de óleo de mamona

O óleo de mamona é produzido a partir da planta mamoneira, cientificamente chamada de "*Ricinus communis*", encontrada em regiões tropicais e subtropicais, abundante no Brasil, que dá origem a um óleo viscoso utilizado para a produção de adesivos. Sua extração pode ser feita por meio de compressão das sementes ou por meio de solventes (DIAS, 2008). Dependendo das diferenças de prensagem, condicionamento, tratamento e métodos de purificação, o óleo extraído da mamona pode apresentar valores diferentes de acidez e umidade, sendo importante sua verificação dependendo do uso para qual se destina (AZEVEDO, 2009).

A utilização da mamona vêm desde a antiguidade, quando o óleo era utilizado para fins medicinais e de iluminação. Porém, voltou a ser utilizada no comércio atual em virtude do aumento dos preços de outros produtos. Além da sua aplicação em adesivos, a mamona é utilizada na produção de tintas, vernizes, cosméticos, sabões, fabricação de plásticos e fibras sintéticas (VENTURA, RAMOS e PEREIRA, 2013).

Azambuja (2006), em seu trabalho, utilizou adesivo produzido com base no óleo de mamona para fabricação de madeira laminada colada e concluiu que o mesmo pode ser indicado como uma alternativa tecnicamente viável para o emprego em MLC e juntas, desde que respeitadas suas características de resistência. Apresenta boa trabalhabilidade e é adequado no quesito desempenho mecânico, em diferentes condições de umidade.

Couri Petrauski (2012) utilizou dois adesivos para a construção e avaliação do comportamento estrutural de pórticos em madeira laminada colada de *Eucalyptus* sp.: o poliuretano à base de óleo de mamona e resorcinol-formaldeído, e afirma que

o adesivo à base de óleo de mamona é viável, tecnicamente, comparando com o resorcinol, para a utilização em estruturas, como pórticos inteiramente colados, além de uso geral em estruturas. A pesquisadora ainda afirma que a combinação de colagem que pareceu mais adequada para ser utilizada em pórticos de madeira laminada colada, utilizando o adesivo à base de óleo de mamona, foi a proporção de 1 : 1,32 entre componentes, utilizando-se um consumo de adesivo de 300g/m² e 1,3 MPa de pressão de colagem.

Stringari (2019) projetou, construiu e ensaiou cinco pórticos em madeira laminada colada, da espécie *Araucaria angustifolia* e adesivo à base de óleos vegetais, seguindo a geometria de pórtico utilizada em aviários de postura pela Cooperativa Agroindustrial Lar, do Oeste do Paraná. O autor obteve resultados médios para resistência última de suas estruturas da ordem de 4,14 vezes a carga de projeto, além de desempenho mecânico satisfatório e flecha inferior à recomendada pela NBR 7190 (ABNT, 1997). Sendo assim, afirmou que, num processo controlado, esses materiais combinados podem resultar em estruturas com comportamento satisfatório frente à resistência e rigidez.

2.6. Pórticos estruturais

Pórticos são estruturas compostas por pilares e vigas trabalhando em conjunto. Segundo Silva (2011), os pórticos podem ser classificados quanto à sua geometria e quanto à estaticidade. Quanto à geometria, os pórticos podem ser planos ou espaciais. Quanto à sua estaticidade, os pórticos podem ser hipostáticos, isostáticos e hiperestáticos.

Estruturas realizadas em sistema do tipo pórtico apresentam diversas vantagens como simplicidade de projeto e detalhamento, facilidade de ampliações, possibilidade de vencer grandes vãos livres, compatibilidade com componentes e outros sistemas construtivos industriais, além de fácil manutenção. No mercado brasileiro, um dos segmentos de maior demanda de estruturas de pórticos é para a execução de galpões, especialmente em aço (GERDAU, 2018).

O comportamento de pórticos em madeira foi estudado também por Couri Petrauski (2012), que construiu e ensaiou cinco unidades em madeira laminada colada. Três estruturas foram construídas utilizando adesivo de resorcinol-formaldeído e duas utilizando adesivo de poliuretano à base de óleo de mamona. As

estruturas foram projetadas para 14,81 kN e 11,84 kN, respectivamente. As cargas de ruptura médias foram 68,567 kN para as estruturas coladas com resorcinol e 52,365 kN para estruturas com óleo de mamona. Esses dados resultam em valores médios de resistência de 4,63 e 4,42 vezes a carga de projeto. A autora afirma que as estruturas apresentaram desempenho mecânico satisfatório e deformações inferiores às permitidas pela norma.

Stringari (2019) apresentou em seu trabalho a viabilidade da substituição de estruturas mistas de concreto e estrutura metálica por madeira para a execução de aviários de postura. O autor ensaiou cinco pórticos em madeira laminada colada com adesivo à base de óleos vegetais. A carga de ruptura de projeto dos pórticos era de 6,946 kN e a carga de ruptura média obtida nos testes foi de 2,879 kN. Sendo assim, segundo o autor, as estruturas obtiveram bons níveis de segurança, desempenho satisfatório e confiabilidade estrutural. Referente à rigidez, as estruturas apresentaram um comportamento linear quanto aos deslocamentos. O autor ainda afirma que podem ser consideradas excelentes opções para utilização real em galpões para aviário de postura.

2.6.1. Pórticos em aviários de postura

As aves de postura são destinadas à produção de ovos. A avicultura de postura é extremamente importante para o setor produtivo pois possui duas grandes finalidades: a incubação, destinada à reprodução de aves de corte e de postura; e, a produção de ovos para consumo humano (BNDES Setorial, 2016).

No Brasil, a utilização de galpões para o abrigo de aves vem aumentando nos últimos anos a fim de melhorar a eficiência da produção (COSTA, DOURADO e MERVALL, 2012).

Para garantir a qualidade dos produtos e a eficiência da produção, os aviários devem possuir instalações elétricas, ventilação adequada, locais para suprimentos de ração e água, além de serem construídos com materiais adequados, especialmente para o conforto térmico das aves, e possuírem as dimensões compatíveis ao número de aves criadas no local (Manual de segurança e qualidade para a avicultura de postura, 2004).

Galpões para aves no oeste paranaense, ainda são, em sua maioria, construções rurais simples, de baixo custo e de caráter familiar. A Associação

Brasileira de Proteína de Animal (ABPA) estima que ainda existam, no campo, mais de 130 mil famílias proprietárias de pequenos aviários que comercializam para cooperativas e agroindústrias (ABPA, 2019).

A Copacol – Cooperativa Agroindustrial Consolata, é uma empresa sediada em Cafelândia, no oeste paranaense, responsável por 143,3 milhões de aves abatidas por ano. Para padronizar as dimensões dos aviários, a empresa parametrizou várias opções que adequam-se à necessidade do produtor, seja para aviários pequenos, médios ou grandes (COPACOL, 2019).

Pequenos produtores iniciam, geralmente, com aviários de dimensões reduzidas, como 10 metros de comprimento por 5 metros de largura. A Cooperativa Agroindustrial LAR, por exemplo, também presente no oeste do Paraná, recomenda geometrias a partir de 5 metros de vão livre e 5 metros de altura, para diversos comprimentos (LAR, 2019).

Na pesquisa conduzida por Stringari (2019) e neste trabalho, o objeto de estudo compreendeu a geometria de um pórtico sugerido pela Cooperativa LAR para aviários de postura.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O processamento da madeira, a construção dos pórticos e os experimentos foram conduzidos nas dependências do Laboratório de Tecnologia e Estruturas de Madeira (LATEM) e do Laboratório de Estruturas e Materiais de Engenharia (LEME) do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas (CCET) da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), no Campus da cidade de Cascavel.

Os materiais e métodos descritos a seguir foram utilizados no experimento proposto visando o cumprimento dos objetivos deste trabalho. A metodologia foi dividida a fim de melhor apresentar as etapas do experimento, iniciando pelas características dos materiais utilizados; detalhamento do projeto e dos reforços; a seleção da madeira para utilização; a execução das estruturas; e, por fim, os ensaios experimentais das mesmas.

3.1. Características dos materiais

A madeira utilizada foi da espécie *Araucaria angustifolia*, e fez parte do material utilizado por Wei (2017) e Peixoto (2017), que caracterizaram o lote composto por 107 tábuas, e Stringari (2019), que executou e ensaiou cinco pórticos com a madeira. Segundo os autores, a madeira foi proveniente de árvores com 30 anos quando do corte e foi entregue na forma de tábuas com dimensões aproximadas de 23 cm de largura, 300 cm de comprimento e espessura variando de 22 a 27 mm. Neste trabalho foi feita a caracterização à tração da madeira ($f_{t0,k}$) segundo a NBR 7190 (ABNT, 1997). Os valores de caracterização desta madeira são apresentados na Tabela 1, a seguir.

Tabela 1 – Caracterização da madeira e resistências características ao cisalhamento das juntas coladas

Caracterização da madeira para 12% de umidade		
Propriedade	MPa	Coeficiente de Variação
$f_{c0,k}$	45,8	12,92%
$f_{v0,k}$	8,8	17,81%
$f_{t0,k}$	120,21	16,29%
$E_{c0,m}$	15904	14,89%
Resistências características ao cisalhamento (MPa) de juntas coladas		
Propriedade	MPa	Coeficiente de Variação
Compressão; juntas coladas a 0°C ($f_{v0,k}$)	9,98	17,8%
Compressão; juntas coladas a 90°C ($f_{v90,k}$)	3,03	24,9%
Torção; juntas coladas a 0°C ($f_{vt0,k}$)	7,58	20,43%
Torção; juntas coladas a 90°C ($f_{vt90,k}$)	5,96	32,53%

Fonte: Adaptado de Stringari (2019)

Conforme se apresenta na Tabela 1 os coeficientes de variação obtidos na caracterização da madeira foram todos inferiores a 18%, o que é recomendado para solicitações normais pela norma (NBR 7190:1997). Ainda, nesta pesquisa, obteve-se uma relação entre a resistência à tração e compressão de 2,6. A mesma relação para esta madeira é apresentada na NBR 7190 (1997) como sendo igual a 2,3.

O adesivo escolhido para a execução das estruturas foi um adesivo bicomponente a base de óleos vegetais, adquirido da empresa KEHL Indústria e Comércio, da cidade de São Carlos – SP. O produto é fornecido em dois componentes, o isocianato e o polioli. Para fins de comparação com a pesquisa de Stringari (2019) foi utilizada a proporção de 1:1,5, ou seja, 1 unidade em massa de isocianato para 1,5 unidades de polioli.

3.2. Projeto

Nesta seção serão apresentados resumidamente alguns cálculos realizados por Stringari (2019) na fase do projeto da estrutura. O pesquisador projetou, executou e submeteu à ruptura cinco unidades de pórticos laminados colados, em escala reduzida, concebidos a partir de estruturas reais utilizadas em aviários de postura pela Cooperativa Agroindustrial LAR, com sede na cidade de Medianeira, PR. A Figura 3 ilustra a geometria da estrutura principal destes aviários, feita regularmente com pilares de concreto armado e cobertura em estrutura metálica.

À época, a motivação para o trabalho do pesquisador foi obter uma solução para esta estrutura, feita em madeira laminada colada. Neste sentido, dadas às limitações do LEME, o pesquisador projetou um pórtico em escala reduzida que representasse a situação real ilustrada na Figura 3.

A solução encontrada foi o pórtico apresentado na Figura 4 e cuja carga de projeto é ilustrada na Figura 5. Destaque-se que, neste caso, a análise da estrutura da Figura 5 já permite encontrar os esforços de cálculo (M_d , V_d e N_d).

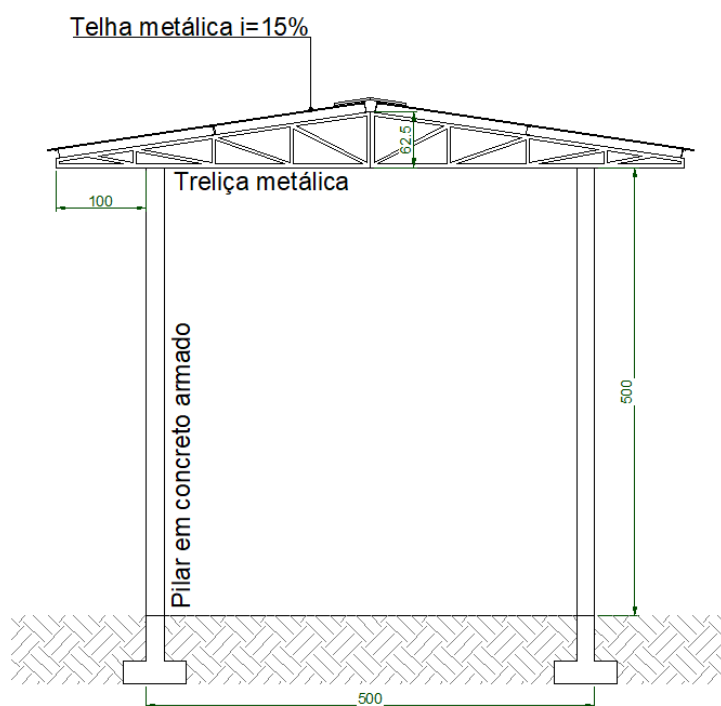


Figura 3 – Geometria básica adotada pela cooperativa LAR para aviários de postura.

Fonte: Stringari (2019)

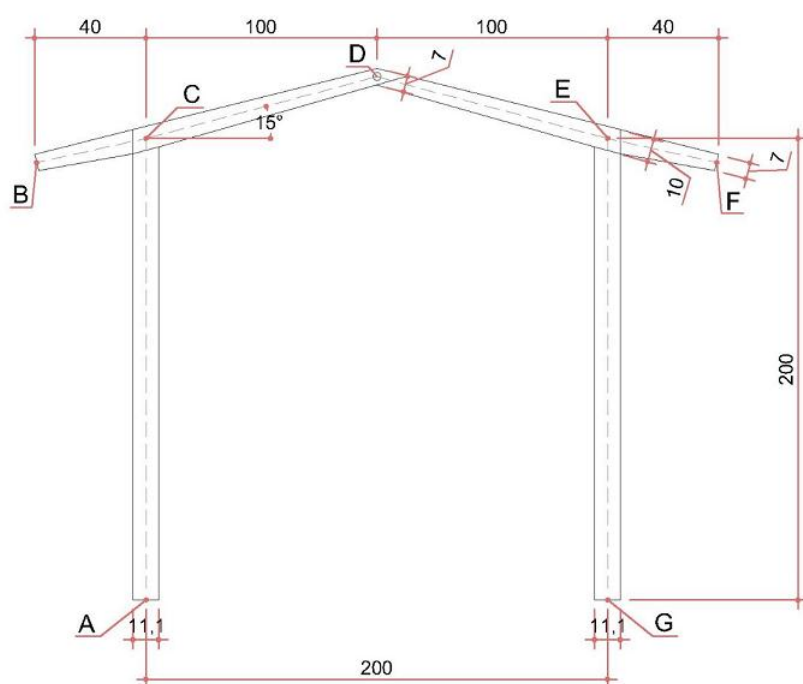


Figura 4 – Geometria final do pórtico em escala reduzida (em cm).

Fonte: Adaptado de Stringari (2019)

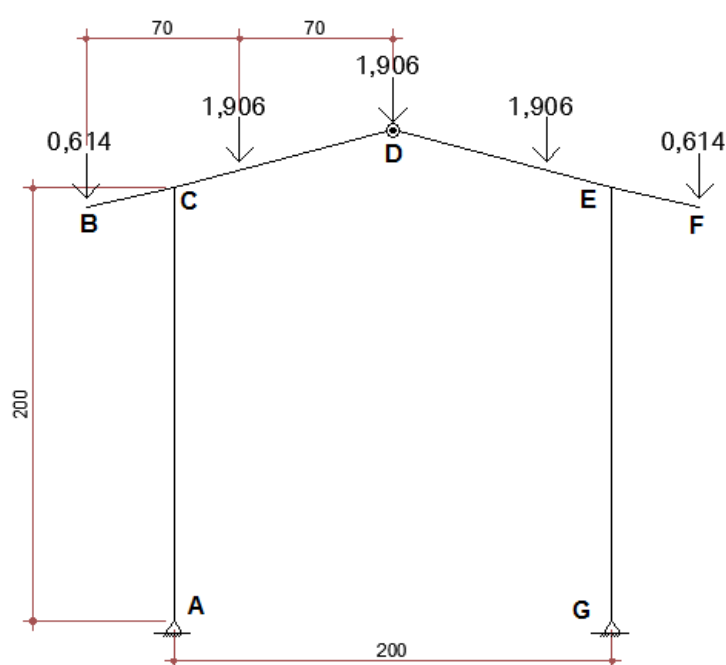


Figura 5 – Carga de projeto final (em kN) para o pórtico reduzido (em cm).

Fonte: Adaptado de Stringari (2019)

Conforme ilustra a Figura 4, a solução envolveu uma redução de inércia nas barras das vigas de cobertura. Isto foi feito objetivando maior economia de madeira.

Destaque-se, ainda, que para compor os pilares e as vigas, foram dispostas 5 lâminas por peça como solução geral. A espessura das lâminas foi padronizada em 1,5cm. Para viabilizar a ligação colada rígida nos nós C e E, idealizou-se, neste local, um transpasse de duas lâminas provenientes do pilar com três lâminas da viga de cobertura, como ilustrado na Figura 6. Nesta região, portanto, este conjunto de cinco lâminas ficou solidarizado por quatro planos colados. Foram coladas ainda duas peças de enchimento nas duas laterais do beiral, a fim de auxiliar na estabilidade do mesmo durante o carregamento, reduzindo a possibilidade de flambagem da peça, como ilustrado em verde no item c da Figura 6.

A união entre a viga de cobertura e o pilar pode ser considerada crítica para a estrutura pois é responsável por absorver os maiores esforços atuantes e, além disto, sua rigidez permitirá manter as flechas em níveis satisfatórios.

Embora os resultados de resistência e rigidez obtidos por Stringari (2019) tenham sido satisfatórios, todas as unidades romperam nas ligações rígidas em C ou E.

Fazendo-se uma análise da solução encontrada pelo autor, com base no apresentado nas Figuras 4 e 5, pôde-se, de fato, comprovar a situação limite do dimensionamento. Seja, portanto, conforme se apresenta na sequência, nos itens 3.2.1 e 3.2.2, levantar evidências desta situação. Para tanto, serão apresentados os cálculos de verificação da ligação idealizada (nó C) consideradas apenas duas situações: absorção do momento fletor de cálculo (M_d) pelas lâminas do pilar (barra AC) e viga de cobertura (barra CD), e verificação da resistência do adesivo nesta ligação (nó C). Neste sentido, a Tabela 2 apresenta, para as barras envolvidas, os esforços de cálculo obtidos a partir do estado de carregamento apresentado na Figura 5.

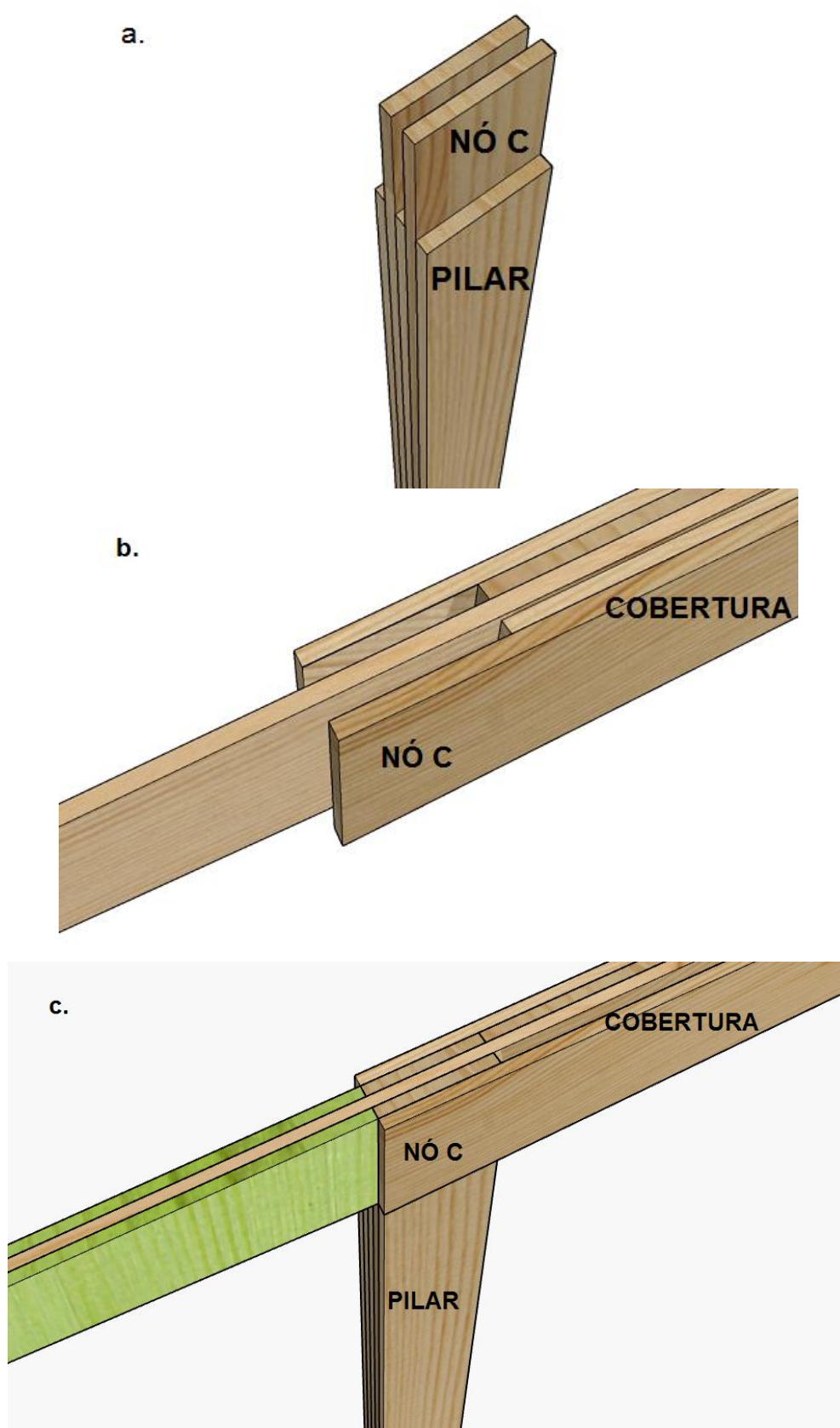


Figura 6 – Detalhe da configuração do pilar (a), viga de cobertura (b) e transpasse das peças (c) para formar a ligação.

Tabela 2 – Esforços de cálculo atuantes no nó C

Barra	Md (kN.m)	Vd (kN)	Nd (kN)
AC	1,128	0,546	3,47 (compressão)
BC	0,246	0,593	0,159 (tração)
CD	1,374	2,62	1,29 (compressão)

Para as verificações foram necessários os valores dos coeficientes de modificação (k_{mod}), coeficientes de ponderação (γ_w), resistência de cálculo à compressão paralela às fibras da madeira ($f_{c0,d}$), resistência de cálculo à torção de juntas coladas com fibras à 90° entre si ($f_{vt90,d}$), resistência ao cisalhamento de juntas coladas à 90° ($f_{v90,d}$) e resistência ao cisalhamento de juntas coladas inclinadas em relação às fibras ($f_{v\alpha,d}$). Para tanto, foram utilizadas as equações apresentadas a seguir. As equações e os coeficientes adotados estão de acordo com o apresentado na NBR 7190 (1997).

a) k_{mod} , foi calculado a partir da Equação 1;

$$k_{mod} = k_{mod,1} \cdot k_{mod,2} \cdot k_{mod,3} \quad \text{Eq. 1}$$

em que:

- $k_{mod,1}$ é o coeficiente que leva em consideração o tempo de atuação do carregamento e o tipo de material utilizado, neste caso foi adotado um valor de 0,7;

Destaque-se que o valor utilizado por Stringari (2019) para $k_{mod,1} = 0,7$ está relacionado ao desenvolvimento do projeto para o aviário. O mesmo procedimento foi adotado, à época, por Couri Petrauski (2012).

- $k_{mod,2}$ leva em consideração a classe de umidade, neste caso considerada entre (1) e (2) conforme a NBR 7190 (1997), sendo o coeficiente igual a 1,0;
- $k_{mod,3}$ leva em consideração se a madeira é de primeira ou segunda categoria, neste caso conífera, portanto, adota-se o valor de 0,8;

b) Os valores de coeficientes de ponderação (γ_w) foram adotados da seguinte maneira:

- para o estado limite último decorrente da tensão de compressão paralela às fibras, $\gamma_c = 1,4$;
- para o estado limite último decorrente de tensões de cisalhamento paralelo às fibras, incluso resistência das ligações, $\gamma_v = 1,8$;

c) Para o cálculo de $f_{c0,d}$ foi utilizada a Equação 2. O valor de $f_{c0,k}$ encontra-se na Tabela 1;

$$f_{c0,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c0,k}}{\gamma_c} \quad \text{Eq. 2}$$

d) Para o cálculo de $f_{vt90,d}$ foi utilizada a Equação 3. O valor de $f_{vt90,k}$ encontra-se na Tabela 1;

$$f_{vt90,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{vt90,k}}{\gamma_v} \quad \text{Eq. 3}$$

e) Para o cálculo de $f_{v90,d}$ foi utilizada a Equação 4. O valor de $f_{v90,k}$ encontra-se na Tabela 1;

$$f_{v90,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{v90,k}}{\gamma_v} \quad \text{Eq. 4}$$

f) Para o cálculo de $f_{v\alpha,d}$ foi utilizada a Equação 5. O valor de $f_{v\alpha,k}$ pode ser encontrado utilizando a Equação de Hankinson, apresentada na Equação 6;

$$f_{v\alpha,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{v\alpha,k}}{\gamma_v} \quad \text{Eq. 5}$$

$$f_{v\alpha,k} = \frac{f_{v0,k} \cdot f_{v90,k}}{f_{v0,k} \cdot \text{sen}^2 \alpha + f_{v90,k} \cdot \text{cos}^2 \alpha} \quad \text{Eq. 6}$$

Para ambas, as verificações da absorção do momento fletor de cálculo (Md)

levou-se em consideração a Equação 7, a seguir, com base no apresentado na NBR 7190 (ABNT, 1997).

$$\sigma_{atuante} \leq f_{c0,d} \quad \text{Eq. 7}$$

em que:

- $\sigma_{atuante}$ = tensão máxima atuante, MPa;
- $f_{c0,d}$ = resistência de cálculo à compressão paralela às fibras, MPa.

A Equação 8 representa o cálculo de tensão máxima atuante para seções retangulares.

$$\sigma_{atuante} = \frac{6 \cdot M_d}{b \cdot h^2} \quad \text{Eq. 8}$$

em que:

- M_d = momento fletor máximo de cálculo, MN.m;
- b = largura resistente da peça, m;
- h = altura da peça, m.

Por fim, aplicando a Equação 2, obtém-se $f_{c0,d} = 18,32$ MPa.

3.2.1. Verificação da madeira para o momento fletor:

As verificações da resistência do pilar e viga, quanto às solicitações de projeto, são apresentadas a seguir.

i. Pilar (barra AC):

O momento atuante na barra AC é $M_d = 0,001128$ MN.m, conforme Tabela 2. A ligação C é formada por duas lâminas do pilar, com 1,5 cm de espessura cada, conforme apresentado na Figura 6. Assim, a largura resistente b será igual a 3 cm. O valor da altura h corresponde, neste caso, à largura da peça, sendo assim, 11,1 cm, conforme projeto. Substituindo estes valores e os já calculados anteriormente na

equação 7, obtém-se:

$$\frac{0,001128.6}{0,03 \cdot 0,111^2} \leq 18,32$$

Portanto, $18,31 < 18,32$, o que satisfaz numa condição limite.

ii. Viga de cobertura (barra CD):

Utiliza-se o valor de momento fletor de cálculo apresentado na Tabela 2 para a viga de cobertura, neste caso $M_d = 0,001374$ MN.m. A dimensão b é relacionada às 3 lâminas da viga de cobertura atuantes na ligação C, ou seja, 4,5 cm, e a altura h , no caso largura, de 10 cm. Substituindo os valores da equação 7, obtém-se:

$$\frac{0,001374.6}{0,045 \cdot 0,10^2} \leq 18,32$$

E, portanto, $18,32 = 18,32$. Novamente, satisfaz como situação limite.

3.2.2. Verificação da ligação colada:

A verificação da ligação colada foi feita com base na Equação 9, concebida por Petruski (2000). Nesta equação, o primeiro membro, compreende as áreas necessárias à absorção dos esforços de momento, normal e cortante, respectivamente. A soma dessas três áreas deve ser menor ou igual à área disponível para colagem, apresentada no segundo membro. Essa área compreende uma situação como a apresentada na Figura 7.

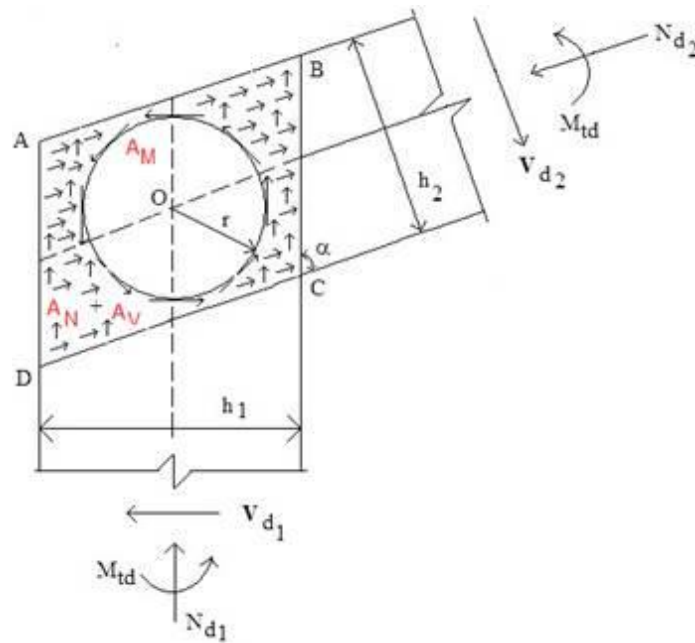


Figura 7 – Área de uma ligação colada sujeita aos esforços de momento, normais e de cisalhamento.

Fonte: Petrauski (2000)

$$\left(\frac{2 \cdot M_{td} \cdot \pi^{1/2}}{n \cdot f_{vt90,d}}\right)^{2/3} + \frac{N_d}{n \cdot f_{v\alpha,d}} + \frac{V_d}{n \cdot f_{v90,d}} \leq \frac{h_1 \cdot h_2}{\sin(\alpha)} \quad \text{eq. 9}$$

em que:

- M_{td} = M_d = momento torçor de cálculo, kgf.cm;
- N_d = esforço normal de cálculo, kgf;
- V_d = esforço cortante de cálculo, kgf;
- $f_{vt90,d}$, $f_{v\alpha,d}$ e $f_{v90,d}$ = tensões resistentes, kgf.cm⁻²;
- n = número de faces coladas;
- h_1 = altura da barra 1, cm;
- h_2 = altura da barra 2, cm;
- α = ângulo entre a direção das fibras, graus.

Neste caso foram utilizadas as unidades adotadas pelo autor quando da dedução da equação. Ainda, os valores de M_d , N_d e V_d utilizados foram os maiores apresentados na Tabela 2, a fim de verificar a ligação para as maiores solicitações atuantes. Os valores de h_1 e h_2 adotados foram 11,1 cm e 10 cm, respectivamente, e $\alpha = 75^\circ$, em conformidade ao apresentado na Figura 4. Substituindo os valores, obtêm-se:

$$\left(\frac{2.13740 \cdot \pi^{1/2}}{4.18,542}\right)^{2/3} + \frac{347}{4.9,887} + \frac{262}{4.9,427} \leq \frac{11,1 \cdot 10}{\sin 75^\circ} \therefore 75,55 + 8,77 + 6,95 < 114,9 \text{ cm}^2 \therefore$$

$$91,27 < 114,9 \text{ cm}^2$$

Perceba-se que, respectivamente, no primeiro membro as parcelas equivalem às áreas coladas necessárias para combate de momento fletor, esforço normal e esforço cortante. Neste caso, dada a natureza da estrutura, é compreensível que a maior área esteja associada ao momento fletor.

Sendo assim, obteve-se: $91,27 < 114,91$.

Além da aplicação da equação 9 é interessante a análise do raio disponível, conforme Figura 7. Neste caso, dado que a área necessária para absorver o momento Md foi igual a $75,5 \text{ cm}^2$, isto exigiria um raio de:

$$75,55 \leq \pi \cdot r^2$$

$$r \geq 4,9 \text{ cm}$$

Como consequência, uma vez que uma das lâminas foi adotada com altura $h_2 = 10 \text{ cm}$, o raio também estaria numa situação limite.

Conforme se observa, a região da ligação rígida estava dimensionada no limite e, como consequência, foi coerente sua ruptura em todas as unidades testadas por Stringari (2019), mesmo que com um carregamento muito superior ao esperado pelo projeto. Neste sentido, a motivação deste trabalho compreendeu avaliar a possibilidade de reforço desta ligação e sua eficiência em termos de aumento de resistência e rigidez para a estrutura.

3.2.3 - Teste-piloto

Considerada a motivação deste trabalho e a disponibilidade de algumas unidades já testadas por Stringari (2019) decidiu-se pela realização de um teste-piloto para avaliar a proposta de reforço das ligações.

Desta forma, duas metades de pórticos não rompidos, ensaiados por Stringari

(2019), foram unidas novamente pela rótula no nó D, e colados reforços em ambos os lados das ligações em C e E. Neste caso utilizou-se adesivo à base de poliacetato de vinila (PVA). Esses reforços foram aplicados exclusivamente na barra do pilar, em sua extremidade superior. Estas lâminas adicionais possuíam 30 cm de comprimento 11,1 cm de largura e espessura idêntica a das outras lâminas, ou seja, 1,5 cm. O detalhe deste reforço é apresentado na Figura 8.

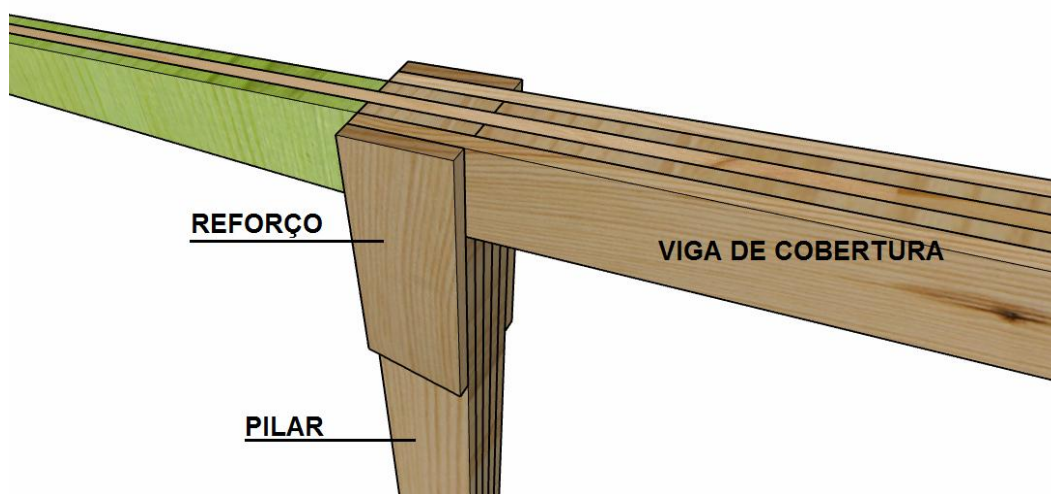


Figura 8 – Detalhe do pórtico com reforço na ligação.

Neste teste foram aplicadas cargas crescentes exclusivamente em três pontos situados nas vigas de cobertura, conforme indica a Figura 9. Ainda, fez-se o acompanhamento do deslocamento exclusivamente no ponto D.

Ressalta-se que as quatro peças de reforço aplicadas na estrutura equivalem a um aumento de aproximadamente 3% de madeira e de cola, ou seja, uma quantidade pequena de material se considerado o todo da estrutura.

A ruptura ocorreu para uma força máxima total aplicada igual a 40,77 kN. Considerando que as unidades testadas por Stringari (2019) apresentaram carga média total na ruptura de 28,79 kN, este resultado preliminar foi muito promissor, ou seja, um acréscimo de resistência da ordem de 42%.

Na Figura 10 apresenta-se, comparativamente aos resultados médios de Stringari (2019), o diagrama Carga x Deslocamento obtido neste teste-piloto, sendo o deslocamento na cumeeira, nó D. Percebeu-se que, neste caso, a estrutura-piloto reforçada teve pior desempenho. Isto, contudo, pode estar relacionado ao fato de que tais unidades já haviam sido testadas para cargas provavelmente superiores ao

regime elástico.

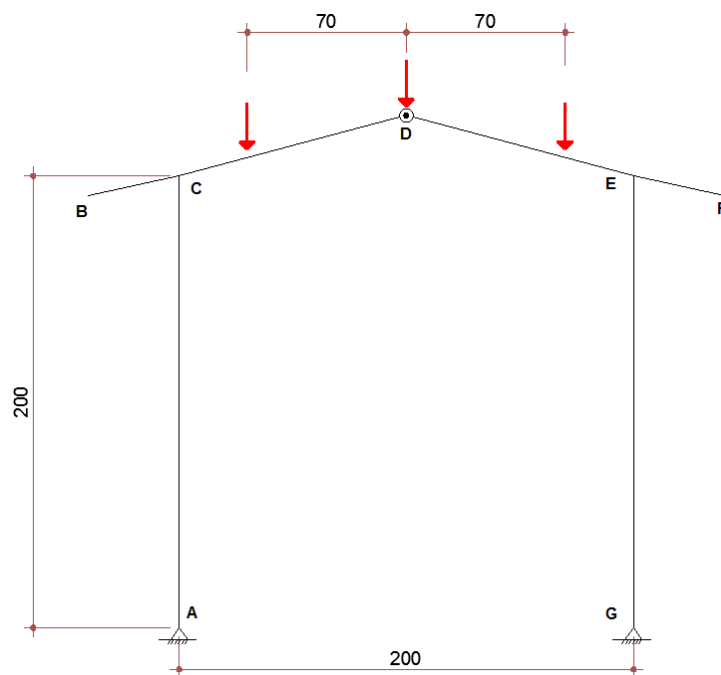


Figura 9 – Pontos de aplicação de carga no teste-piloto (em cm).

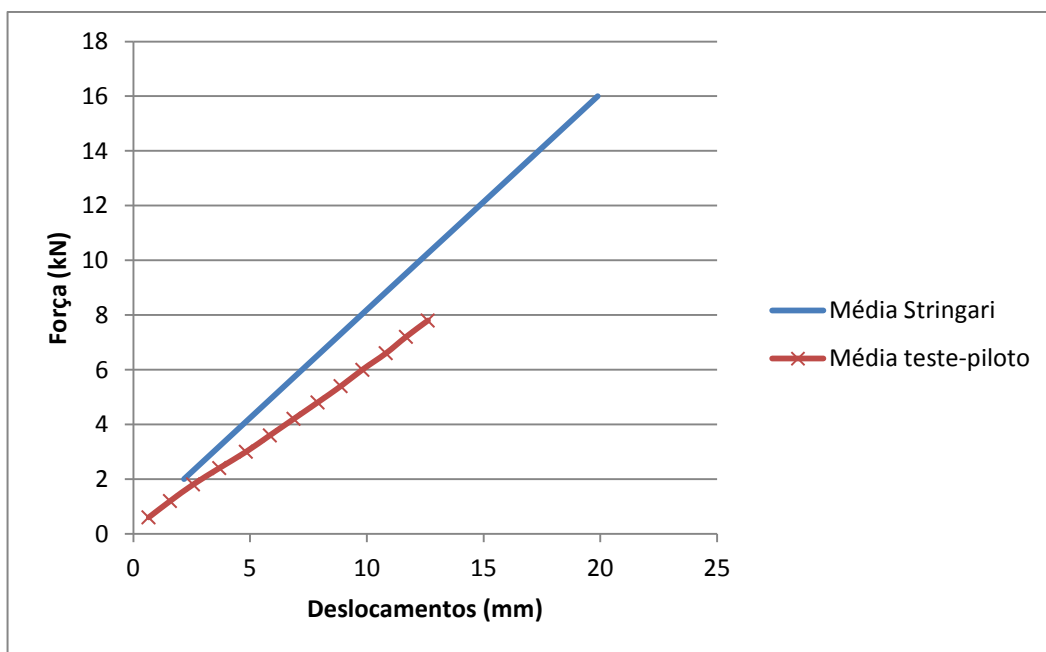


Figura 10 – Diagrama carga x deslocamento na cumeeira.

Diante destas evidências, foram executados os mesmos pórticos produzidos por Stringari (2019) com o diferencial dos reforços aplicados.

O fato de utilizar-se madeira do mesmo lote, o mesmo adesivo na mesma

proporção de mistura e adotar-se o mesmo projeto em escala reduzida, em idênticas condições de teste, permitiu a expectativa da comparação e da análise do desempenho dos reforços implementados.

Na pesquisa de Stringari (2019) todas as rupturas ocorreram na região da ligação rígida colada (nós C ou E). Contudo, com muita frequência, houve ruptura por tração perpendicular às fibras das lâminas provenientes da cobertura, como pode ser visto na Figura 11.



Figura 11 – Ruptura por tração perpendicular às fibras em estrutura sem reforço.

Fonte: Stringari (2019)

Para esta pesquisa optou-se por tentar diminuir tal tipo de ocorrência, prolongando-se estas barras para a região do beiral. A Figura 12 ilustra a solução final utilizada para os reforços implementados. Por fim, os comprimentos utilizados procuraram permitir que as peças contribuíssem para maior resistência da região afetada, com uma sobremedida necessária para que houvesse um “ancoramento” das lâminas envolvidas.

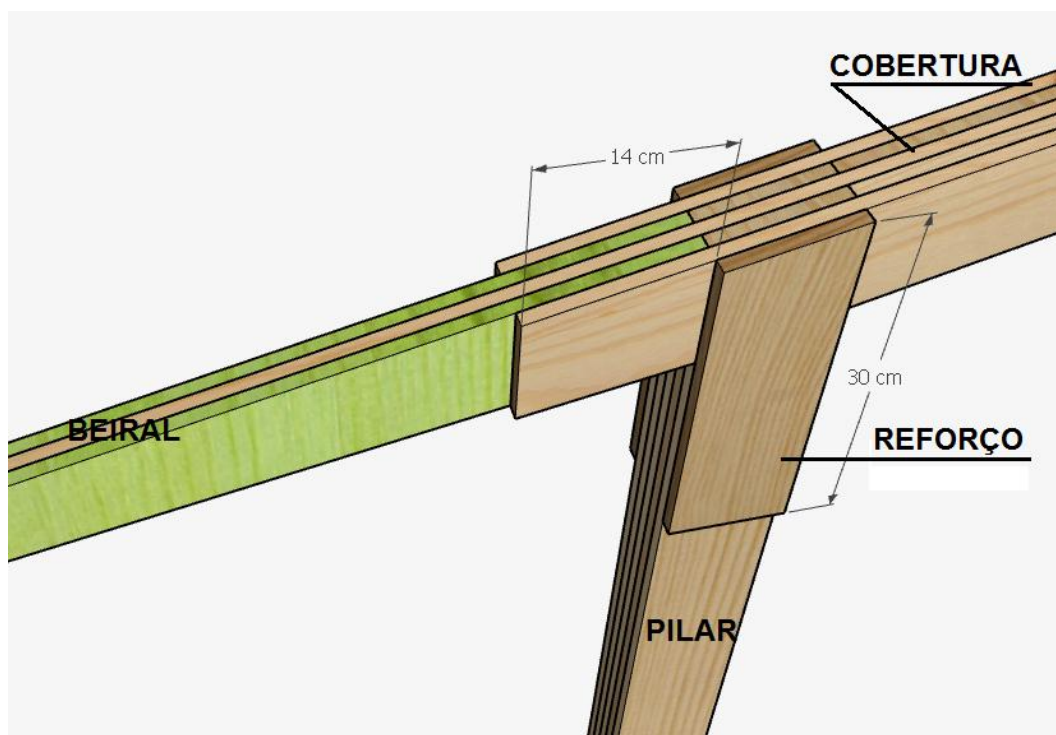


Figura 12 – Solução final das ligações com reforço.

3.3. Seleção da madeira

As peças de madeira encontravam-se no laboratório em forma de tábuas. Considerando que grande parte do lote foi utilizado para a caracterização e confecção das estruturas de Stringari (2019), restaram 56 tábuas. Estas tábuas restantes não eram as mais densas do lote e, ainda, apresentavam maior incidência de defeitos.

Das peças disponíveis, foram descartadas as que não possuíam as dimensões necessárias para execução do projeto. Posteriormente, dentre as selecionadas, optou-se pelas que apresentavam menor presença de nós, rachaduras, esmoados e empenamentos, além de priorizar peças que apresentavam maior densidade.

Nesta seleção, percebeu-se a possibilidade da execução de 6 pórticos reforçados. Portanto, neste trabalho foram executadas as seis unidades possíveis, porém somente cinco foram testadas e os resultados comparados àqueles obtidos por Stringari (2019).

3.4. Execução

Após escolhidas, as peças foram sujeitas a um processamento preliminar, consistindo em cortar e desengrossar as peças em tamanhos ligeiramente superiores ao de projeto, a fim de, no processamento final, obter as dimensões necessárias. O processamento final ocorreu no dia da montagem e colagem de cada unidade com o objetivo de obter superfícies recém preparadas para a colagem.

Depois de prontas, as peças foram dispostas numa mesa de prensagem adequada às dimensões das tábuas, conforme apresentado na Figura 11, e posteriormente aplicado o adesivo nas camadas sucessivas.

Adotou-se no preparo do adesivo a mistura, em massa, na seguinte proporção de isocianato para o poliols: 1:1,5; o consumo de adesivo foi de 290 g/m^2 e a pressão de colagem adotada foi de 0,7 MPa. A proporção foi a mesma de Stringari (2019) para fins comparativos, já o consumo de adesivo foi reduzido de 300 g/m^2 para 290 g/m^2 , pois o autor observou um desperdício excessivo de cola. A pressão de colagem também sofreu uma redução, de 1,1 MPa para 0,7 MPa, visto que as peças utilizadas neste trabalho possuíam densidade inferior às utilizadas por Stringari (2019).

Para ter o controle da pressão imposta pelos parafusos nos planos colados, foi utilizado um torquímetro eletrônico existente no LATEM. Este equipamento foi calibrado em todos os dias de colagem com auxílio de célula de carga e sistema de aquisição de dados. A Figura 13 ilustra a mesa de prensagem, com destaque ao sistema de aquisição de dados.

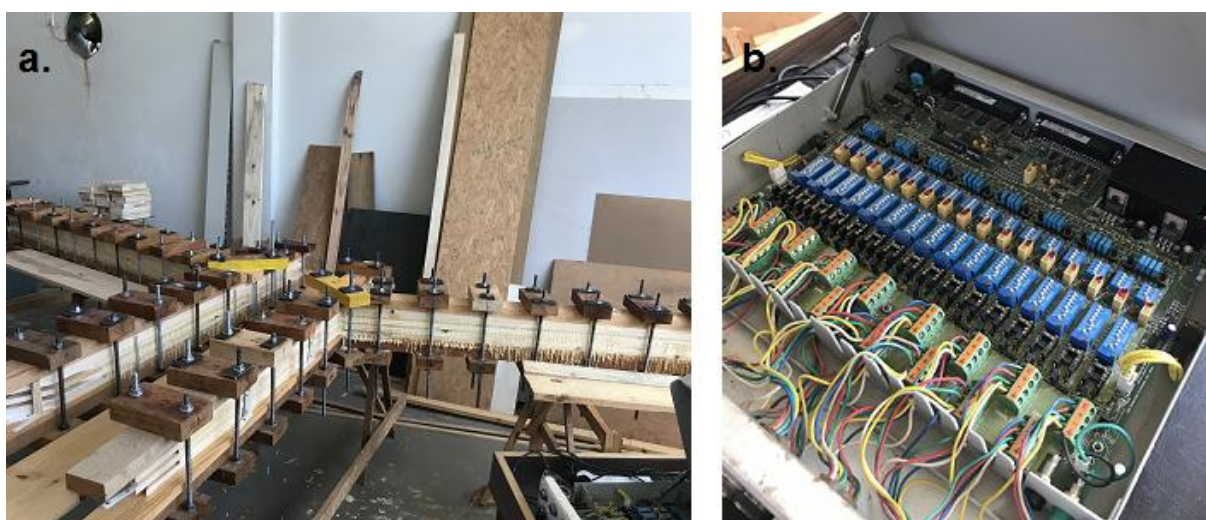


Figura 13 – Mesa de prensagem (a) e sistema de aquisição de dados (b).

Após a colagem, as estruturas foram mantidas sob pressão por, no mínimo, 12 horas, e, depois disso, retiradas da mesa de prensagem. O tempo mínimo transcorrido entre a colagem de cada pórtico e o respectivo ensaio foi de 24 dias.

3.5. Ensaio experimentais

Os testes dos pórticos foram feitos individualmente no quadro de reações disponível no LEME, conforme ilustra a Figura 14.



Figura 14 – Quadro de reações.

Os pórticos foram fixados para os ensaios e alguns aparatos construídos especificamente para o teste auxiliaram nos trabalhos. Os mesmos são ilustrados na Figura 15.

Os principais aparatos compreenderam:

- sistema de aplicação de cargas;
- sistema de aquisição de forças aplicadas;
- sistema de contraventamento;
- apoios dos pórticos; e,
- sistema de leitura dos deslocamentos.

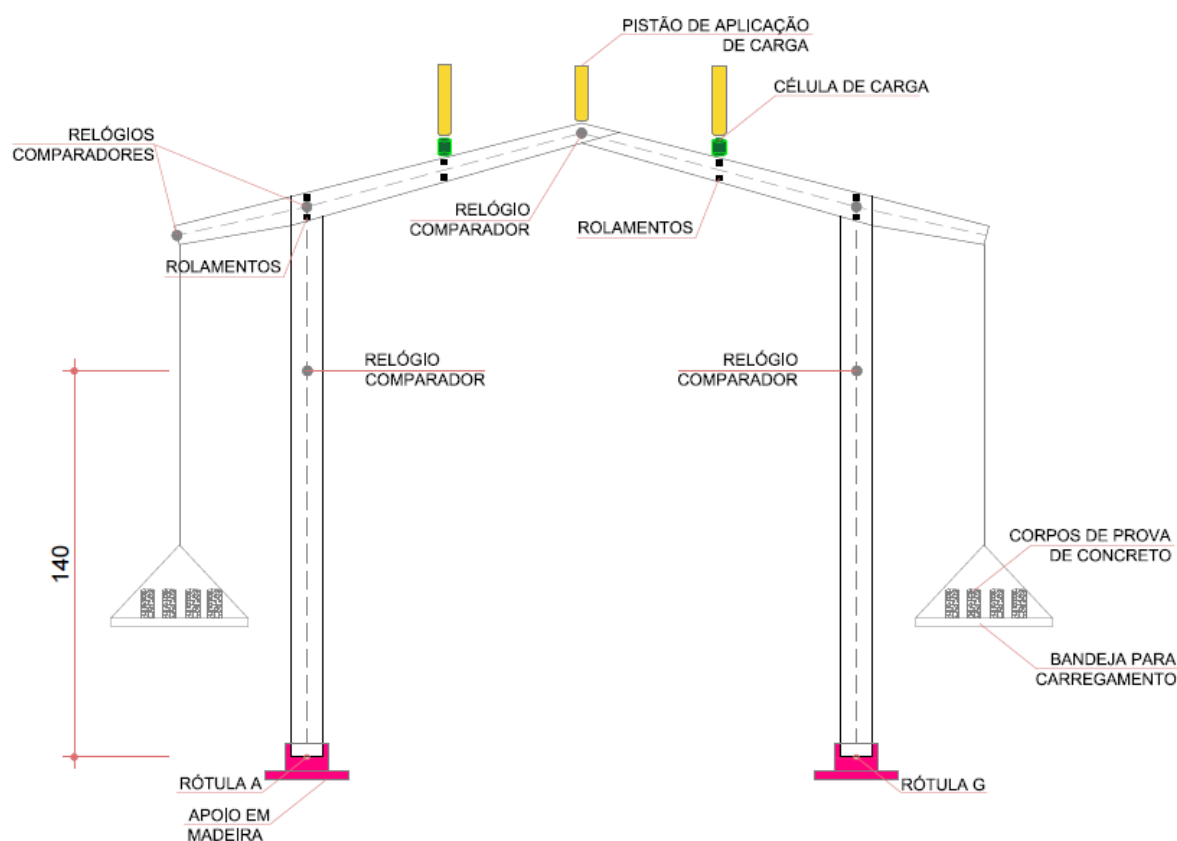


Figura 15 – Disposição geral dos aparatos para o teste.

O sistema de aplicação de cargas consistia em três pistões hidráulicos fixados verticalmente, responsáveis pela aplicação de carga na parte interna do pórtico e, duas bandejas, dispostas nas laterais dos pórticos, responsáveis pela aplicação de carga nos beirais (os pistões são apresentados, também, na Figura 16). O carregamento nas bandejas foi feito por meio da utilização de corpos de prova em concreto, previamente pesados (Figura 17). Os pontos de aplicação de carga são os apresentados na Figura 5.

A aquisição de forças aplicadas foi feita utilizando duas células de carga, que foram dispostas entre o cilindro e a estrutura, nos pontos de aplicação de carga localizados internamente nas vigas de cobertura.

O contraventamento da estrutura é necessário para permitir o deslocamento vertical e impossibilitar o deslocamento horizontal da mesma. Esse contraventamento foi feito utilizando um sistema de rolamentos, dispostos em diferentes pontos da viga de cobertura.

O apoio dos pórticos foi feito com rótulas desenvolvidas para a fixação das estruturas, nos pontos A e G. Durante os ensaios de Stringari (2019), as rótulas de

fixação da estrutura comportaram-se adequadamente e, portanto, não receberam alterações.

As leituras de deslocamento dos pórticos foram feitas a partir da utilização de seis relógios comparadores, com resolução de 0,01mm, instalados em pontos pré-estabelecidos.

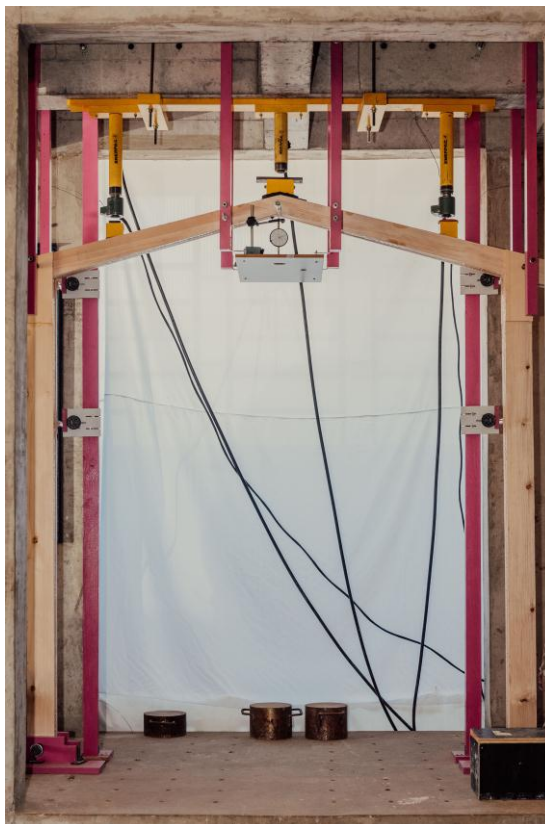


Figura 16 – Pórtico e aparatos instalados para o teste.



Figura 17 – Bandejas para aplicação de carga nos beirais.

Os ensaios foram conduzidos iniciando por uma aplicação de força total, próxima de 2 kN, para permitir uma acomodação inicial das estruturas e a conferência dos instrumentos. Posteriormente, retirou-se a carga inicial e utilizou-se a seguinte sequência:

- a) Aplicação de carga crescente até o nível correspondente à carga de projeto, incluindo o carregamento do beiral (6,946 kN);
- b) Descarregamento;
- c) Repetiu-se o item “a”;
- d) Descarregamento;
- e) Aplicação de carga crescente, objetivando ruptura. Até, aproximadamente, 20 kN com leitura dos relógios, sem aplicação de carga nos beirais. A partir de valores mais elevados foram retirados os relógios e os ensaios foram conduzidos até a ruptura.

É importante salientar que durante as etapas “a” e “e” foram anotados os valores de deslocamentos das estruturas indicados pelos relógios comparadores.

Após os testes, foram feitas as análises dos resultados obtidos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Resistência das estruturas

4.1.1. Considerações gerais sobre a resistência observada experimentalmente

Os ensaios foram conduzidos até o rompimento para cinco estruturas a fim de permitir analisar o comportamento e a resistência das mesmas. Na Tabela 3 são apresentadas as informações referentes à resistência dos pórticos.

Tabela 3 – Valores de resistência das estruturas

Pórtico	Local de Ruptura	Carga de Ruptura (kN)	Carga de Projeto (kN)	Quociente entre carga de ruptura e carga de projeto
1	Nó C e D	36,585	6,946	5,27
2	Nó C e D	41,295	6,946	5,95
3	Nó C e D	36,975	6,946	5,32
4	Nó E	38,40	6,946	5,53
5	Nó C e D	36,855	6,946	5,30
Média	-	38,022	6,946	5,47
Médias Pórticos Stringari		28,79	6,946	4,14

De acordo com a Tabela 3, pode-se perceber que todas as rupturas ocorreram na viga de cobertura e na seção limítrofe com as ligações rígidas (nós C ou E) e, para quatro das cinco unidades, também na cumeeira (nó D).

Nos casos em que as rupturas foram tanto próximas à ligação rígida quanto na cumeeira, não há como afirmar qual iniciou primeiro. Isso provavelmente ocorre pois durante a liberação da energia acumulada, a ruptura em si é brusca, de forma a poder danificar outros pontos da estrutura.

Nos experimentos de Couri Petrauski (2012) e Stringari (2019) todas as unidades romperam na viga de cobertura, muito próximas às ligações rígidas (nós C ou E – Figura 4). Ainda, os pesquisadores associaram as rupturas à tração

perpendicular às fibras de algumas das lâminas concorrentes nesta ligação. Considerando que o momento fletor atuante nessas ligações era de grande magnitude em ambos os casos, a tração na face externa das estruturas atingia valores elevados, confirmando esses resultados.

Provavelmente as lâminas dos pilares e vigas já haviam rompido à compressão, devido aos elevados níveis de carga aos quais estavam submetidas. Porém, dada à natureza brusca dos rompimentos à tração, a análise dos rompimentos à compressão foi comprometida, visto a dificuldade de avaliar as estruturas após seu rompimento.

Três das estruturas de Stringari (2019) também romperam na cumeeira (nó D) em conformidade ao ocorrido neste trabalho.

Percebeu-se, ainda, que não ocorreu em nenhum dos testes rompimento por tração perpendicular às fibras nos beirais, diferentemente das estruturas sem reforço. Acredita-se que isso se deu devido ao prolongamento das lâminas das vigas externas de cobertura, conforme ilustrado na Figura 12.

As Figuras 18, 19, 20, 21 e 22 apresentam os locais de ruptura das estruturas.



Figura 18 – Detalhes de ruptura do pórtico 1, nó C, vistas lateral e interna.

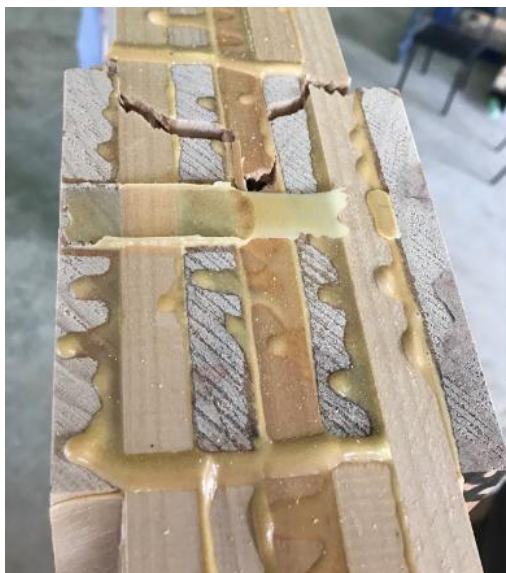


Figura 19 – Detalhes de ruptura do pórtico 2, vista superior do nó C e frontal do nó D, respectivamente.

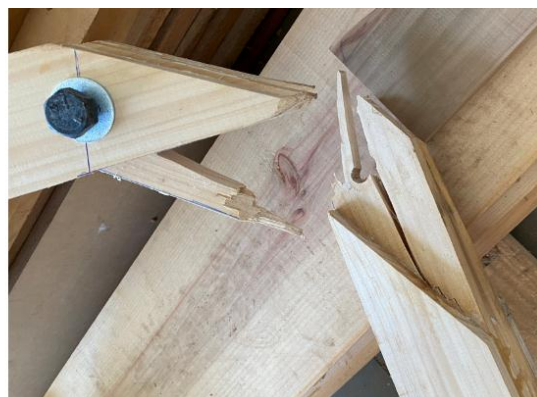


Figura 20 – Detalhes de ruptura do pórtico 3, vistas frontais dos nós C e D, respectivamente.



Figura 21 – Detalhe de ruptura do pórtico 4, nó E.



Figura 22 – Detalhes de ruptura do pórtico 5, vista frontal dos nós C e D, respectivamente.

Referente aos quocientes entre a carga de ruptura e a carga de projeto, obteve-se um valor de 5,47, ou seja, em média, as estruturas apresentaram um desempenho quanto à resistência 5,47 vezes maior que o definido pelo projeto, evidenciando desempenho satisfatório quanto à segurança. Este quociente foi calculado seguindo a mesma metodologia realizada por Couri Petrauski (2012) e por Stringari (2019). Neste sentido, tem valor comparativo. Algumas explorações adicionais, contudo, serão feitas na próxima seção.

A influência positiva dos reforços sobre a resistência também pode ser percebida se comparar-se com o valor médio do quociente de carga de ruptura e carga de projeto das estruturas de Stringari (2019), que foi de 4,14. Ou seja, o reforço nas ligações críticas resultou em um aumento médio de 32% de resistência.

Quanto à comparação desse aumento de resistência e do aumento verificado no teste-piloto (42%), acredita-se que, pela estrutura do teste-piloto ter sido executada com madeira mais densa e com menos defeitos, seu comportamento com os reforços foi melhor. Ou seja, apesar dos reforços auxiliarem no aumento de resistência das estruturas, é essencial a utilização de peças mais densas e com menor quantidade de defeitos.

O quociente encontrado nas estruturas do presente trabalho também superou os quocientes encontrados por Couri Petrauski (2012), que foram 4,42 de média para as duas unidades coladas com adesivo de mamona e 4,63 para as três unidades coladas com resorcinol formaldeído. Tais resultados confirmam o bom

desempenho quanto à resistência das estruturas testadas.

4.1.2. Revisão da carga de projeto sem reforço

A rigor a “Carga de Projeto” estabelecida por Stringari (2019) envolve a solução da estrutura do aviário com carregamento no beiral. Ainda, envolve o uso do coeficiente de modificação $k_{mod,1}$ para carga de longa duração. Aplicando-se $k_{mod,1}$ com valor unitário, realidade apropriada para o ensaio conduzido, os valores de resistência de projeto utilizados pelo autor, ficariam:

$$- f_{c0,d} = 26,2 \text{ MPa}; \quad - f_{v0,d} = 3,9 \text{ MPa}; \quad \text{e} \quad E_{co,ef} = 12723,2 \text{ MPa}$$

Como a limitação, conforme apresentado no item 3.2.1 deste trabalho, foi a resistência da madeira para absorção do momento fletor, uma forma de prever o novo valor do momento fletor resistente é a aplicação da Equação 8. Neste caso, teremos:

- para duas barras resistentes no pilar, na região da ligação, sendo $b = 3 \text{ cm}$, $h = 11,1 \text{ cm}$ e $f_{c0,d} = 26,2 \text{ MPa}$:

$$M_{d,pilar} \leq \frac{b \cdot h^2 \cdot f_{c0,d}}{6} \leq 1614,1 \text{ N.m}$$

- para três barras resistentes na viga de cobertura, na região da ligação, sendo $b = 4,5 \text{ cm}$, $h = 10 \text{ cm}$ e $f_{c0,d} = 26,2 \text{ MPa}$:

$$M_{d,viga} \leq \frac{b \cdot h^2 \cdot f_{c0,d}}{6} \leq 1965 \text{ N.m}$$

Portanto, haja vista o mais baixo desempenho da madeira à compressão e as condições iniciais do projeto de Stringari (2019), a limitação continuaria sendo referente às duas lâminas do pilar. Para o novo momento fletor limite (1614,1 N.m) a situação equivalente durante os ensaios seria atingida para um carregamento equivalente a três cilindros com 2,287 kN cada. Isto foi obtido por simulações no *Software Ftool* (Martha, 2018). Portanto, a “nova” carga equivalente de projeto, considerado o trabalho de Stringari (2019) e adequada à forma de condução da

ruptura das unidades, seria de 6,86 kN. Neste caso, o quociente médio entre as cargas de ruptura e esta nova “carga equivalente de projeto” passa a ser de 5,54 para as estruturas testadas nesta pesquisa.

4.1.3. Análise das tensões de ruptura do pórtico com reforço

Outra forma de se avaliar o desempenho resistente dos pórticos testados, com reforço nas ligações rígidas, compreende o cálculo das estimativas das tensões atuantes no momento da ruptura, comparando-as com as resistências obtidas durante a caracterização da madeira. Sabe-se que o nível de solicitação, na ruptura, deve ocorrer próximo do limite de resistência apresentado pela madeira.

Como a carga média total de ruptura foi de 38,02 kN, isto equivale a três cilindros carregados com 12,67 kN cada, no momento da ruptura. Aplicando-se tal carregamento numa estrutura implementada no Ftool, obteve-se os esforços indicados na Tabela 4 para a região crítica, ou seja, a ligação colada nos nós C e E. Conforme se observa, as solicitações no beiral passaram a ser nulas (barra BC). Ainda, nesta análise, passaram a ser consideradas as resistências características apresentadas na Tabela 1.

Aplicadas as fórmulas próprias da Resistência dos Materiais ou aquelas previstas pela NBR 7190 (1997) para atuação de esforços simples, isoladamente, foram estimadas as tensões no momento da ruptura, à compressão, tração e cisalhamento, para as lâminas resistentes dos pilares e vigas junto ao nó C/E. Estas tensões são apresentadas na Tabela 5, comparativamente às resistências. Ainda, realizou-se o quociente entre as tensões estimadas na ruptura e aquelas resistentes.

Tabela 4 – Estimativas dos esforços médios atuantes na ligação rígida, no momento da ruptura

Barra	Mr (kN.m)	Vr (kN)	Nr (kN)
AC	8,94	-4,47	19,00 (compressão)
BC	0,0	0,0	0,0 (tração)
CD	8,94	17,2	9,24 (compressão)

Tabela 5 – Tensões estimadas no momento da ruptura, comparativamente às tensões resistentes, para as estruturas reforçadas

		AC – Pilar (b= 6 cm; h= 11,1 cm)	CD – Viga (b= 4,5 cm; h = 10 cm)
COMPRESSÃO	Barra		
	$\sigma_{c,ruptura}$ (MPa)	72,56	119,2
	$f_{c0,k}$	45,8	45,8
TRAÇÃO	σ_r / f_k	1,58	2,6
	$\sigma_{t,ruptura}$ (MPa)	72,56	119,2
	$f_{tv0,k}$	120,2	120,2
CISALHAMENTO	σ_r / f_k	0,60	0,99
	$\tau_{v,ruptura}$ (MPa)	1,01	5,73
	$f_{v0,k}$	8,8	8,8
	τ_r / f_k	0,11	0,65

Nas duas primeiras faixas horizontais da Tabela 5 estão apresentadas, respectivamente, as tensões de compressão e de tração, associadas ao momento fletor atuante. Perceba-se, nestes casos, que as 3 lâminas resistentes da viga (barra CD) foram muito mais solicitadas que as 4 lâminas resistentes dos pilares (barra AC). Ainda, para as vigas, estima-se que as tensões de compressão paralela tenham superado a resistência à compressão da madeira em 2,6 vezes. Isto é uma evidência interessante no sentido de que estas lâminas já estariam sob esmagamento ou fora do regime elástico. Como o esforço associado é o momento fletor, percebe-se que a face oposta destas lâminas, no momento da ruptura, já estava sob uma tensão de tração muito próxima do limite da madeira ($\sigma_{t,r}/f_{t,k} = 0,99$). Como consequência, a ruptura ocorreu de forma brusca, tendo-se esgotado o limite de resistência destas lâminas (barras CD) à tração. Isto fica bem evidente com a observação da Figura 18.

Na última faixa da Tabela 5 apresentam-se as estimativas das tensões associadas ao esforço cortante. Novamente, as lâminas da viga (barra CD) estariam, na ruptura, sujeitas a um nível de solicitação muito superior àquelas do pilar (barra AC). Dadas as evidências, a resistência final oferecida pelos pórticos reforçados

parece compatível com o esgotamento da capacidade resistente à tração paralela. Contudo, evidencia-se, também, o esgotamento da capacidade resistente à compressão, fenômeno que deve ter ocorrido antes.

Destaca-se que a utilização dos reforços ocasionou a mudança de modo de ruptura que era das lâminas dos pilares (originalmente 2) para as lâminas das vigas (originalmente 3).

4.1.4. Verificações à flexo-compressão e ligação colada para o pórtico com reforço

A verificação à flexo-compressão, na região de ligação, foi feita utilizando-se a equação (Eq. 10) recomendada no item 7.3.6 da NBR 7190 (1997) apresentada a seguir. Contudo, considerou-se exclusivamente a ação de momento fletor no plano do pórtico.

$$\left(\frac{\sigma_{Nc,r}}{f_{c,k}}\right)^2 + \frac{\sigma_{M,r}}{f_{c,k}} \leq 1 \quad \text{Eq. 10}$$

Aplicando-se os valores apropriados para as lâminas da barra CD (viga) e a resistência característica da madeira à compressão, obtém-se:

$$\left(\frac{\frac{924}{4,5 \cdot 10}}{458}\right)^2 + \frac{1192}{458} \leq 1 \quad \therefore \quad 2,6 > 1$$

Novamente, conclui-se que as tensões atuantes à compressão paralela, no momento da ruptura, esgotaram em 2,6 vezes a capacidade da madeira. Este valor é muito próximo do apresentado na Tabela 5 para a tensão de compressão associada ao momento fletor. Contudo, é um resultado condizente, uma vez que na Equação 10 a parcela proveniente do esforço normal é elevada à segunda potência e, ainda, neste caso, a tensão associada exclusivamente ao esforço normal é pequena frente àquela referente ao momento fletor.

Aplicando-se a Equação 9 pode-se ter uma ideia do nível de exigência sobre a ligação colada no momento da ruptura. Essa aplicação é demonstrada na sequência.

$$\left(\frac{2.89400 \cdot \pi^{1/2}}{6 \cdot 59,6}\right)^{2/3} + \frac{1900}{6 \cdot 31,78} + \frac{1720}{6 \cdot 30,3} \leq \frac{10 \cdot 11,1}{\text{sen}(75)} \quad \therefore$$

$$92,26 + 9,96 + 9,46 \leq 114,9 \therefore 111,68 < 114,9$$

Percebe-se que passaram a ser seis planos colados e, portanto, nesta aplicação fez-se $n= 6$. No momento da ruptura a exigência sobre a ligação foi considerável. Em termos práticos, a área necessária, nesta situação, equivaleu a 97% da área colada disponível. Contudo, a primeira parcela do primeiro membro da equação indica, neste caso, um raio mínimo colado de 5,42 cm para resistência ao momento fletor atuante. Portanto, é outra evidência de que, na ruptura, a ligação projetada colada também estava solicitada em seu limite.

As evidências aqui apresentadas, em especial nos itens 4.1.3 e 4.1.4, tratando da estrutura com reforço, parecem confirmar que os níveis de segurança apresentados para o quesito resistência foram satisfatórios e compatíveis com os modos de ruptura obtidos.

4.2. Rigidez das estruturas

Para analisar a rigidez apresentada pelas estruturas foram utilizados os dados de seis relógios comparadores, dispostos conforme apresentado na Figura 23. Ressalta-se que essa disposição se deu para priorizar a análise de pontos com maior nível de deformação apresentados pelo Software Ftool (Martha, 2018), conforme ilustrado na Figura 24.

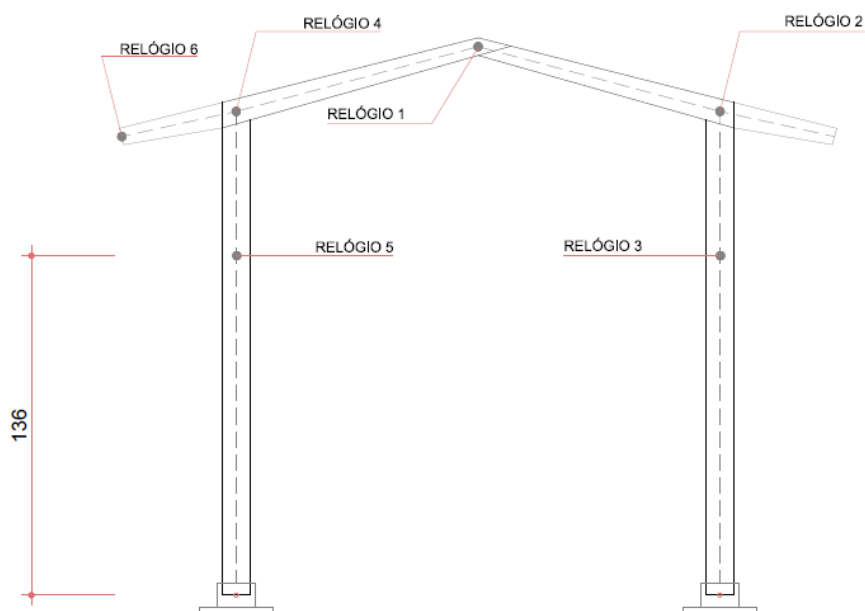


Figura 23 – Nomenclatura dos relógios comparadores.

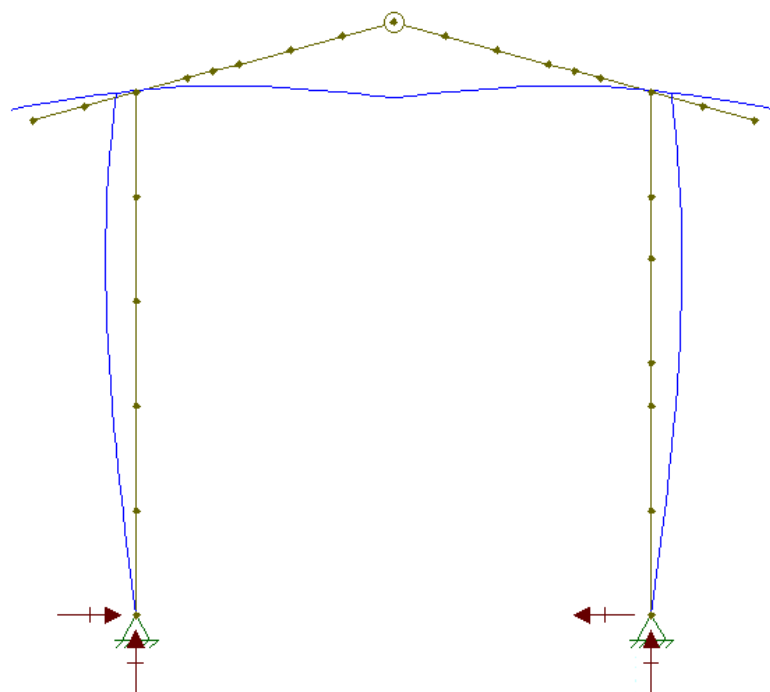


Figura 24 – Esquema de deformação apresentada pelos pórticos a partir do Ftool.

Na Tabela 6 são apresentadas as médias gerais de deslocamentos lidos nos relógios dispostos conforme Figura 23, durante os testes com carregamento nos beirais. Os valores dos relógios 2 e 4, e 3 e 5 são apresentados em média pois correspondem a mesma posição de relógio em cada lado da estrutura.

Tabela 6 – Valores de deslocamentos médios (mm) para carga de projeto (6,946 kN) para os testes com carregamento no beiral

Pórtico	Relógio 1	Relógios 2 e 4	Relógios 3 e 5	Relógio 6
1	5,35	1,576	2,2708	0,835
2	6,379	1,922	2,814	1,37
3	5,781	1,901	2,539	1,283
4	5,582	1,584	2,457	1,144
5	5,536	1,629	2,446	1,08
Média	5,726	1,722	2,505	1,142
Coeficiente de variação	6,18%	9,03%	7,08%	16,14%

Para melhor analisar os dados, foi feita a média dos deslocamentos apresentada pelos relógios e o coeficiente de variação a fim de verificar a variabilidade dos dados entre si. Os coeficientes de variação obtidos apresentaram-se no intervalo entre 6,18% à 16,14%, ou seja, os dados apresentaram baixa dispersão entre si, podendo ser classificados como homogêneos.

Uma das consequências esperadas com o uso dos reforços utilizados nas ligações dos pórticos era o aumento da rigidez das estruturas. Esse acréscimo de rigidez, de fato, pode ser comprovado a partir da comparação apresentada na Figura 25. Nesta figura são apresentados os deslocamentos obtidos teoricamente pelo Ftool para as estruturas com reforço, os deslocamentos médios reais obtidos nos ensaios de Stringari (2019) e os deslocamentos médios reais obtidos, neste trabalho, para estruturas reforçadas. Todas as flechas apresentadas são referentes ao valor de carregamento de projeto, 6,946 kN.

A Figura 25 permite perceber que as estimativas do programa Ftool foram todas mais pessimistas do que as obtidas nas experimentações. O fato do programa não permitir a implementação da variação linear das inércias nas barras inclinadas pode ter relação com esta ocorrência. Neste caso, as variações de inércia foram feitas por meio da subdivisão das barras em trechos.

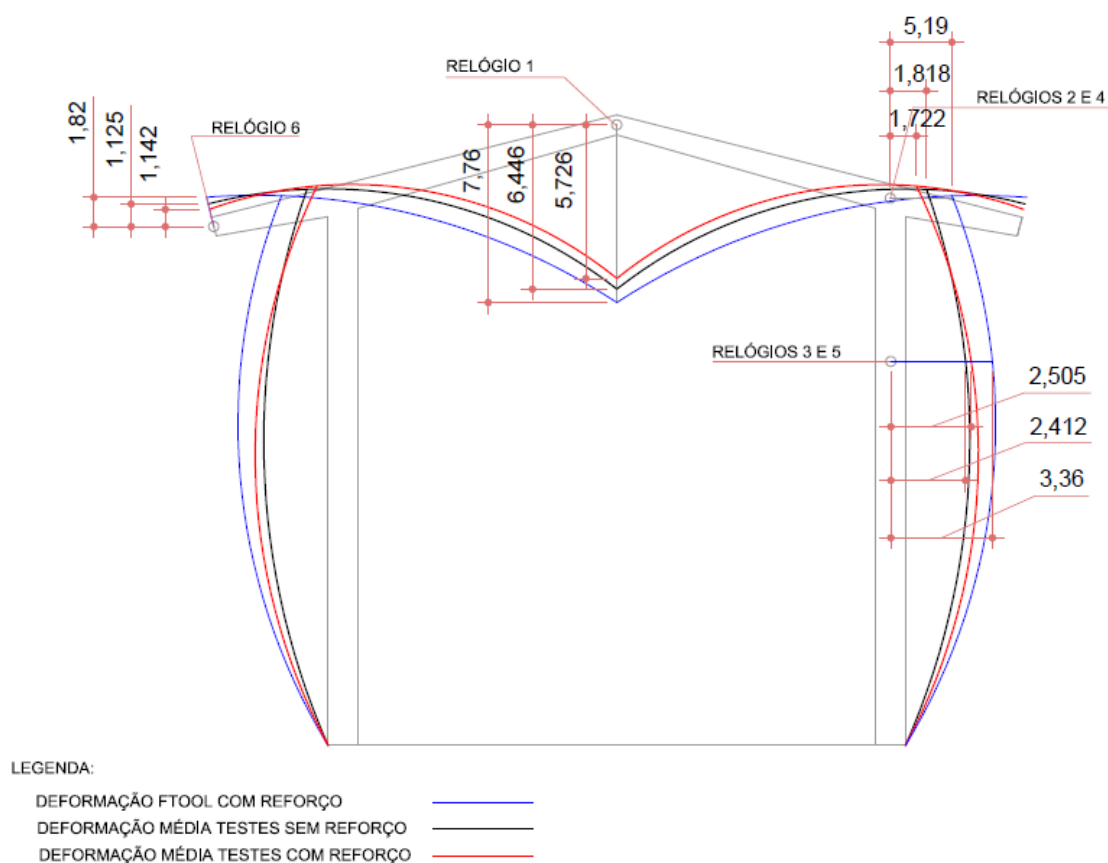


Figura 25 – Comparação entre o deslocamento esperado pelo Ftool, média dos deslocamentos obtidos pelas estruturas sem reforço (Stringari, 2019) e com reforço, em mm, para carregamento de projeto.

Outros fatores que podem ter influenciado na expectativa pessimista do programa foram: a) a cumeeira, nó D, na realidade é mais rígida que o esperado pelo programa, que, por sua vez, trata o nó D como rótula. Isso ocorreu porque na execução das estruturas o encaixe feito em D fez com que o mesmo deforme menos do que se fosse uma rótula; e, b) o programa considerou ainda o mesmo módulo de elasticidade para toda a estrutura, sendo este médio.

Comparando os deslocamentos registrados por Stringari (2019) e os obtidos neste trabalho, percebeu-se que, à exceção dos pilares, os deslocamentos observados foram inferiores. Tal evidência parece confirmar um reflexo positivo dos reforços implementados sobre a rigidez. Quanto aos pilares, pode ser que o fato de Stringari (2019) ter trabalhado com a madeira mais densa do lote e com menor presença de defeitos, tenha permitido maior rigidez.

Os gráficos de cargas x deslocamentos no relógio 1, da cumeeira, são apresentados nas Figuras 26 e 27, sendo apresentados os diagramas para os testes com e sem aplicação de carga nos beirais, respectivamente.

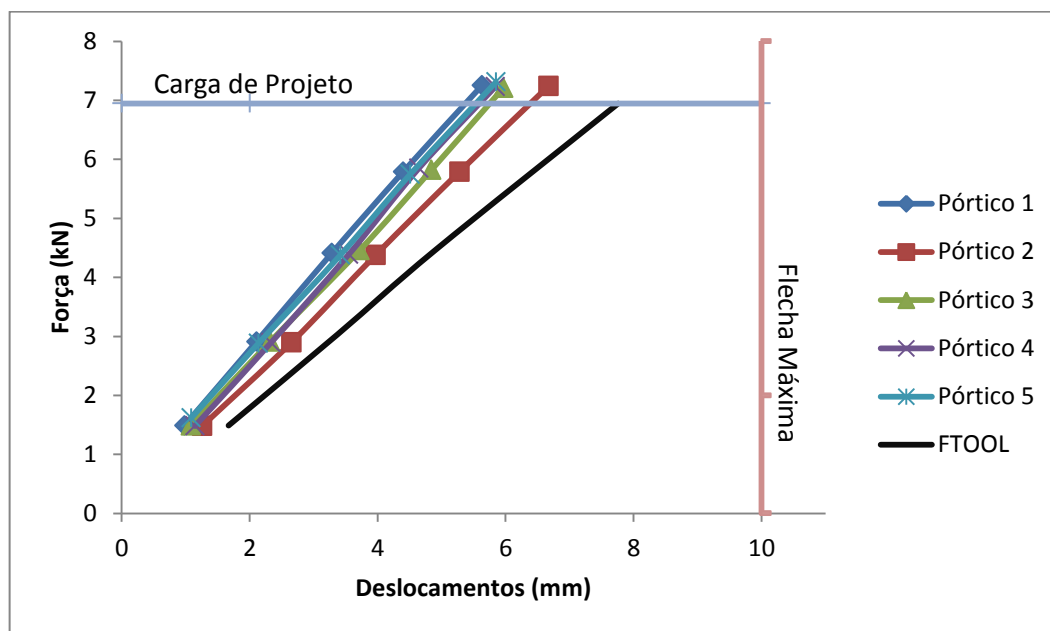


Figura 26 – Diagrama carga x deslocamento apresentado pelo relógio 1, cumeeira, com aplicação de carga nos beirais.

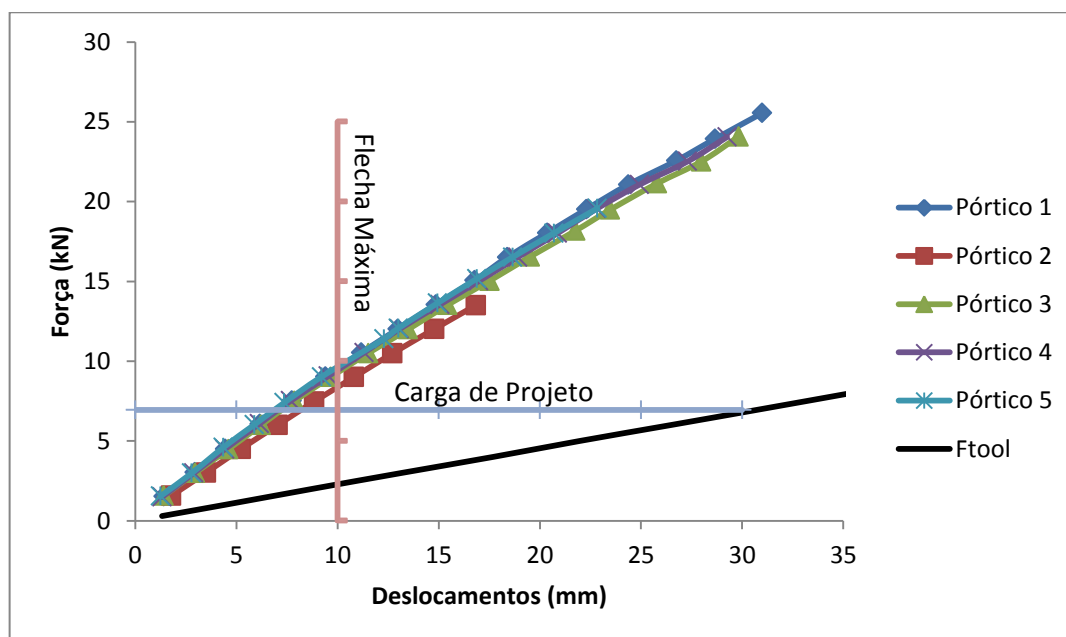


Figura 27 – Diagrama carga x deslocamento apresentado pelo relógio 1, cumeeira, sem aplicação de carga nos beirais.

De acordo com a NBR 7190 (1997), a flecha máxima permitida para este tipo de estrutura, no ponto médio da mesma, é igual à $L/200$, sendo L o vão livre da estrutura, neste caso, 200 cm. Sendo assim, é admitida uma flecha de até 10 milímetros, na cumeeira, para pórticos dessa geometria. Percebe-se na Figura 26 que, apesar de todos os pórticos estarem sujeitos à carga de projeto, nenhum deles atingiu a flecha limite máxima permitida pela norma.

Percebe-se na Figura 27 que o acompanhamento das flechas na cumeeira, para a maioria das estruturas, foi feito para cargas superiores a 3 vezes a carga de projeto. Todas as estruturas apresentaram a flecha limite de 10 mm para cargas mais elevadas que a de projeto. Ainda, a estimativa do programa Ftool para este deslocamento foi bastante pessimista em relação ao observado.

Nas Figuras 28 e 29 são apresentados os diagramas cargas x deslocamentos médios, comparativamente àqueles obtidos por Stringari (2019), associados à cumeeira. Neste caso, porém, utilizou-se de equações de regressão.

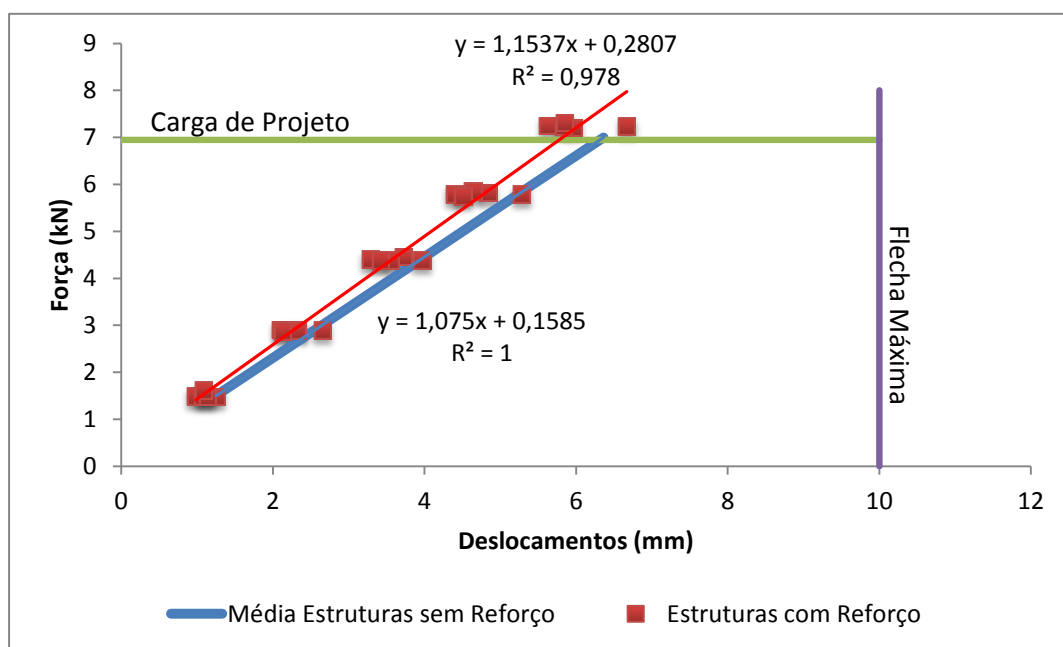


Figura 28 – Diagrama de carga x deslocamento das médias apresentadas pelo relógio 1, para as estruturas com reforço e sem reforço (Stringari, 2019), com carregamento nos beirais.

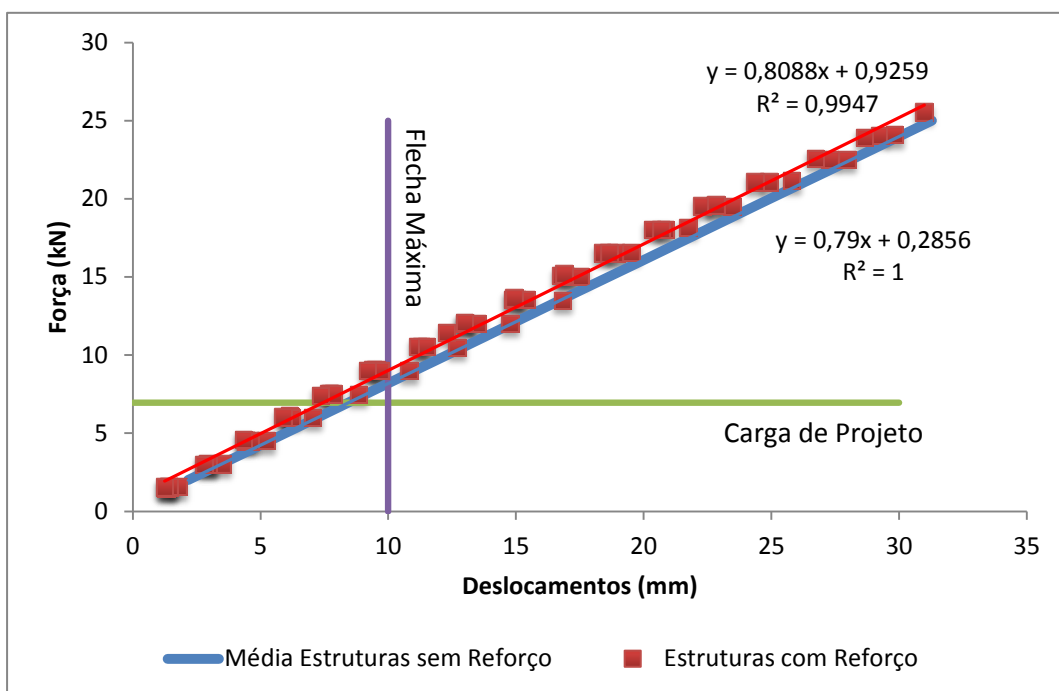


Figura 29 – Diagrama de carga x deslocamento das médias apresentadas pelo relógio 1, para as estruturas com reforço e sem reforço (Stringari, 2019), sem carregamento nos beirais.

Percebe-se nas duas figuras que, independentemente dos níveis de carga aplicados, os deslocamentos observados para as estruturas sem reforço de Stringari (2019) foram superiores às com reforço.

5. CONCLUSÕES

Considerados os objetivos do trabalho e as condições de seu desenvolvimento, pode-se concluir que:

- Quanto à resistência, as estruturas romperam com carregamento médio 5,47 vezes maior que o de projeto das estruturas sem reforço. Como consequência, comparativamente às estruturas não reforçadas, houve um aumento médio de 32% de resistência;
- Considerados os modos de ruptura e as estimativas das tensões atuantes na ruptura, as estruturas reforçadas foram solicitadas para tensões compatíveis ou mesmo superiores aos limites de resistência da madeira utilizada. Neste sentido, o comportamento resistente das estruturas executadas foi, também, satisfatório;
- Os resultados apresentados pelas estruturas foi igualmente satisfatório, visto que a madeira utilizada foi de qualidade inferior à de Stringari (2019) e, ainda, obteve-se um aumento de resistência e rigidez devido aos reforços, que equivaleram a, aproximadamente, 3% de aumento de material;
- Quanto à rigidez, também houve um reflexo positivo nos deslocamentos se comparados às estruturas sem reforço. Além disso, as estruturas atingiram a flecha máxima prescrita pela norma apenas em carregamentos superiores aos de projeto;
- Os elevados coeficientes de determinação das equações de regressão, feitas para análise dos deslocamentos observados na cumeeira, são, também, uma evidência de um comportamento linear destes deslocamentos sob cargas crescentes;
- A utilização dos reforços nas ligações impactou positivamente a resistência e a rigidez das estruturas construídas e testadas, com um baixo investimento em madeira e adesivo;
- De acordo com o apresentado nesse trabalho, pórticos em madeira laminada colada apresentaram comportamento satisfatório quanto aos critérios de resistência e rigidez, sendo considerada viável sua utilização para fins estruturais.

Destaque-se, complementarmente, que as rupturas ocorreram nas ligações principais dos pórticos, fato condizente às evidências obtidas nas fases de projeto e/ou verificação. Percebeu-se, ainda, que os prolongamentos nas vigas de cobertura conseguiram evitar, para as lâminas das vigas, o rompimento por tração perpendicular às fibras nos beirais, diferente do ocorrido nas estruturas sem reforço.

Como contribuição para trabalhos futuros, foi executado um pórtico juntamente com os outros cinco, para um ensaio de outra natureza. Essa estrutura foi escolhida aleatoriamente, e será instalada no LATEM para ser submetida a um carregamento contínuo de longa duração. Espera-se submetê-la a cargas por um período da ordem de 5 anos, objetivando analisar seus deslocamentos durante o tempo e, ao final do período, avaliar sua resistência final.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABPA – Associação Brasileira de Proteína Animal. Disponível em: <http://abpa-br.com.br/>. Acesso em: 29 mar. 2019.

ALMEIDA, Diego Henrique de. **Proposta de método de ensaio para a determinação da resistência da madeira ao embutimento**. 2014. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

AMORIM, Miguel Ângelo Guerra. **Análise estocástica da robustez de estruturas porticadas em madeira**. 2010. 152p. Dissertação (Doutorado em Estruturas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010. Disponível em: <https://run.unl.pt/handle/10362/5381>. Acesso em: 24 abr. 2019.

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

AZAMBUJA, Maximiliano dos Anjos. **Estudo experimental de adesivos para fabricação de madeira laminada colada: avaliação da resistência de emendas dentadas, da durabilidade e de vigas**. 2006. 159p. Dissertação (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-22112010-145050/en.php>. Acesso em: 15 mar. 2019.

AZEVEDO, Elaine Cristina de. **Efeito da radiação nas propriedades mecânicas do adesivo de poliuretano derivado do óleo de mamona**. 2009.153p. Dissertação (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. **Agroindústria. Avicultura de postura: estrutura da cadeia produtiva, panorama do setor no Brasil e no mundo e o apoio do BNDES**. 2016. BNDES Setorial, n. 43. p. 167 – 207. Semestral. ISSN 1414-9230. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/9579/3/BS%2043%20Avicultura%20de%20postura_estrutura%20da%20cadeia%20produtiva_corrigido_P_BD.pdf. Acesso em: 24 abr. 2019.

CALIL NETO, Carlito; LAHR, Francisco Antonio Rocco. **Ligações em madeira com parafusos auto-atarraxantes sem pré-furação para uso estrutural**. Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v. 15, n. 65, p. 25-28, 2013. Disponível em: <http://cadernos.set.eesc.usp.br/article/view/337>. Acesso em: 23 abr. 2019.

COPACOL – Cooperativa Agroindustrial Consolata. Disponível em: <https://www.copacol.com.br/>. Acesso em: 02 abr. 2019.

CORREIA, Emanuel André Soares. **Análise e dimensionamento de estruturas de madeira**. 2009. 163p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2009. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/59338/1/000136915.pdf>. Acesso em: 30 mai. 2019.

COSTA, Elvania Maria da Silva; DOURADO, Leilane Rocha Barros; MERVALL, Ramon Rêgo. **Medidas para avaliar o conforto térmico em aves**. PUBVET, Maringá, v.6, p.1450-1454, 2012. Disponível em: <http://www.pubvet.com.br/uploads/fe2366b3bee041c79690dfe74f637380.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2019.

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. 119p. Dissertação (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

DIAS, Fabrício Moura. **Aplicação de resina poliuretana à base de mamona na fabricação de painéis de madeira aglomerada**. 2008. Produtos derivados da madeira: síntese dos trabalhos desenvolvidos no Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira, SET-EESC-USP. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. p.73-92.

GERDAU. **Artigo Técnico: Galpões em Pórticos de Aço**. 2018. Disponível em: <https://www2.gerdau.com.br/downloadable-resource/galpoes-em-porticos-com-perfis-estruturais-laminados>. Acesso em: 21 mai. 2019.

GONÇALVES, Tiago Andre Pedrosa. **Estudo experimental de nós de pórticos de madeira em betão armado**. 2014. 86p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2014. Disponível em: <https://estudogeral.uc.pt/handle/10316/38561>. Acesso em: 3 jun. 2019.

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório 2017**. São Paulo, 2017. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/pdf/iba-relatorioanual2017.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2019.

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório 2019**. São Paulo, 2019. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>. Acesso em: 03 mai. 2019.

IBGE. **Produção da extração vegetal e silvicultura (PEVS)**. Rio de Janeiro, 2016. v. 31, p. 1-54. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/74/pevs_2016_v31.pdf. Acesso em: 02 de mai. 2019.

KEHL, Indústrias e Comércio LTDA. **Adesivos**. Disponível em: <http://www.kehl.ind.br/poliuretanos>. Acesso em: 15 abr. 2019.

LAR, Cooperativa Agroindustrial. Disponível em: <http://www.lar.ind.br/v4/>. Acesso em: 02 abr. 2019.

LLIGADAS, Gerard; RONDA, Juan C.; GALIÀ, Marina; CÁDIZ, Virginia **Renewable polymeric materials from vegetable oils: a perspective**. Materials today, v. 16, n. 9, p. 337-343, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702113002940>. Acesso em: 10 mai. 2019.

Manual de segurança e qualidade para a avicultura de postura. 2004. 96p. (Série Qualidade e Segurança dos Alimentos). Instituições responsáveis: CNI, SENAI: SEBRAE: CNI, SESI: SESC Nacional: Senac: SENAR: ANVISA: Embrapa. Brasília, DF: CampoPAS, 2004. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/18216/1/MANUALSEGURANCA>

MARQUES, Jeanne Letícia da Silva. **Desenvolvimento de adesivos nanocompósitos de poliuretano à base de óleo de mamona**. 2009. 110p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/23938>. Acesso em: 16 abr. 2019.

MARTHA, Luiz Fernando. **FTOOL: Programa gráfico-interativo para ensino de comportamento de estruturas**. Versão 4.00.04 básica. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica Rio de Janeiro, 2018.

MARTINS, Tomás Francisco Ribeiro Mendes. **Dimensionamento de Estruturas em Madeira – Coberturas e Pavimentos**. 2010. 165p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010.

MIOTTO, José Luiz; DIAS, Antonio Alves. **Produção e avaliação de vigas de madeira laminada colada confeccionadas com lâminas de eucalipto**. Revista Tecnológica, Maringá, v. Edição Especial ENTECA, p. 37-47, 2010. Disponível em: <http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/RevTecnol/issue/view/412/showToc>. Acesso em: 16 abr. 2019.

MIRANDA, Mariana Maia de. **Fator de emissão de gases de efeito estufa da geração de energia elétrica no Brasil: implicações da aplicação da Avaliação de Ciclo de Vida**. 2012. 162 p. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-22012013-112737/en.php>. Acesso em: 26 mar. 2019.

MMA – Ministério do Meio Ambiente do Governo do Brasil. **Produtos Madeireiros e Não Madeireiros**. 2019. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/florestas/manejo-florestal-sustent%C3%A1vel/produtos-madeireiros-e-n%C3%A3o-madeireiros.html>. Acesso em: 02 mai. 2019.

PEIXOTO, A. L. G., **Caracterização da madeira de *Araucaria angustifolia* e projeto de pórticos em madeira laminada colada para cobertura cerâmica**. 2017. 76f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017.

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

PNDP – **Plano Nacional de Desenvolvimento de Florestas Plantadas**. 2018. 49p. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/politica-agricola/banner-rotativo/plano-nacional-de-florestas-plantadas/view>. Acesso em: 07 mai. 2019.

SERRANO, Luisa Julieth Parra. **Resistência à tração da madeira e resistência ao cisalhamento no plano de cola, seus impactos na geometria do dente e propriedades mecânicas de emendas dentadas**. 2009. 107p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-14042009-111712/en.php>. Acesso em: 07 mai. 2019.

SILVA, André Luiz Emmel; MORAES, Jorge André Ribas; MACHADO, Ênio Leandro. **Proposta de produção mais limpa voltada às práticas de ecodesign e logística reversa**. Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 20 n.1, p.29-37, jan/mar 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Andre_Silva86/publication/281336263_Proposta_de_producao_mais_limpa_voltada_as_praticas_de_ecodesign_e_logistica_reversa/links/5627d96d08aef25a243be746.pdf. Acesso em: 14 mai. 2019.

SILVA, Cristina Evangelista. **Sistema de cobertura com pórticos de estabilização bidirecionais em perfis metálicos de seção circular com costura para construção residencial industrializada**. 2011. 181p. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufop.br/handle/123456789/2793>. Acesso em: 17 abr. 2019.

STRINGARI, Eduardo Henrique. **Construção e ensaio de pórticos em madeira laminada colada visando emprego em aviários de postura**. 2019. 66f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2019.

SZÜCS, Carlos Alberto; TEREZO, Rodrigo Figueiredo; VALLE, Ângela do; MORAES, Poliana Dias de. **Estruturas de madeira**. Versão 5. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. Disponível em: <http://pet.ecv.ufsc.br/wordpress/wp-content/uploads/2017/08/Apostila-Madeiras-agosto2016.pdf>. Acesso em: 1 mar. 2019.

TELES, Ricardo Faustino. **Propriedades tecnológicas de vigas de madeira laminada colada produzidas com louro-vermelho:(sextonia rubra)**. 2009. 118p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2009. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/4279>. Acesso em: 22 mai. 2019.

VENTURA, F. C.; RAMOS, B. P. F.; PEREIRA, M. A. dos R. **Verificação de aplicabilidade do adesivo de óleo de mamona na confecção de bambu laminado colado**. In: International Workshop – Advances in Cleaner Production, 4th. São Paulo, 2013. Disponível em: http://www.advancesincleanerproduction.net/fourth/files/sessoes/6B/7/ventura_et_al_work.pdf. Acesso em: 15 mar. 2019.

WEI, S. C., **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, Cascavel, 2017.