

EDUARDO HENRIQUE STRINGARI

CONSTRUÇÃO E ENSAIO DE PÓRTICOS EM MADEIRA LAMINADA  
COLADA VISANDO EMPREGO EM AVIÁRIOS DE POSTURA

CASCVEL  
PARANÁ - BRASIL  
FEVEREIRO – 2019

EDUARDO HENRIQUE STRINGARI

**CONSTRUÇÃO E ENSAIO DE PÓRTICOS EM MADEIRA LAMINADA  
COLADA VISANDO EMPREGO EM AVIÁRIOS DE POSTURA**

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

Orientador: Prof. Dr. Alfredo Petruski

CASCADEL  
PARANÁ – BRASIL  
FEVEREIRO – 2019

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

STRINGARI, EDUARDO HENRIQUE  
CONSTRUÇÃO E ENSAIO DE PÓRTICOS EM MADEIRA LAMINADA  
COLADA VISANDO EMPREGO EM AVIÁRIOS DE POSTURA / EDUARDO  
HENRIQUE STRINGARI; orientador(a), ALFREDO PETRAUSKI,  
2019.

66 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, 2019.

1. Pórtico de madeira. 2. Madeira laminada colada. 3. Estrutura de madeira. I. PETRAUSKI, ALFREDO. II. Título.

## EDUARDO HENRIQUE STRINGARI

Construção e ensaio de pórticos em madeira laminada colada visando emprego em aviários de postura

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre 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 Petruski

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

  
Ricardo Lessa Azevedo

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

  
Gustavo Savaris

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus de Toledo (UTFPR)

Cascavel, 21 de março de 2019

*“Dedico este trabalho à minha família”.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por estar sempre ao meu lado.

Agradeço à minha esposa por ser a melhor pessoa que poderia existir em minha vida.

Agradeço à minha família pela cumplicidade.

Agradeço ao meu orientador prof. Petruski pela amizade e dedicação.

Agradeço aos membros da banca pela colaboração para um trabalho melhor, em especial à professora Sandra Petruski.

Agradeço as engenheiras Ana Lucia Ghiggi Peixoto e Shen Chiao Wei por terem dividido comigo o material e os dados dos seus trabalhos de conclusão de curso.

Agradeço aos amigos Daniele, Eduardo, Padilha, Murilo, Maria Fernanda e Battisti, que me ajudaram na confecção e teste das estruturas.

Agradeço aos engenheiros Laís do Nascimento e Maxer Antonio Rosa que são pessoas que não medem esforços para ajudar quem precisa.

Agradeço ao programa de mestrado na pessoa do coordenador, prof. Samuel, pelo auxílio financeiro para a obtenção do adesivo.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Corpos de prova para ensaio ao cisalhamento – $f_{v0,k}$ .....   | 18 |
| Figura 2 - Esquema dos corpos de prova para ensaio da resistência ao cisalhamento na torção. Fonte Wei (2017).....              | 19 |
| Figura 3 - Ensaio de cisalhamento na torção com o aparato na Máquina Universal de Ensaio. ....                                  | 20 |
| Figura 4 - Esquema geral da geometria frontal dos aviários de postura da cooperativa Lar. (Dimensões em cm).....                | 21 |
| Figura 5 - 5(a) – ação permanente na estrutura e 5(b) sucção do vento, conforme saída do programa Visualventos. ....            | 23 |
| Figura 6 - Configuração Geral do Pórtico em Escala Real. (Dimensões em cm).....   | 24 |
| Figura 7 - Detalhe da seção transversal na peça da viga. (Dimensões em cm).....   | 25 |
| Figura 8 - 8(a) comparativo de solicitações no nó C do pórtico real e reduzido. 8(b) carga de projeto do pórtico reduzido. .... | 27 |
| Figura 9 - Configuração Geral do Pórtico em Escala Reduzida. (Dimensões em cm). ....  | 28 |
| Figura 10 - Esquema da ligação rígida do pórtico. Fonte Petruski (1999).....  | 30 |
| Figura 11 - Esquema geral de análise de uma ligação colada sujeita a esforços simultâneos. ....                                 | 30 |
| Figura 12 - Esquema geral de redução de inércia em escala real e reduzida respectivamente. Redução de 1:2,5 sem escala.....     | 32 |
| Figura 13 - Configuração Geométrica aplicada ao programa Ftool – Escala Real....  | 33 |
| Figura 14 - Configuração Geométrica aplicada ao programa Ftool – Escala Reduzida. ....  | 33 |
| Figura 15 - Gabarito de Colagem e torquímetro eletrônico para controle da pressão. ....   | 35 |
| Figura 16 - Detalhe das bandejas utilizadas para aplicação das cargas nos beirais.  | 37 |
| Figura 17 - Aparatos finais para realização do teste. ....  | 38 |
| Figura 18 - Esquema de montagem do aparato de teste. ....   | 39 |
| Figura 19 - Detalhe de Ruptura nos nós C e E na estrutura do ensaio 01, pórtico 01. ....  | 43 |
| Figura 20 - Detalhe de Ruptura nos nós C e E na estrutura do ensaio 02, pórtico 02. ....  | 43 |
| Figura 21 - Detalhe de Ruptura no nó C na estrutura do ensaio 03, pórtico 03. ....  | 44 |
| Figura 22 - Detalhe de Ruptura nos nós C e E na estrutura do ensaio 04, pórtico 04. ....  | 44 |
| Figura 23 - Detalhe de Ruptura no nó C na estrutura do ensaio 05, pórtico 05. ....  | 45 |
| Figura 24 - Esquema de instalação dos relógios comparadores.....  | 46 |
| Figura 25 - Exemplo de deformação encontrada no Ftool para certo carregamento.  | 46 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 26 - Carga de projeto do pórtico em escala reduzida, sendo que os valores entre parênteses equivalem à máxima carga aplicada na primeira fase. .... | 47 |
| Figura 27 - Comparativo da média da deformada do teste e da deformação no Ftool, para um carregamento total de 7,586 kN .....                              | 48 |
| Figura 28 - Diagrama Carga x Deslocamento apresentado pelo relógio 01, cumeeira. ....  | 49 |
| Figura 29 - Diagrama Carga x Deslocamento apresentado pelo relógio 02, beiral. ..  | 49 |
| Figura 30 - Diagrama Carga x Deslocamento apresentado pelos relógios 03 e 04, ligação. ....  | 50 |
| Figura 31 - Diagrama Carga x Deslocamento apresentado pelos relógios 05 e 06, vão do pilar. ....   | 50 |
| Figura 32 - Médias do Diagrama Carga x Deslocamento apresentado pelo relógio 01, cumeeira. ....  | 51 |
| Figura 33 - Médias Diagrama Carga x Deslocamento apresentado pelo relógio 02, beiral. ....   | 51 |
| Figura 34 - Médias Diagrama Carga x Deslocamento apresentado pelos relógios 03 e 04, ligação. ....   | 52 |
| Figura 35 - Médias Diagrama Carga x Deslocamento apresentado pelos relógios 05 e 06, vão do pilar. ....  | 52 |
| Figura 36 - Diagrama Carga x Deslocamento apresentado pelo relógio 01, cumeeira. ....  | 53 |
| Figura 37 - Diagrama Carga x Deslocamento apresentado pelo relógio 02, beiral. ..  | 54 |
| Figura 38 - Diagrama Carga x Deslocamento apresentado pelos relógios 03 e 04, ligação. ....  | 54 |
| Figura 39 - Diagrama Carga x Deslocamento apresentado pelos relógios 05 e 06, vão do pilar. ....   | 55 |
| Figura 40 - Médias Diagrama Carga x Deslocamento apresentado pelo relógio 01, cumeeira. ....   | 55 |
| Figura 41 - Médias Diagrama Carga x Deslocamento apresentado pelo relógio 02, beiral. ....   | 56 |
| Figura 42 - Médias Diagrama Carga x Deslocamento apresentado pelos relógios 03 e 04, ligação. ....   | 56 |
| Figura 43 - Médias Diagrama Carga x Deslocamento apresentado pelos relógios 05 e 06, vão do pilar. ....  | 57 |



## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Variação de massa específica básica da madeira de <i>Araucaria angustifolia</i> para os parâmetros de idade e posição no tronco .....   | 9  |
| Tabela 2 - Efeitos do formaldeído após exposição de curta duração.....   | 12 |
| Tabela 3 - Resultados para a caracterização mecânica da madeira, corrigidos para 12% de umidade .....  | 17 |
| Tabela 4 - Propriedades de adesão médios da madeira de <i>Araucaria angustifolia</i> colada com adesivo bicomponente à base de óleos vegetais, comparados aos obtidos por Couri Petruski (2012), efetuados com <i>Lyptus</i> ..... | 40 |
| Tabela 5 - Desempenho das estruturas testadas, em termos de resistência.....   | 42 |
| Tabela 6 - Deslocamentos finais após a aplicação da carga de 7,586 kN .....  | 48 |

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

LEME – Laboratório de Estruturas e Materiais de Engenharia

LATEM – Laboratório de Tecnologia e Estruturas de Madeira

IBA – Instituto Brasileiro de Árvores

COV – Composto Orgânico Volátil

MLC – madeira laminada colada

CLT – *cross lamited timber*

LVL – *lamited veneer timber*

$f_{c0,k}$  – resistência característica à compressão paralela às fibras;

$E_{c0,m}$  – módulo de elasticidade médio paralelo às fibras;

$f_{v0,k}$  – resistência característica ao cisalhamento paralela às fibras;

$f_{v90,k}$  – resistência característica ao cisalhamento perpendicular às fibras;

$f_{vt0,k}$  – resistência característica ao cisalhamento na torção paralela às fibras;

$f_{vt90,k}$  – resistência característica ao cisalhamento na torção perpendicular às fibras;

$M_d$  – momento fletor de cálculo;

$V_d$  – esforço cortante de cálculo;

$N_d$  – esforço normal de cálculo;

$M_{td}$  – momento de torção de cálculo;

$f_{tor90,d}$  – resistência à torção de juntas coladas normais às fibras;

$f_{v90,d}$  – resistência de cisalhamento de juntas coladas normais às fibras;

$f_{v\alpha,d}$  – resistência ao cisalhamento de juntas coladas inclinadas em relação às fibras.

$E_d$  – esforço de cálculo

$E_{gk}$  – esforço característico associado ao carregamento permanente

$E_{Q1k}$  – esforço característico associado ao carregamento acidental q1

$E_{Q2k}$  – esforço característico associado ao carregamento acidental q2

$E_{wk}$  - esforço característico associado ao vento

$\gamma_g$  – coeficiente de segurança relativo à ação permanente

$\gamma_Q$  – coeficiente de segurança relativo as ações acidentais

$\phi_0$  - coeficiente de ponderação aplicado a uma dada ação acidental

## RESUMO

STRINGARI, Eduardo Henrique. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, fevereiro de 2019. **Construção e ensaio de pórticos em madeira laminada colada visando emprego em aviários de postura.** Orientador: Prof. Dr. Alfredo Petruski.

Este trabalho buscou avaliar o comportamento estrutural de pórticos confeccionados a partir de tábuas coladas de *Araucaria angustifolia* e adesivo de poliuretano à base de óleos vegetais. Procurou-se apresentar uma solução técnica para substituição das estruturas mistas (concreto armado e estrutura metálica), que são construídas no oeste do Paraná, a exemplo daquelas recomendadas pela Cooperativa Agroindustrial Lar, para execução de aviários de postura. A utilização da Araucária de reflorestamento juntamente com o adesivo biodegradável é uma alternativa de construção sustentável. Foram projetadas, construídas e submetidas a testes de carga cinco unidades de pórticos retos triarticulados em escala reduzida de 1:2,5. Foram feitos com vão livre de 2 metros e com inclinação de 15°, aptas ao emprego de telhas metálicas, comercialmente denominadas de aluzinco. Foram realizados testes para caracterização da madeira e do adesivo, para se obter parâmetros suficientes para um dimensionamento segundo a NBR 7190 (ABNT, 1997). O valor médio obtido para a resistência última das estruturas foi de 4,14 vezes a carga de projeto. As estruturas apresentaram desempenho mecânico satisfatório e deformações inferiores às recomendadas pela norma. O adesivo à base de óleos vegetais demonstrou potencialidade para uso estrutural. Concluiu-se pela viabilidade técnica de se confeccionar pórticos inteiramente colados com lâminas de madeira. O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de financiamento 001.

**PALAVRAS-CHAVE:** Pórtico de madeira; Madeira laminada colada; Estrutura de madeira.

## ABSTRACT

STRINGARI, Eduardo Henrique. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, february 2019. **Construction and testing of glued laminated timber frames for use in poultry laying**. Advisor: Prof. Dr. Alfredo Petruski.

This work aimed to evaluate the structural behavior of frames made from gluing boards of *Araucaria angustifolia* and polyurethane adhesive based on vegetable oils. It was tried to present a technical solution for the replacement of the mixed structures (reinforced concrete and metallic structure) that are constructed in the West of Paraná, to the examples of those recommended by the Cooperative Agroindustrial Lar, for execution of poultry of posture. The use of reforestation *Araucaria* together with the biodegradable adhesive is an alternative of sustainable construction. Five units were designed, constructed and subjected to load tests in a reduced scale in 1: 2.5, of triarticulated straight frames. They were made with a free span of 2 meters and with a slope of 15°, suitable for the use of metallic tiles, commercially known as *aluzinco*. Tests were carried out to characterize the wood and the adhesive, to obtain sufficient parameters for a sizing according to NBR 7190 (ABNT, 1997). The mean value obtained for the ultimate strength of the structures was 4.14 times the design load. The structures all showed satisfactory mechanical performance and deformations lower than those recommended by the standard. The adhesive based on vegetable oils showed potential for structural use. It was concluded by the technical feasibility of making frames entirely glued of lumber. This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de nível superior- Brasil (CAPES) - Finance Code 001.

**KEY WORDS:** Timber frames; Glued-laminated lumber; Timber structure.

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>  | <b>3</b>  |
| 2.1. Uso estrutural da madeira no Brasil e sistema de pré-fabricação .....        | 3         |
| 2.2. A madeira laminada colada .....  | 5         |
| 2.3. Madeira de Florestas Plantadas e <i>Araucaria angustifolia</i> .....         | 6         |
| 2.4. Adesivos.....  | 10        |
| 2.4.1 Adesivo poliuretano à base de óleos vegetais .....                          | 11        |
| 2.4.2 Formação da junta colada a partir do adesivo à base de óleo de mamona ..... | 12        |
| 2.5. Desempenho de estruturas de madeira com ligações por adesivos .....          | 14        |
| <b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>  | <b>16</b> |
| 3.1. Generalidades .....  | 16        |
| 3.2. Metodologia.....   | 16        |
| 3.2.1. Caracterização da madeira e de suas propriedades de adesão .....           | 17        |
| 3.2.2. Projeto do pórtico em escala real.....                                     | 21        |
| 3.2.3. Projeto do pórtico em escala reduzida .....                                | 25        |
| 3.2.4. Destaque sobre a verificação das estruturas .....                          | 28        |
| 3.2.5. Destaque para a verificação da Ligação Colada .....                        | 29        |
| 3.2.6. Redução da Inércia .....   | 32        |
| 3.2.7. Execução das Estruturas.....   | 34        |
| 3.2.8. Ensaio das estruturas construídas .....                                    | 36        |
| <b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>  | <b>40</b> |
| 4.1 Caracterização e classificação das peças de madeira .....                     | 40        |
| 4.2 Resistência apresentada pelas estruturas.....                                 | 41        |
| 4.3 Rigidez apresentada pelas estruturas .....                                    | 45        |
| <b>5. CONCLUSÕES .....</b>  | <b>58</b> |
| <b>6. REFERÊNCIAS.....</b>  | <b>59</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

A história do uso da madeira para construção confunde-se com a história, pois sempre foi um material de fácil obtenção, com variadas possibilidades de aplicação e com ótimo desempenho estrutural, mas com uma utilização pouco qualificada tecnicamente e o crescimento da demanda de estruturas com maiores vãos e mais esbeltas, a madeira perdeu espaço no mercado para outros materiais, como o concreto armado e o aço.

Com o aumento da tecnologia aliado à industrialização dos materiais, a madeira começou a ser beneficiada de modo que suas deficiências fossem mitigadas e suas qualidades fossem realçadas. Assim, surgiu a Madeira Laminada Colada (MLC), produto madeireiro formado pela união de tábuas de madeira coladas com diferentes tipos de adesivos. Esta técnica permite, a partir da união de peças menores, a confecção de grandes estruturas, peças com dimensões e formatos diferentes, além de diminuir a influência das falhas encontradas na madeira in natura e agregar as benesses dos componentes pré-fabricados, como o controle de qualidade e racionalização do uso do material (ROCHA, 2010).

O sistema de pré-fabricação compreende confeccionar peças na fábrica, transportá-las para a obra e realizar a montagem *in loco*. Este processo industrial não é limitado pelas condições climáticas, possibilita maior controle de qualidade da matéria-prima e do produto construído, proporciona rapidez na execução, gerando menos resíduos no canteiro e permitindo o reaproveitamento.

O uso de pré-fabricados de madeira no Brasil ainda é incipiente. Porém, em países desenvolvidos essa técnica já é executada há algum tempo com excelentes resultados. Além disso, a MLC elege a utilização de madeira de reflorestamento para o seu desenvolvimento, principalmente por esses materiais apresentarem características mais homogêneas e serem preferidos pelo mercado consumidor que cada vez mais preza por produtos sustentáveis (PEIXE, 2017).

Aliado ao uso da madeira de florestamentos, pode-se destacar também o uso da resina a base de óleos vegetais, outro material com selo de produto sustentável, sobretudo por ser um material biodegradável e uma alternativa ao adesivo que era o mais consumido, o resorcinol-formaldeído, o qual apresenta índices perigosos de contaminação aos seres humanos a ele expostos.

Segundo Petrauski (2012), no dimensionamento de estruturas coladas de madeira, faz-se necessário que as juntas coladas apresentem comportamentos previsíveis e níveis elevados de resistência para atendimento às normas e exigências específicas de cada projeto. Deve-se conhecer sob quais condições o adesivo adotado poderá ter seu desempenho estrutural otimizado, bem como as condições sob as quais não se pode realizar a colagem, sob pena de perda de resistência e/ou durabilidade. Nem todos esses procedimentos são descritos na NBR 7190 (ABNT, 1997), norma brasileira que rege o dimensionamento de estruturas de madeira. Por isso, algumas fases do experimento foram executadas segundo normas estrangeiras ou pesquisas nacionais e internacionais realizadas por especialistas da área.

Diante do exposto, este estudo é justificado pelos seguintes motivos:

- Dentre as madeiras de reflorestamento, que apresentam potencial como fonte de matéria-prima para a construção civil, destaca-se a *Araucaria angustifolia*, por se tratar de uma árvore nativa brasileira, com potencial para uso estrutural;
- Como fator restritivo do uso da madeira laminada colada, destaca-se o custo do adesivo envolvido no processo de produção, que representa, uma parcela significativa do custo total da peça colada. Tal fato justifica o estudo de um adesivo alternativo, avaliando-lhe o desempenho no uso com a madeira visando ao emprego estrutural aliado à inclinação do mercado na utilização de produtos sustentáveis;
- No caso das estruturas utilizadas na construção civil, principalmente em ambiente rural, a madeira tem perdido espaço para materiais como o concreto armado e o aço. Por isso é interessante avaliar o potencial da retomada do uso da madeira, por ser um material facilmente encontrado em propriedades rurais, mas agora aliado a mais recentes tecnologias e processos industrializados que potencializem suas qualidades.

Portanto, essa pesquisa teve como objetivos o dimensionamento de pórticos em escala real para emprego em aviário de postura e, depois, a partir da caracterização da *Araucaria angustifolia* e do seu desempenho na colagem, o projeto, construção, testes e análise de desempenho de cinco unidades de pórticos em escala reduzida.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Uso estrutural da madeira no Brasil e sistema de pré-fabricação

Dentre as atividades econômicas que consomem parte dos recursos naturais, a construção civil tem ampla participação. Entre os materiais mais utilizados destacam-se o aço, o concreto e a madeira (MOREIRA, 2017). Segundo Punhagui (2014), dentre os materiais utilizados a madeira destaca-se como sendo o recurso com menor emissão de carbono e consumo energético.

A madeira surgiu como material de ampla utilização na construção civil pela sua disponibilidade em diversas regiões e, sobretudo, pelo seu grande potencial de trabalhabilidade. Inicialmente, as atividades referentes a transformação da madeira eram feitas de maneira artesanal, como por exemplo, no corte das árvores e seu processamento em caibros, pranchas e ripas e, conseqüentemente, sua utilização nos mais diferentes ambientes e por meio de diversos métodos (MOREIRA, 2017).

Na indústria da construção civil brasileira, a madeira tem sido utilizada sobretudo em duas vertentes distintas: de maneira temporária, como coadjuvante em estruturas de concreto armado, para formas, escoramentos e andaimes, ou de maneira definitiva, em esquadrias, forros, pisos e estruturas de telhados (VIEIRA; GESUALDO, 2016).

Nos países desenvolvidos, a madeira ganhou difusão no cenário da construção civil através da utilização de novas tecnologias, destacando-se o *wood frame*, *cross laminated timber* (CLT), madeira laminada colada (MLC), *laminated veneer lumber* (LVL), *gridshell*, entre outros. Estas técnicas aumentam a possibilidade de uso desse material, reduzem os problemas relacionados com questões naturais e anatômicas e melhoram o seu desempenho estrutural. (MOREIRA, 2017).

Ainda que o uso da madeira seja difundido e sua versatilidade tenha sido disseminada ao longo dos anos, percebe-se que os estudos científicos que comprovam a confiabilidade e o potencial estrutural do material ainda são relativamente recentes e necessitam de mais pesquisa (MACHADO, 2006).

A industrialização veio revolucionar a construção civil ao substituir a habilidade do artesão por processos mecanizados, utilizando-se de tecnologia, produção em série e sistemas de pré-fabricação para potencializar o uso dos mais



diversos materiais e garantir que os processos diminuam as falhas dos produtos, sobretudo, utilizando mão de obra qualificada para o desenvolvimento de suas atividades (MOREIRA, 2017 *apud* BLACHÉRE, 1977).

Os sistemas pré-fabricados apresentam algumas vantagens referentes a processos convencionais. Entre eles pode-se citar a racionalização do material, a redução dos desperdícios, a melhor gestão dos resíduos, a diminuição do tempo de execução das obras e ociosidade da mão de obra, a minimização de erros construtivos e o aumento da qualidade dos componentes estruturais (GANDINI, 2016).

Em países desenvolvidos da Europa e América do Norte, a utilização da madeira em grande escala acontece há décadas, sobretudo pela aplicação de conceitos e técnicas desenvolvidas em anos de estudos e aperfeiçoamento, buscando-se usufruir das vantagens que o material tem a oferecer. De maneira diferente, no Brasil, a utilização da madeira ocorreu em seu início sem acompanhamento técnico e acabou criando uma visão errônea sobre as possibilidades que o material apresenta em suas diferentes aplicações. Atualmente, a norma brasileira de estruturas de madeira, NBR 7190 (ABNT, 1997), procura regularizar o uso estrutural do material. Além disso, no passar dos anos, houve grandes investimentos em pesquisas para as indústrias de aço e concreto, alavancando a utilização desses materiais em detrimento do desenvolvimento da indústria madeireira para a construção civil (MOLINA, 2017).

A necessidade de se utilizar elementos estruturais de propriedade controlada e mais homogêneos, frente à característica da madeira em ser um material anisotrópico, estabeleceram uma necessidade de se desenvolver tecnologia para a aplicabilidade desse material, sobretudo para uso estrutural. Dentre essas técnicas de industrialização pode-se citar o crescimento na tecnologia dos adesivos e a disponibilidade de florestas plantadas, que contribuíram para o surgimento de novos materiais de construção oriundos da madeira (PEDROSA *et al.*, 2005; IWAKIRI *et al.*, 2010; PIO *et al.*, 2012).

Segundo Molina (2017), quando utilizada de maneira apropriada, a madeira tem condições de concorrer com materiais como o aço e o concreto de forma análoga para os mais diversos fins. Para isso, é imprescindível a escolha do sistema estrutural adequado, uma tecnologia eficaz e a escolha da espécie de madeira que apresente condições de ser aplicada para determinado uso.

## 2.2. A madeira laminada colada

A Madeira Laminada Colada - MLC é um produto industrial que consiste em uma das configurações de utilização da madeira, que há alguns anos vem sendo estudada no Brasil (CALIL NETO *et al.*, 2016). A MLC é formada essencialmente por tábuas de madeira unidas longitudinalmente e depois coladas umas sobre as outras. O emprego da cola amplia o leque de possibilidades de uso da madeira para o fim estrutural, de modo que não limita as configurações geométricas das peças. (FIORELLI; DIAS, 2006; SEGUNDINHO *et al.*, 2013).

A técnica da MLC surge como uma alternativa de uso sustentável da madeira dentro da indústria da construção, pois favorece a utilização de madeira de reflorestamento para a construção de grandes estruturas (TELES, 2009). Geralmente, as madeiras mais apropriadas para o emprego em MLC são de florestas plantadas pela uniformidade de suas características. As espécies de coníferas mais utilizadas são os pinus, e entre as dicotiledôneas, os eucaliptos (CALIL NETO *et al.*, 2016).

Dentre os produtos de madeira que sofrem processos de beneficiamento para um determinado uso, a MLC consegue unir os benefícios da indústria de pré-fabricação com a otimização oriunda do trabalho feito por mão de obra especializada para obtenção de produtos com excelente qualidade final. Para se obter um produto que atenda as normas vigentes, as indústrias necessitam ter uma excelente precisão nas etapas de sua execução. Além disso, os fabricantes podem verificar as características de seu produto acabado ainda em ambiente laboratorial, diminuindo as falhas e garantindo ao consumidor um produto dentro do padrão solicitado (CALIL NETO *et al.*, 2014).

A MLC pode ser executada de diferentes modos dentro da construção civil, pois apresenta excelentes índices de resistência mecânica, confere a possibilidade de vencer grandes vãos e, ainda, permite que as peças executadas apresentem curvaturas e torções (NOGUEIRA, 2017).

A NBR 7190 (ABNT, 1997) propõe um modelo de cálculo simplificado para o cálculo de elementos estruturais de MLC, enquanto que a versão de revisão desta mesma norma, realizada em 2013 e que ainda está em fase de consulta nacional, indica um modelo de cálculo baseado na rigidez do elemento fletido de MLC (GOMES, 2018).

No mercado brasileiro da construção existem poucas empresas produtoras de elementos estruturais feitos de MLC. Em vista disso, o conhecimento da técnica pode ser até mesmo desconhecido, por parte dos profissionais, prevalecendo assim, a utilização de madeira serrada oriunda de florestas plantadas e de florestas tropicais na construção civil nacional sem beneficiamento e, servindo, sobretudo, de apoio para estruturas de concreto armado (CALIL NETO, 2011).

### **2.3. Madeira de Florestas Plantadas e *Araucaria angustifolia***

O desenvolvimento sustentável é na atualidade um tema de grande repercussão e o setor da construção tem um papel significativo no cumprimento dos objetivos traçados para a redução dos impactos ambientais. Esse setor consome mais de 55% das madeiras extraídas mundialmente (ROODMAN; LENSSEN, 1995).

A necessidade de construções sustentáveis impulsiona a utilização de materiais renováveis e, portanto, induzem um crescimento do setor madeireiro na construção civil, principalmente o relacionado com florestas plantadas. O Brasil conta com grande disponibilidade de madeiras de reflorestamento, fator que permite a ampliação da indústria de sistemas construtivos em madeira no país, porém, que depende de investimentos e pesquisas que permitam que a madeira possa competir no mercado construtivo (GOMES, 2018).

Além disso, o setor florestal brasileiro associado às florestas plantadas apresenta importantes funções sociais, econômicas e ambientais, como por exemplo, a manutenção de recursos hídricos, a conservação da biodiversidade, a preservação das espécies nativas e o equilíbrio climático. Ainda, oferece uma cadeia de bens e serviços associada às diversas fases do produto, como por exemplo, a produção, a colheita e o transporte da madeira, além da obtenção dos produtos finais nos segmentos de papel e celulose, painéis de madeira, siderurgia a carvão vegetal, biomassa, entre outros (GANDINI, 2016).

A evolução no setor de adesivos e técnicas de produção tornaram a madeira um material muito mais competitivo na construção civil, permitindo o uso de maneira confiável em projetos de estruturas. Aliado a isso, o uso de madeira de espécies nativas que provêm de florestas plantadas torna o produto ecologicamente correto atendendo aos anseios do mercado consumidor que preza por produtos que estejam

inseridos em uma cadeia de produção sustentável e que possam contribuir para a diminuição de aspectos exploratórios (CALIL NETO, 2011).

Nesse contexto, o emprego de madeiras provenientes de áreas plantadas se torna uma opção mais sustentável, uma vez que seu ciclo de renovação é mais curto que o das madeiras nativas, as distâncias dos locais de cultivo aos núcleos consumidores são menores, além da mecanização da produção e incorporação de maior tecnologia (GANDINI, 2016).

O Brasil possui 7,84 milhões de hectares de florestas plantadas para fins industriais, abrangendo uma área que corresponde a 1% do território brasileiro. Esta atividade é responsável por 91% de toda a madeira produzida para fins industriais, isto equivale a 6,2% do PIB Industrial no país e, também, é um dos segmentos com maior potencial de contribuição para a construção de uma economia verde utilizando-se de espécies exóticas (como eucaliptos, pinus e teca) ou nativas (como araucária e o paricá) (IBÁ, 2017).

Da área total de 7,84 milhões de hectares de árvores plantadas no Brasil em 2017, 35% pertence ao segmento de celulose e papel, 30%, à comercialização da madeira in natura, 13% ao setor de siderurgia a carvão vegetal, 9% em fundos especializados em ativos florestais, 6% aos segmentos de painéis de madeira e pisos laminados, 4% em produtos sólidos de madeira e 3% a outras finalidades (IBÁ, 2018).

O segmento industrial de madeira serrada agrupa produtos obtidos por meio do processamento mecânico da madeira in natura, como tábuas, pranchas, caibros, sarrafos, vigas, ripas e vigotes. Normalmente, esses produtos são utilizados na construção civil, no transporte de mercadorias e na produção de móveis e componentes de decoração. Dentro do cenário da construção civil, no ano de 2016, o consumo doméstico de madeira serrada foi de 6,4 milhões de m<sup>3</sup>, sendo que a produção brasileira de serrados oriundos de reflorestamento foi de 8,6 milhões de m<sup>3</sup> e a produção total de painéis compensados, a partir de árvores plantadas foi de 2,7 milhões de m<sup>3</sup> (IBÁ, 2017).

O Pinheiro do Paraná nativo foi explorado e utilizado durante muito tempo no sul do país, sobretudo devido a sua larga utilização para o setor madeireiro que foi um dos impulsionadores da economia no período da colonização. Atualmente, considerada espécie em extinção, a *Araucaria angustifolia* é protegida por leis e órgãos ambientais, visando à preservação deste patrimônio natural (RODRIGUES,

*et al.*, 2017). Originalmente, a espécie estava presente em 37% do território do Paraná, 31% de Santa Catarina e 25% do Rio Grande do Sul, e também em algumas partes remotas de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais (NODARI *et al.*, 2009).

A *Araucaria angustifolia* é reconhecida como uma das espécies mais antigas da flora brasileira, e passou por períodos geológicos variados, enfrentou as mais diversas mudanças climáticas, ultrapassou períodos de avanço e de retração marinha e a extinção de seres, mas perdeu espaço na natureza devido à décadas de exploração desenfreada, falta de políticas e estratégicas públicas de conservação e a cultura humana de domínio e posse (NODARI, *et al.*, 2009). Nas décadas de 50 e 60 a araucária esteve no topo da lista de exportações brasileiras, sobretudo pelo seu grande valor econômico relacionado a indústria da construção e celulose (CHIAPARINI, 2012).

A *Araucaria angustifolia* se desenvolve em temperaturas baixas e em áreas de altitude. Neste tipo de clima as estações são bem definidas. De acordo com Ab´Saber (2003) cumpre assinalar que as araucárias estão vinculadas aos planaltos do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, onde predominam climas temperados úmidos, de altitude.

As principais propriedades físicas da madeira consistem na massa específica e a retratibilidade, e essas características se alteram dentro de cada espécie dependendo da disposição no tronco, e da posição entre medula e casca, além da idade da árvore. Por isso, é importante conhecer o comportamento de cada espécie para que o processamento e a usinagem da madeira resultem em peças de qualidade (DOWNES *et al.*, 1997; SILVA, 2002; DIAS JÚNIOR *et al.*, 2013).

A madeira do Pinheiro do Paraná (*Araucaria angustifolia*) possui massa específica básica média ponderada de 0,422 g/cm<sup>3</sup>, sendo considerada leve (TREVISAN *et al.*, 2016), o que a torna macia e pouco durável quando exposta ao tempo. O seu uso é mais indicado para forros, molduras, ripas, confecção de cabos de vassoura, caixotaria, brinquedos, carretéis e utensílios domésticos (MELO *et al.*, 2010; HILLING *et al.*, 2012; CURTO *et al.*, 2016).

Zaque *et al.*, (2018) estudando as características da *Araucaria angustifolia* descreveram, para os parâmetros de idade, posição axial e radial, que os valores de massa específica básica da madeira variaram entre 0,37 g/cm<sup>3</sup> e 0,51 g/cm<sup>3</sup> e a variação da massa específica da madeira se dá de acordo com a Tabela 2:

Tabela 1 - Variação de massa específica básica da madeira de *Araucaria angustifolia* para os parâmetros de idade e posição no tronco

| Idade Média (Anos) | Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> ) | Posição Axial (%) | Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> ) | Posição Radial | Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> ) |
|--------------------|---------------------------------------|-------------------|---------------------------------------|----------------|---------------------------------------|
| 23                 | 0,389 c                               | DAP               | 0,454 a                               | Externa        | 0,457 a                               |
| 25                 | 0,404 b                               | 10                | 0,455 a                               | Intermediária  | 0,410 b                               |
| 28                 | 0,411 b                               | 35                | 0,414 b                               | Medula         | 0,374 c                               |
| 30                 | 0,541 a                               | 55                | 0,381 c                               | -              | -                                     |

Médias seguidas pela mesma letra minúscula, em cada coluna, não diferem entre si pelo teste de *Scout-Knott* a 5% de probabilidade.

DAP – Diâmetro à altura do peito.

Fonte: Adaptado de Zaque *et al.*, (2018).

Rolim e Ferreira (1974) atestaram que as araucárias mais velhas apresentaram os maiores valores de massa específica básica, e que em madeira oriunda de plantios homogêneos, com até 15 anos de idade, a massa específica aumenta da medula para a casca, no sentido radial, sendo esse crescimento acentuado até os 9 anos e menos pronunciado a partir dessa idade. Os valores encontrados por esses autores foram de 0,37 g/cm<sup>3</sup> a 0,52 g/cm<sup>3</sup>. O aumento da massa específica básica do lenho juvenil de 0,39 g/cm<sup>3</sup> para o lenho adulto de 0,48 g/cm<sup>3</sup>, foi observado por Curto *et al.* (2016), onde evidenciou-se a influência dos espaços entre os anéis de crescimento na massa específica da madeira.

Zaque *et al.*, (2018) ainda observaram que a análise de variância apontou que a interação entre a idade e a variação longitudinal influenciou a massa específica básica da madeira de araucária. Resultados semelhantes foram obtidos por Hilling *et al.* (2012), que encontraram diferenças entre a massa específica básica ao longo do fuste nas diferentes idades na madeira de araucária.

Segundo a NBR 7190 (ABNT, 1997), o Pinheiro do Paraná, como a espécie é comumente chamada, apresenta os seguintes valores médios, para as propriedades apresentadas (em ensaios realizados com 15 corpos de prova):

- a) Resistência à compressão paralela às fibras: 40,9 MPa;
- b) Resistência à tração paralela às fibras: 93,1 MPa;
- c) Resistência à tração normal às fibras: 1,6 MPa;
- d) Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras: 8,8 MPa;
- e) Módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralela às fibras: 15225 MPa.

## 2.4. Adesivos

Historicamente, com o surgimento dos adesivos sintéticos, desenvolvidos no período da guerra, ampliou-se a capacidade de utilização da técnica da MLC devido sobretudo ao excelente desempenho das colas em condições desfavoráveis de umidade e temperatura (FREAS, 1949). Dentro desse panorama, houve uma preferência pelo uso das coníferas como fonte de matéria-prima, para a produção de elementos estruturais de madeira colada. Como consequência, a maioria dos adesivos estruturais disponíveis no mercado foram pensados e desenvolvidos especialmente para esse tipo de substrato (LEHMANN *et al.*, 2016).

Neste contexto, na fabricação dos produtos estruturais de madeira laminada colada o tipo de adesivo utilizado, dentre as mais diversas variedades, se torna algo imprescindível para um projeto bem executado (NOGUEIRA, 2017).

Assim sendo, é importante destacar que a escolha do adesivo mais adequado para qualquer projeto é resultado de um estudo aprofundando de diversas variáveis e necessidades de processo, exigências técnicas de colagem, das condições ambientais no local de colagem e sobretudo as condições que serão encontradas no destino final do produto colado ao longo de toda a sua vida útil (IWAKIRI, 2017).

A norma da “*American Society for Testing and Materials*” – ASTM D905 (ASTM, 1994), define o adesivo como um produto capaz de conservar unidos outros materiais em suas superfícies. Os materiais unidos permanecem dessa maneira por contato interfacial de tal forma que, ao se aplicar uma força mecânica, esta pode ser transferida através dessa interface, caracterizando este evento como adesão (WU, 1982).

O processo de colagem da madeira ocorre pela adesão, que é um fenômeno físico-químico que estabelece uma interação entre superfícies sólidas, a aderente e a adesiva. O adesivo então é caracterizado como uma substância capaz de manter unidos outros materiais em sua superfície e, sua função, além de aderir duas faces é fluir e preencher espaços vazios entre as ligações a serem coladas, diminuindo assim a distância entre elas, gerando interações entre o adesivo e o substrato (BIANCHE, 2017).

### 2.4.1 Adesivo poliuretano à base de óleos vegetais

O desempenho de peças e/ou estruturas de madeira submetidos a tecnologia da colagem para fins estruturais apresenta uma relação acentuada com as características do adesivo utilizado, principalmente no que diz respeito ao fenômeno físico-químico da adesão. Por isso, para assegurar-se a coesão no comportamento da peça como uma estrutura única é necessário que o adesivo apresente uma união resistente, estável e durável, mantendo ou até mesmo melhorando as propriedades relacionadas à madeira (COURI PETRAUSKI, 2016).

Na indústria da madeira a maioria dos polímeros utilizados na produção de compósitos é derivada de petroquímicos e tem na sua composição diversos tipos de Compostos Orgânicos Voláteis - COVs, que são substâncias tóxicas, além de cancerígenas e mutagênicas. Por isso, diversos adesivos estão sendo estudados e desenvolvidos de modo que possam ser eficientes, mas que não apresentem risco à saúde e ao meio ambiente. O poliuretano (PU) à base de óleo de mamona é um desses adesivos. Trata-se de um polímero bi componente composto por um pré-polímero e um polioliol extraído do óleo da semente da planta *Ricinus communis* que não emana substâncias tóxicas, além de ser um material biodegradável (CANGEMI, 2006).

Segundo Couri Petruski, (2012), ainda há um desconhecimento muito grande relacionado a utilização do adesivo poliuretano bi componente à base de óleo de mamona, encontrando-se o mesmo ainda em fase de testes. Logo, a utilização desse composto biodegradável em um projeto de pesquisa pode fomentar informações importantes relativas à aplicabilidade desse material em projetos estruturais, sobretudo estabelecendo-se uma relação entre o adesivo biodegradável e uma madeira oriunda de reflorestamento.

Além disso, segundo dados do INCA (2006), o adesivo que vinha sendo estudado e aplicado a mais tempo no Brasil, o resorcinol formaldeído, pode contribuir para problemas de saúde em pessoas que estejam expostas a esse produto. Em 2004, a *International Agency for Research on Cancer*, IARC, classificou o formaldeído como carcinogênico, tumorigênico e teratogênico. Após estudos detalhados, não se obteve níveis seguros de exposição ao composto (INCA, 2006). Na Tabela 1 estão apresentados os efeitos do formaldeído em humanos após exposições de curta duração.



Tabela 2 - Efeitos do formaldeído após exposição de curta duração

| Média de concentração    | Tempo médio   | Efeitos à saúde da população geral                          |
|--------------------------|---|---|
| 0,8 – 1 ppm<br>Até 2 ppm | Exposições Repetidas<br>Única ou Repetida exposição | Percepção olfativa<br>Irritante aos olhos, nariz e garganta |
| 33 – 5 ppm               | 30 minutos  | Lacrimação e intolerância por algumas pessoas               |
| 10 – 20 ppm              | Tempo não especificado                              | Dificuldade na respiração e forte lacrimação                |
| 25 – 50 ppm              | Tempo não especificado                              | Edema pulmonar, pneumonia e perigo de vida                  |
| 50 – 100 ppm             | Tempo não especificado                              | Pode causar a morte   |

Fonte: Adaptado de INCA (2006)

A inalação de formaldeído e outros COVs também pode causar tontura, sedação, cefaleia, náuseas, vômitos, vertigem, sintomas depressivos, convulsões e desmaios (BALTIERI, 2016). Ainda, painéis com madeira laminada colada por resina à base de formaldeído podem continuar emitindo esse composto durante meses ou anos, havendo apenas diminuição dessa emissão ao longo do tempo (SALTHAMMER *et al.*, 2010). Mesmo que haja um revestimento feito por outros tipos de materiais, ainda há a possibilidade de ocorrer a emissão desse elemento, podendo ser potencializado em casos de aplicação em ambientes fechados (BREGINSKI, 2015).

Toda esta realidade aponta para que produtos como a MLC devam ser pesquisados na perspectiva de utilização de adesivos que não imponham risco à saúde daqueles que irão produzir o material e, também, daqueles que irão usufruir do produto final.

#### 2.4.2 Formação da junta colada a partir do adesivo à base de óleo de mamona

Dentro da literatura, no que diz respeito às teorias que explicam o processo de adesão, há uma subdivisão de processos físicos e químicos que tentam estabelecer a relação entre adesão efetiva e as interações intermoleculares e inter atômicas, que ocorrem entre o adesivo e o material aderido, seja ela na interface ou na interfase (CAVALHEIRO, 2014). O termo interface é designado a uma superfície bidimensional virtual entre o adesivo e o aderente, a interfase é referida ao volume que inclui a região da penetração do adesivo (KAMKE *et al.*, 2007).

Duas teorias se destacam na literatura: a teoria mecânica e a teoria da adsorção.

Na teoria mecânica, o adesivo, devido a sua fluidez, penetra na madeira através de seus poros, ocorrendo posteriormente a solidificação, com a formação de “ganchos” que então fazem uma ligação entre os substratos colados (ALMEIDA, 2009).

Na teoria da adsorção a adesão é resultante do contato molecular entre dois materiais colados que se unem através de forças de atração superficiais. Para garantir um contato eficaz entre o adesivo e o substrato, é necessário que a cola umidifique a madeira, flua para dentro da estrutura sub microscópica da parede celular, expulsando ar, água e outros componentes (VITAL *et al.*, 2006). A adesão química, como parte da teoria da adsorção ocorre quando há formação de ligações primárias e iônicas ou covalentes e/ou forças intermoleculares secundárias. E, de acordo com a teoria da difusão de polímeros, a adesão ocorre através da difusão de segmentos de cadeias de polímeros a nível molecular (ALMEIDA, 2009).

Há diversos fatores que podem afetar a qualidade de uma ligação adesiva. Alguns estão ligados ao substrato e ao adesivo e podem ser de origem anatômica, física ou química. Porém, existem fatores externos relacionados ao ambiente, como a umidade e variação de temperatura que também exigem cuidado para que a colagem seja eficaz (CAVALHEIRO, 2014).

Bianche *et al.*, (2017) pesquisando a resistência ao cisalhamento na linha de cola de *Eucalyptus* sp. colado com diferentes adesivos e diferentes gramaturas chegou à conclusão de que o adesivo a base de mamona apresentou o maior teor de sólidos em relação aos demais adesivos testados. O teor de sólidos é uma propriedade muito importante na colagem e pode ser descrita como a quantidade de sólidos do adesivo que forma a linha de cola. O alto teor de sólidos pode favorecer a resistência na linha de cola e, por consequência, melhorar o desempenho estrutural da peça. Com relação à gramatura utilizada, observou-se para as juntas coladas com os adesivos de mamona que o aumento da gramatura ocasionou em aumento da resistência ao cisalhamento na linha de cola.

Couri Petruski *et al.*, (2010) utilizaram o adesivo a base de mamona na gramatura 160g/m<sup>2</sup> e observaram percentuais de falha na madeira inferiores a 50%. Bianche *et al.*, (2017) observam que o adesivo à base de mamona apresentou maior valor médio de falha na madeira quando utilizado na menor gramatura estudada,

igual a 150 g/m<sup>2</sup> aplicado em duas faces. Ou seja, uma quantidade de adesivo equivalente a 300 g/m<sup>2</sup> aplicada nas juntas coladas foi suficiente para promover menor falha na madeira no uso do adesivo.

## 2.5. Desempenho de estruturas de madeira com ligações por adesivos

No que diz respeito ao dimensionamento de uma estrutura, observa-se que as rupturas acontecem em grande parte por falhas na resistência, rigidez e durabilidade das ligações. Por isso, ligações merecem atenção especial no dimensionamento em vista à manutenção da estabilidade, resistência e vida útil de uma estrutura (COURI PETRAUSKI, 2016).

Na confecção dos sistemas de ligações de peças em MLC a NBR 7190 (ABNT, 1997), exige uma colagem de lâminas com as fibras paralelas entre si. As ligações coladas possuem como características o fato de serem apresentáveis esteticamente, por não oferecerem o uso de conectores (pregos, parafusos), mas apenas a interação do adesivo e substrato (madeira).

Segundo Iwakiri (2017), a capacidade de adesão entre a madeira e o adesivo é adquirida através dos resultados dos testes de resistência das juntas coladas e do percentual de falha na madeira, determinados através de normas e reconhecidos a nível internacional. Segundo Molleken (2017), a maioria dos testes de resistência de juntas coladas prevê simular as piores condições de uso da estrutura, assim como as piores condições ambientais de transporte e acondicionamento.

Couri Petrauski (1999) construiu e testou pórticos treliçados em madeira laminada colada de *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus grandis*, previstos para uso em estruturas de cobertura com telha cerâmica, com sete metros de vão livre e beirais de 0,5 metros em cada extremidade. Foram dimensionadas as ligações coladas para cisalhamento por compressão, tração, torção e cortante e ainda para as combinações desses esforços. Para as estruturas testadas pela pesquisadora encontrou-se quociente médio entre as cargas de ruptura e de projeto na ordem de 7,3. No dimensionamento proposto para ligações coladas, embasado na validade do modelo de Hankinson, admitiu-se que uma área circular absorve o momento fletor atuante e que áreas adjacentes da ligação irão absorver os esforços cortante e normal. Além disso, para as estruturas testadas, percebeu-se um comportamento linear dos diagramas cargas x deslocamentos, com deslocamentos satisfatórios,

atestando a viabilidade do modelo de dimensionamento proposto para a ligação colada.

Petrauski (2000) construiu tesouras de telhados, feitas de laminado colado, com madeira de *Eucalyptus grandis*, de modo que cada ligação fosse feita, exclusivamente, com uso de adesivo e as submeteu a testes de carga. Propôs modelo de análise e dimensionamento de tais ligações, considerando-se válido o modelo de Hankinson, em função da necessidade de se colar lâminas a diferentes ângulos entre as fibras das peças. Os resultados foram satisfatórios enquanto protótipos ensaiados, considerados os desempenhos quanto à resistência e rigidez. Suas resistências últimas foram, em média, 4,26 vezes a carga de projeto, segundo critérios da NBR 7190 (ABNT, 1997). As rupturas não puderam ser assumidas como frágeis e nem atribuídas à perda de desempenho das ligações. Os deslocamentos apresentados para o nível de carga de projeto foram da ordem de 1/5 daqueles admissíveis pela NBR 7190 (ABNT, 1997), o que dá uma excelente margem de segurança para o incremento de deslocamento para cargas de longa duração. Ainda, o comportamento no diagrama carga x deslocamento foi linear, mesmo para os mais altos níveis de carga. A técnica proposta, ou seja, a confecção de estruturas inteiramente coladas para coberturas, a partir de lâminas de pequena espessura, mostrou-se viável e com desempenho muito satisfatório.

Couri Petrauski (2012) avaliou o comportamento estrutural de pórticos confeccionados a partir de tábuas coladas de eucalipto, utilizando madeira de *Eucalyptus sp* e dois adesivos: poliuretano (à base de óleo de mamona) e resorcinol-formaldeído. Foram projetadas, construídas e submetidas a testes de carga cinco unidades, em escala real, de pórticos retos triarticulados, com vão livre de 5 metros e com inclinação de 44%, aptas ao emprego de cobertura cerâmica. Os resultados de desempenho das juntas coladas mostraram que várias combinações dos fatores estudados satisfizeram critérios normalizados, podendo ser empregadas na feitura de juntas estruturais. Os valores médios obtidos para as resistências últimas das estruturas, utilizando adesivo resorcinol formaldeído e à base de óleo de mamona foram, respectivamente, de 4,63 e 4,42 apresentando desempenho mecânico satisfatório e deformações inferiores às permitidas por norma.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Generalidades

A pesquisa foi desenvolvida nas dependências do LEME – Laboratório de Estruturas e Materiais de Engenharia e LATEM – Laboratório de Tecnologia e Estruturas de Madeira, ambos da UNIOESTE/CCET/Campus de Cascavel-PR.

Os materiais utilizados compreenderam a madeira de *Araucaria angustifolia*, proveniente de reflorestamentos e o adesivo bi componente à base de óleos vegetais, comercialmente denominado “*Kehlfix-duo*”.

A madeira de araucária foi adquirida no comércio local e, segundo o fornecedor, foi proveniente de árvores cujo abate ocorreu com idade de 30 anos. Esta madeira foi entregue na forma de tábuas com seção transversal aproximada de 23 cm x 2 cm e com 3 metros de comprimento. O lote compreendeu 107 tábuas e sua caracterização foi feita por Wei (2017) e Peixoto (2017) durante o desenvolvimento, em conjunto, de seus Trabalhos de Conclusão de Curso.

O adesivo utilizado foi adquirido junto a empresa KEHL Indústria e Comércio, com sede na cidade de São Carlos – SP. A empresa fornece tal produto em dois componentes: o polioli e o isocianato. O polioli, até recentemente, tinha origem exclusiva no óleo de mamona. Atualmente, segundo a empresa, é obtido de uma mistura de óleos vegetais. Outrossim, o adesivo utilizado pode ser adquirido com uma carga para permitir uma coloração mais clara no produto final, beneficiando a estética. Não foi o caso desta pesquisa. O kit comercializado pela empresa compõe-se de 1 kg de polioli e 0,5 kg de isocianato. Esta proporção é a recomendada pelo fabricante, ou seja, na mistura utiliza-se 1 parte de isocianato para 2 de polioli. Contudo, já se sabe que outras proporções, podem ser melhores. Couri Petruski (2012), por exemplo, recomendou proporção de 1:1,32 para o adesivo original à base de óleo de mamona numa situação de consumo de 300 g/m<sup>2</sup> de superfície colada.

#### 3.2. Metodologia

Considerados os objetivos da pesquisa, a composição metodológica foi dividida em algumas etapas que são:

- caracterização da madeira;
- caracterização das propriedades de adesão da madeira com o adesivo;
- projeto estrutural do pórtico em escala real;
- projeto estrutural do pórtico em escala reduzida;
- construção e teste de 5 unidades do pórtico em escala reduzida;
- análise dos resultados e conclusão da pesquisa.

### 3.2.1. Caracterização da madeira e de suas propriedades de adesão

As propriedades de resistência mecânica e rigidez da madeira que foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho compreenderam:

- a resistência característica à compressão paralela às fibras,  $f_{c0,k}$ ;
- a resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras,  $f_{v0,k}$ ; e
- o módulo de elasticidade médio paralelo às fibras,  $E_{c0,m}$ .

Esta caracterização equivale a uma realidade próxima da caracterização dita simplificada nos padrões da NBR 7190 (ABNT, 1997). Ainda, a simbologia empregada acima é a nomenclatura adotada pela norma brasileira.

A caracterização da madeira utilizada já foi realizada por Wei (2017) e Peixoto (2017). Foram obedecidas as prescrições normativas e os resultados são apresentados na Tabela 3. Convém destacar que a caracterização foi feita a partir de corpos de prova normalizados obtidos por colagem de lâminas da madeira adquirida.

Tabela 3 - Resultados para a caracterização mecânica da madeira, corrigidos para 12% de umidade

| Propriedade | Número de Corpos de Prova | Valor Característico (MPa) | Média (MPa) | Desvio padrão (C.V.(%)) (MPa) |
|-------------|---------------------------|----------------------------|-------------|-------------------------------|
| $f_{c0,k}$  | 22                        | 45,8                       | 52,6        | 6,8 (12,93)                   |
| $E_{c0,m}$  | 22                        | -                          | 15904       | 2369 (14,90)                  |
| $f_{v0,k}$  | 22                        | 8,8                        | 10,53       | 1,88 (17,85)                  |

Fonte: Wei e Peixoto (2017)

Na determinação de  $f_{c0,k}$  e  $E_{c0,m}$  trabalhou-se com corpos cuja densidade aparente média indicou  $0,54 \text{ g/cm}^3$  e com um teor de umidade médio de 10% (base

seca). Deve-se destacar que o fato de trabalhar com tábuas obrigou a confecção dos corpos de prova a partir da colagem de três lâminas, conforme é ilustrado na Figura 1.

Perceba-se na Figura 1 que os corpos produzidos, no padrão da norma brasileira, para caracterizar a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras,  $f_{v0,k}$ , foram executados via colagem. Para metade da série o plano de cisalhamento foi executado perpendicular aos planos colados (Figura 1a) e para a outra metade o plano de cisalhamento ficou paralelo aos planos de cola (Figura 1b). Isto equivaleu a uma adaptação necessária quando se trabalha com madeira na forma de tábuas.

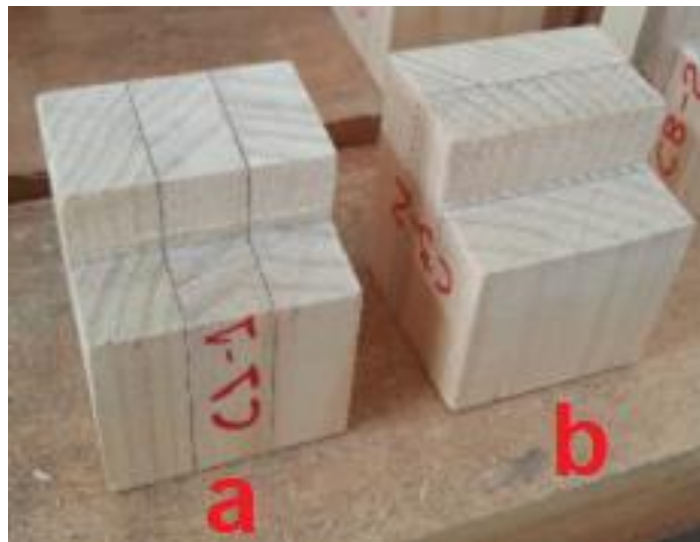


Figura 1 - Corpos de prova para ensaio ao cisalhamento –  $f_{v0,k}$ .

A caracterização das propriedades de adesão foi determinada com a realização dos seguintes ensaios:

- a resistência característica ao cisalhamento na compressão com juntas coladas com as fibras paralelas,  $f_{v0,k}$ ;
- a resistência característica ao cisalhamento na compressão com juntas coladas com as fibras perpendiculares,  $f_{v90,k}$ ;
- a resistência característica ao cisalhamento na torção com juntas coladas com as fibras paralelas,  $f_{vt0,k}$ ; e
- a resistência característica ao cisalhamento na torção com juntas coladas com as fibras perpendiculares,  $f_{vt90,k}$ .

O primeiro ensaio é normalizado pela “*American Society for Testing and Materials*” – ASTM D905 (ASTM, 1994). O segundo ensaio foi realizado com uma

adaptação do primeiro fazendo-se a colagem dos corpos de prova de modo que as fibras ficassem perpendiculares entre si. Os dois últimos ensaios fazem parte de uma proposta de Petruski (2000) na qual se apresenta método para dimensionar ligações coladas. No conjunto, os 4 ensaios subsidiam o método proposto e usado, por exemplo, por Couri Petruski (2012) no dimensionamento de pórticos laminados colados.

A Figura 2 ilustra o esquema dos corpos de prova para ensaios de torção na linha de cola. A região circular em destaque (plano colado) é submetida a um esforço de torção e, aplicando-se fórmula própria da resistência dos materiais, é possível calcular a resistência ao cisalhamento oferecida no momento da ruptura (COURI PETRAUSKI, 2012). O aparato usado para ruptura, já instalado em Máquina Universal de Ensaio, é ilustrado na Figura 3.

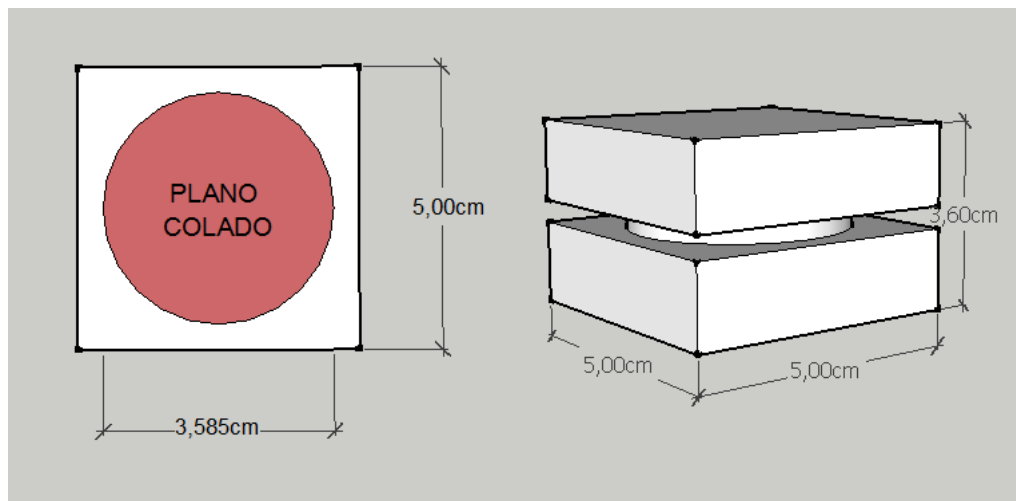


Figura 2 - Esquema dos corpos de prova para ensaio da resistência ao cisalhamento na torção.

Fonte Wei (2017)





Figura 3 - Ensaio de cisalhamento na torção com o aparato na Máquina Universal de Ensaio

Foram produzidas juntas coladas para extração dos corpos de prova para determinação das propriedades de adesão da madeira de *Araucaria angustifolia* com o adesivo bi componente. Algumas juntas foram executadas com colagem das lâminas de modo que as fibras da madeira ficassem paralelas entre si. Destas juntas foram extraídos os corpos de prova para os ensaios da resistência ao cisalhamento na compressão e torção, com colagem das fibras paralelas entre si. Para estas a conformação básica equivale àquela proposta na ASTM D905 (ASTM, 1994).

Outras juntas foram produzidas de modo a que se conseguisse a colagem das lâminas com as fibras perpendiculares entre si. Destas, foram extraídos os corpos de prova para caracterização da resistência ao cisalhamento na compressão e torção, com fibras dispostas perpendicularmente entre si.

Ao todo foram produzidos 116 corpos de prova sendo 68 colados com fibras paralelas e 48 colados com fibras perpendiculares entre si. De cada um destes dois grupos metade foi preparada para ensaio à compressão e metade para ensaio à torção. As juntas foram coladas aplicando-se o adesivo bi componente em consumo equivalente a 300 g/m<sup>2</sup> com auxílio de balança analítica e com espalhamento à pincel, em apenas uma face. No preparo do adesivo utilizou-se a proporção de 1:1,5

entre os componentes isocianato e polioli, respectivamente.

Após colagem, seguiu-se o tempo de montagem em aberto nulo e tempo de montagem em fechado de aproximadamente 20 minutos. Seguiu-se a prensagem e, passadas 12 horas, a desforma.

### 3.2.2. Projeto do pórtico em escala real

Uma das motivações para esta pesquisa foi o fato de que a Cooperativa Lar, atuante na região oeste do Estado do Paraná, tem recomendado a execução de aviários de postura segundo a geometria apresentada na Figura 4. Surgiu, portanto, a ideia de desenvolver a estrutura destas edificações utilizando-se de pórticos triarticulados em madeira laminada colada. Neste caso, ainda, desejou-se uma solução com cobertura metálica.

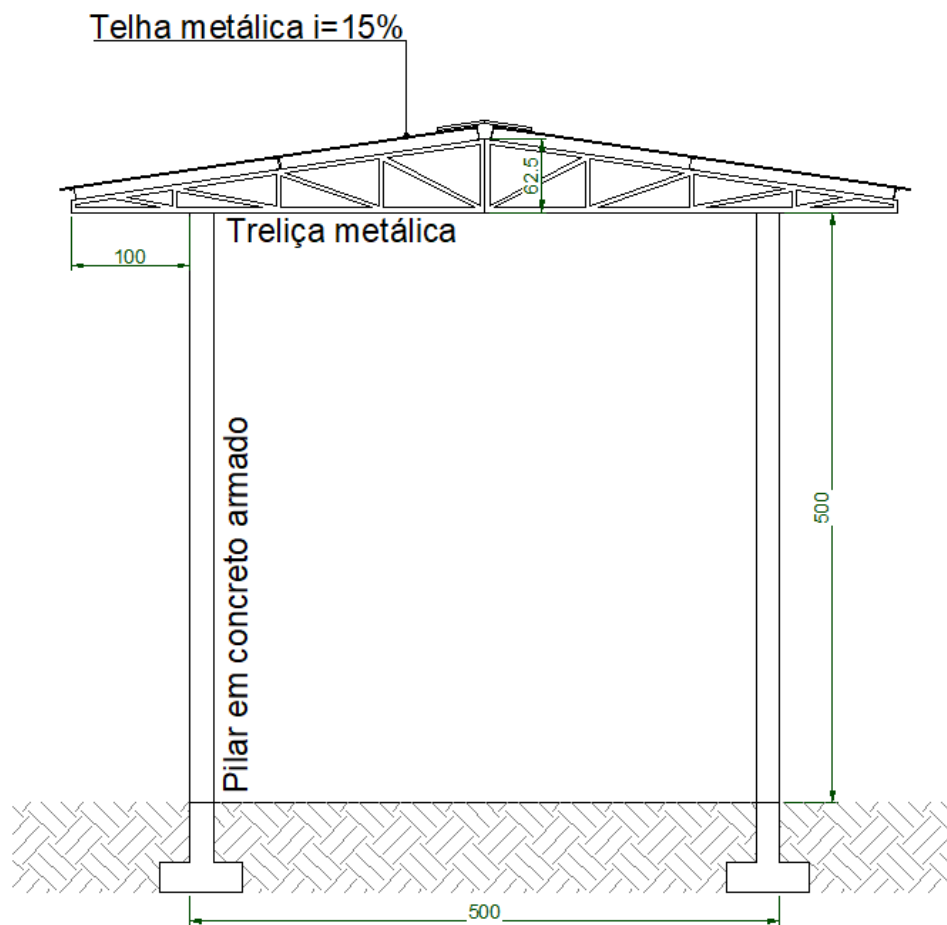


Figura 4 - Esquema geral da geometria frontal dos aviários de postura da cooperativa Lar (Dimensões em cm)

Num primeiro momento do dimensionamento/verificação do pórtico realizou-se um levantamento das cargas atuantes, compreendendo cargas permanentes e acidentais. Foram utilizados os seguintes parâmetros principais:

- cobertura com telhas aluzinco, apoiadas/fixadas sobre 5 terças igualmente espaçadas na cobertura;
- inclinação de 15° para a cobertura;
- beirais de 1 metro;
- espaçamento de 2,5 metros entre pórticos; e
- confecção dos pórticos adotando-se 5 lâminas para cada barra principal, possuindo cada uma 2,5 cm de espessura;

O levantamento das cargas devidas ao vento se fez de acordo com a norma NBR 6123/88, utilizando, contudo, o programa livre Visualventos (<http://www.etoools.upf.br>, 2008), desenvolvido pela Universidade de Passo Fundo/RS. Considerou-se, neste caso, uma edificação rural na região de Cascavel/PR, em terreno aberto, com poucas obstruções.

Com relação à sobrecarga, adotou-se uma sobrecarga vertical com orientação para baixo, de 1 kN, conforme sugere a norma NBR 6120 (ABNT, 1987). Para a determinação das chamadas “solicitações de cálculo” seguiu-se o recomendado da NBR 7190 (ABNT, 1997) no que diz respeito às combinações das ações previstas. Por fim, foram adotados os critérios previstos para estruturas correntes da norma brasileira quanto a limitação das flechas. Neste caso, adotou-se a limitação normativa igual a L/200, por se tratar de construção rural.

Foram aplicadas as combinações de ações/esforços previstas pela NBR 7190 (ABNT, 1997), conforme Equações 1 e 2 apresentadas abaixo. Destaque-se que a Equação 1 foi usada para a hipótese de sobrepressão do vento e a Equação 2 para a hipótese de sucção do vento.

$$E_d = \gamma_g \cdot E_{gk} + \gamma_Q \cdot (E_{Q1k} + \varphi_0 \cdot E_{Q2k}) \quad (1)$$

$$E_d = \gamma_g \cdot E_{gk} + \gamma_Q \cdot E_{wk} \quad (2)$$

Onde:

$E_d$  = esforço de cálculo;

$E_{gk}$  = esforço característico associado ao carregamento permanente;

$E_{Q1k}$  = esforço característico associado ao carregamento acidental q1;

$E_{Q2k}$  = esforço característico associado ao carregamento acidental q2;

$E_{wk}$  = esforço característico associado ao vento;

$\gamma_g$  = coeficiente de segurança relativo à ação permanente;

$\gamma_Q$  = coeficiente de segurança relativo as ações acidentais;

$\varphi_0$  = coeficiente de ponderação aplicado a uma dada ação acidental

O pórtico foi dimensionado e/ou verificado para as combinações mais severas oriundas das duas hipóteses consideradas: sobrepressão ou sucção do vento. Contudo, as combinações para vento de sucção foram mais severas. Como consequência, por exemplo, as bitolas das lâminas na região da ligação rígida foram estabelecidas com base nesta hipótese.

Portanto, embora a hipótese de sobrepressão do vento tenha sido avaliada, em conjunto com duas possibilidades de sobrecarga, a hipótese de sucção predominou. Neste sentido, o estado de solicitações mais severo equivaleu às ações indicadas na Figura 5.

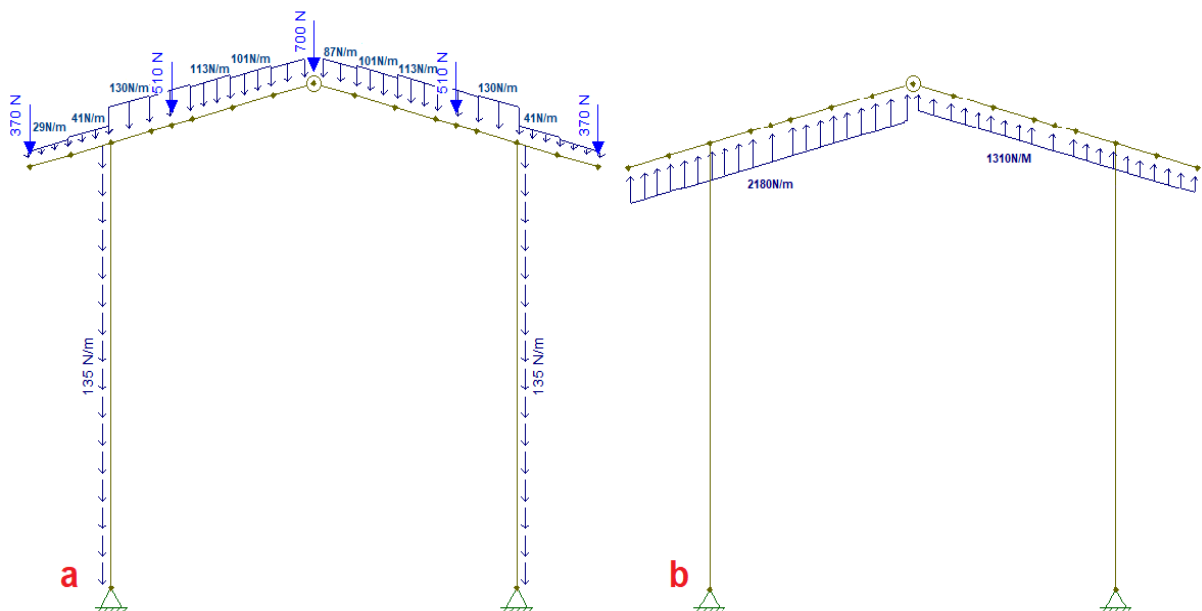


Figura 5 - 5(a) – ação permanente na estrutura e 5(b) sucção do vento, conforme saída do programa Visualventos

Convém destacar que a ação do vento conforme ilustrada acima foi adequadamente concentrada nas terças para implementação no programa Ftool. De posse de todas as ações de cálculo  $M_d$ ,  $N_d$  e  $V_d$ , para os pontos principais, foram conduzidos os procedimentos de dimensionamento/verificação. Destaque-se que as verificações para flexão, flexo-compressão e ligação colada, no nó C conduziram às dimensões adotadas nesta região do pórtico. Ainda, as reduções de inércia foram aquelas que, além de satisfazer os Estados Limites Últimos, também permitiram satisfazer as flechas admissíveis.

A Figura 6 ilustra a configuração geométrica escolhida para a estrutura em laminado colado, dando ênfase às seções das lâminas que compunham a estrutura em escala real, as quais foram utilizadas para posterior dimensionamento estrutural. Trata-se de pórtico triarticulado, com articulações nos nós A, C e E cuja viabilidade técnica e estrutural foi testada e comprovada por Couri Petrauski (2012).

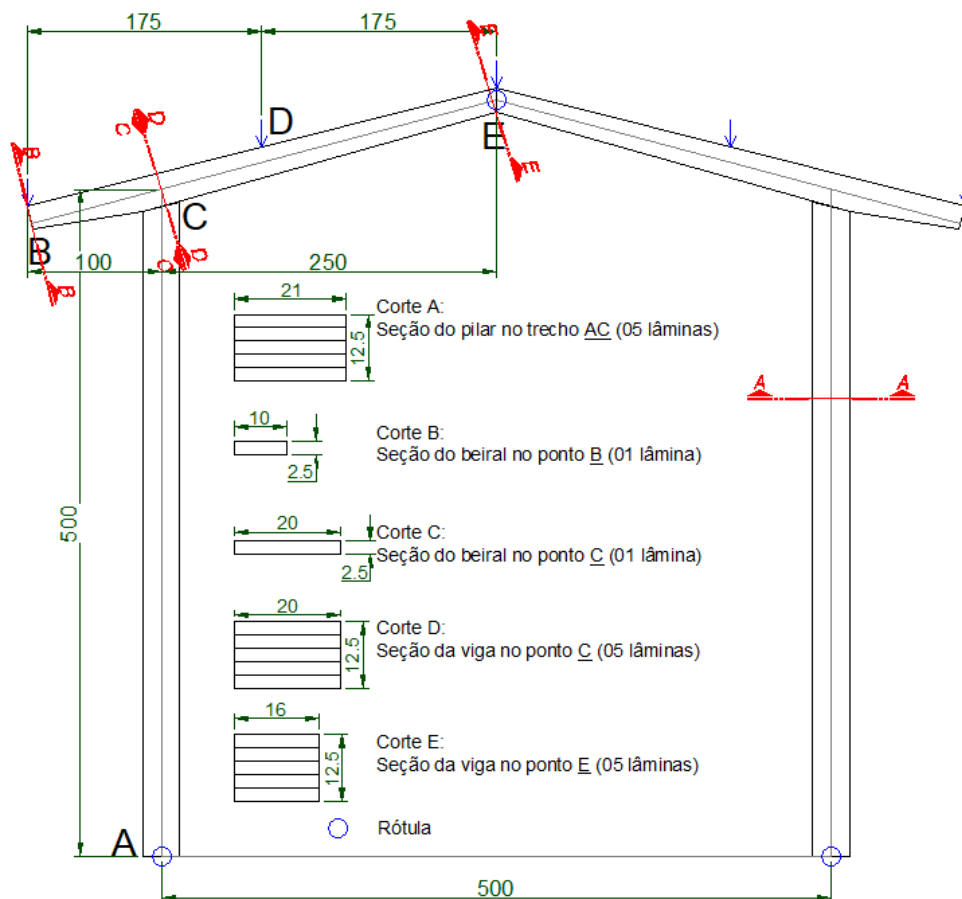


Figura 6 - Configuração Geral do Pórtico em Escala Real. (Dimensões em cm).

Convém destacar que nesta pesquisa procurou-se uma solução que permitisse impor uma variação de inércia nas barras da cobertura, reduzindo a

seção em regiões menos solicitadas, como ilustrado na Figura 7 e compreendeu uma solução que objetiva um dimensionamento com um menor consumo de material.

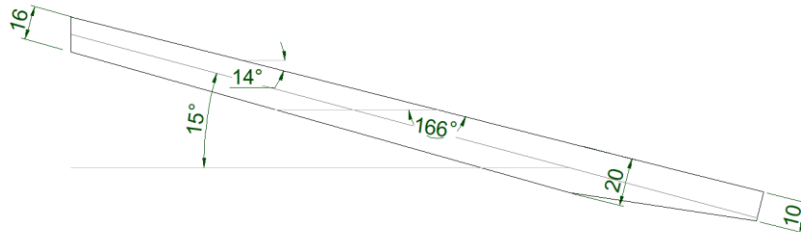


Figura 7 - Detalhe da seção transversal na peça da viga. (Dimensões em cm)

Conforme já apresentado na Figura 6 as lâminas foram dispostas da seguinte forma:

- 5 lâminas para a região do pilar com a seção de 12,5 x 21 cm;
- 5 lâminas para a região da viga, começando com a seção de 12,5 x 20 cm na região da ligação até 12,5 x 16 cm na região da cumeeira;
- 1 lâmina resistente para a região do beiral, começando com a seção de 2,5 x 10 cm até 2,5 x 20 cm na região da ligação.

### 3.2.3. Projeto do pórtico em escala reduzida

O projeto do pórtico em escala reduzida considerou que:

- a geometria do pórtico original seria reduzida segundo uma escala de 1:2,5. Isto foi necessário devido às limitações do Quadro de Reação existente no LEME.
- foi mantida a ideia original de executar-se as barras principais do pórtico, pilar e viga de cobertura, com cinco lâminas cada.
- quanto à espessura das lâminas, optou-se por adotar espessura igual a 1,5 cm em todas as lâminas utilizadas.

O uso de lâminas com 1,5 cm de espessura foi adotado por duas razões principais: economia de madeira e qualidade de usinagem. As lâminas disponíveis estavam com espessura próxima de 2 cm. Neste sentido, aplicar-se uma redução de 1:2,5 em relação ao pórtico real, iria equivaler a trabalhar com lâminas de 1 cm. Tal situação geraria um desperdício de, no mínimo, 50% da madeira processada. Ainda,

trabalhar com espessura de 1 cm, equivaleria a trabalhar no limite da plaina desengrossadeira e poderia gerar problemas de processamento. Por estas razões, a dimensão da espessura foi adotada igual a 1,5 cm.

Tomadas estas decisões, haveria que se adotar um procedimento para dimensionar o pórtico e isto incluiria uma carga/ação a ser combatida. Neste contexto, ainda, haveria que se conciliar soluções adotadas para o pórtico real com aquelas a serem obtidas para o pórtico reduzido. Recorde-se, por exemplo, que a solução definitiva para o pórtico em escala real foi motivada pela hipótese de sucção do vento. Isto gerou um problema adicional: a impossibilidade de efetivar-se os testes com ações de sucção (forças de baixo para cima).

Neste contexto, é bom esclarecer que este tipo de estrutura trabalha fundamentalmente à flexão, ou seja, o momento fletor é o esforço principal que, normalmente, comanda o dimensionamento das ligações rígidas e a escolha das seções resistentes na viga de cobertura, por exemplo. Surgiu, portanto, a seguinte ideia: procurar obter um carregamento normal e exequível, com forças de cima para baixo, que gerasse, para os momentos fletores, o mesmo tipo de influência no pórtico reduzido e que estivesse associada à solicitação crítica do pórtico real.

A Figura 8 procura ilustrar esta ideia. Na Figura 8(a) está ilustrada a solicitação para momentos fletores considerada no projeto do pórtico real, à esquerda e para o pórtico reduzido, à direita. Perceba-se que a situação crítica do pórtico real equivale a momentos fletores que tracionam as fibras internas na ligação C. Dado que no pórtico reduzido haveria a impossibilidade de efetivar este tipo de solicitação, procurou-se uma solução que, trabalharia com um percentual destes momentos, contudo, tracionando as fibras externas no nó C. Como ilustrado na Figura 8(a), no pórtico reduzido, trabalhou-se com aproximadamente 17% dos valores dos momentos atuantes na estrutura real.

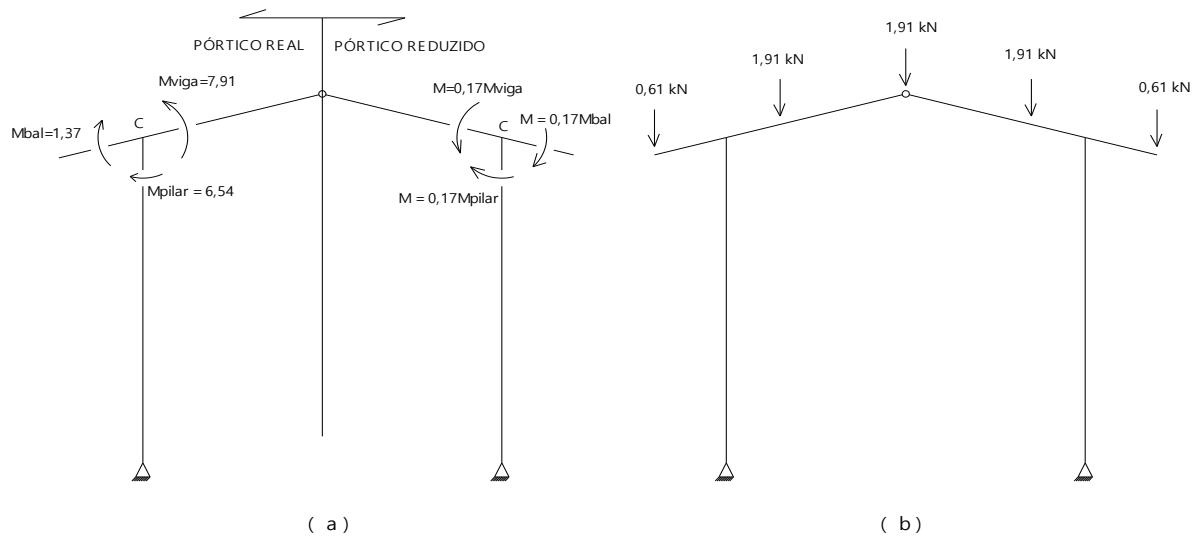


Figura 8 - 8(a) comparativo de solicitações no nó C do pórtico real e reduzido. 8(b) carga de projeto do pórtico reduzido

Esta inversão nas tendências de giro dos momentos fletores não prejudica a análise de desempenho da ligação do pórtico e, ainda, permitiu viabilizar os carregamentos do ensaio.

Por fim, após algumas análises, percebeu-se que o estado de carregamento indicado na Figura 8(b) iria impor à ligação rígida do pórtico reduzido o estado de solicitação desejado, como ilustrado na Figura 8(a). Portanto, o indicado em 8(b) equivaleu à carga de projeto do pórtico reduzido.

Com base na carga de projeto do pórtico reduzido, procedeu-se a análise estrutural para obtenção dos esforços nos diferentes pontos da estrutura reduzida. Na sequência, aplicados os critérios normativos fez-se as verificações e/ou dimensionamentos necessários.

A Figura 9 ilustra a configuração geométrica escolhida para a estrutura reduzida em laminado colado, dando mais uma vez ênfase às seções das lâminas que compuseram a estrutura. Neste caso, determinou-se que cada lâmina do conjunto teria uma espessura de 1,5 cm.



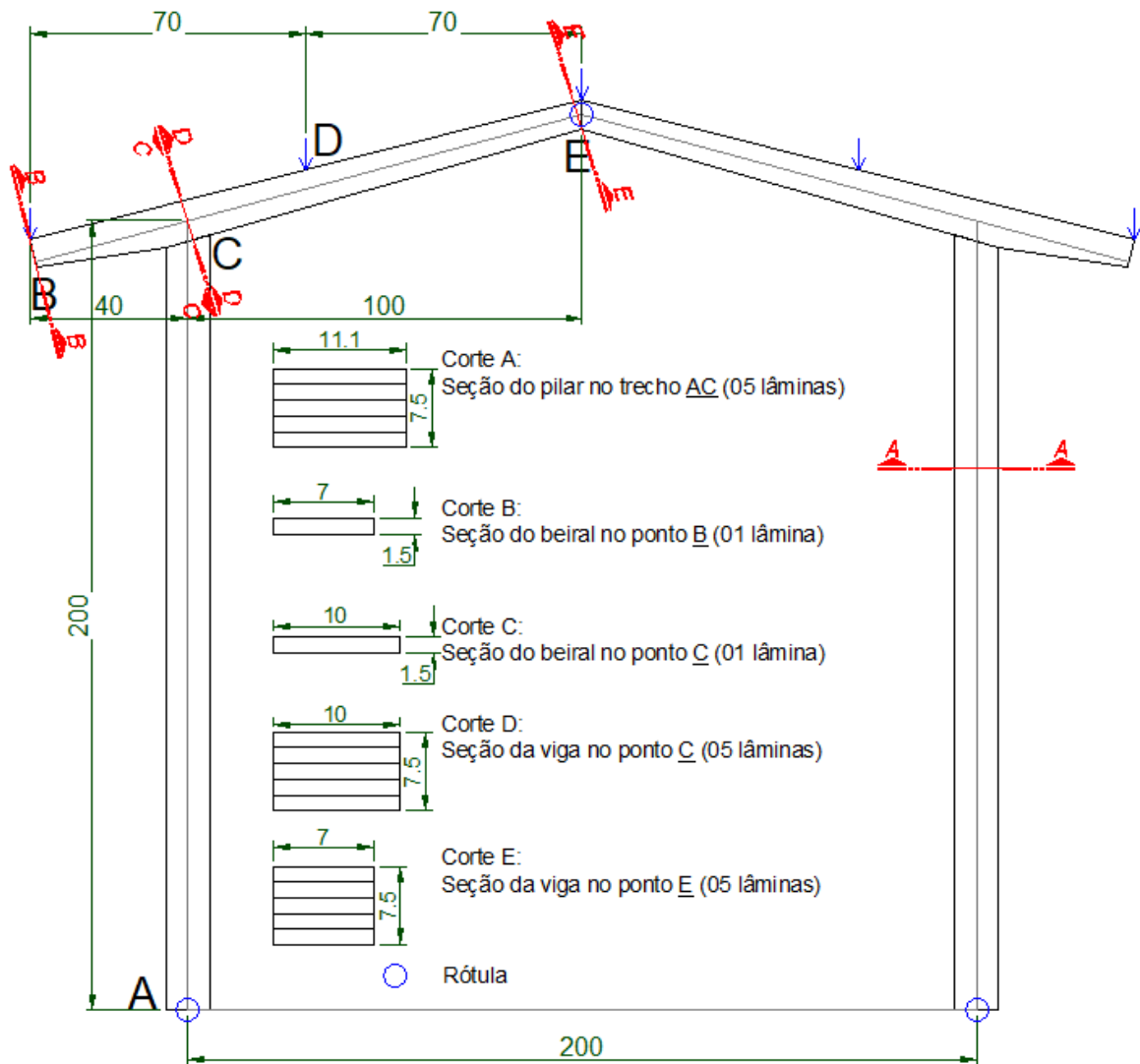


Figura 9 - Configuração Geral do Pórtico em Escala Reduzida (Dimensões em cm)

Conforme já apresentado na Figura 7, as lâminas foram dispostas da seguinte forma:

- 5 lâminas para a região do pilar com a seção de 7,5 x 11.1 cm;
- 5 lâminas para a região da viga, começando com a seção de 7,5 x 10 cm na região da ligação até 7,5 x 7 cm na região da cumeeira;
- 1 lâmina para a região do beiral, começando com a seção de 1,5 x 7 cm até 1,5 x 10 cm na região da ligação.

### 3.2.4. Destaque sobre a verificação das estruturas

A verificação/dimensionamento das estruturas dividiu-se em duas partes. Primeiro foi dimensionado o pórtico em escala real e, num segundo momento, o

pórtico em escala reduzida. Em quaisquer dos casos, a região crítica, que comandou as soluções, foi a ligação rígida no nó C, conforme indicado nas Figuras 5 e 7.

Nesta região, conforme se apresenta na Figura 8, fez-se necessário conciliar o trabalho de 5 lâminas. São duas lâminas que provêm do pilar unidas, por adesivo, a outras 3 lâminas que formam a cobertura. Para além do comportamento do adesivo, nesta região, portanto, são apenas duas lâminas resistentes do pilar e três da cobertura. Estes conjuntos de lâminas foram verificados à flexão, flexo-compressão e cisalhamento, conforme o caso. Adicionalmente, foi aplicado critério de verificação dos planos colados.

Cabe destacar, por fim, que a solução para o pórtico em escala reduzida, nesta região do nó C, procurou manter uma solução compatível com o obtido para o pórtico em escala real. Esta compatibilidade equivaleu a satisfação de dois aspectos: lâminas de madeira em situações limites de resistência à flexão e, planos colados, com tensões de cisalhamento com valores próximos.

### **3.2.5. Destaque para a verificação da Ligação Colada**

A ligação Pilar x Viga do pórtico exige uma colagem com inclinação diferente de  $0^\circ$ , o que não está contemplado na NBR 7190 (ABNT, 1997).

A solução adotada neste trabalho foi utilizar-se de um número ímpar de lâminas. Assim, conforme ilustra-se na Figura 10, na região da ligação rígida, algumas lâminas são interrompidas em algumas barras. Pode-se, por exemplo, interromper 3 lâminas que vem do pilar. Desta forma, apenas duas lâminas do pilar (lâminas hachuradas 2 e 4) entram na região da ligação. Por outro lado, as lâminas 1, 3 e 5 da barra da cobertura atravessam a região da ligação e fazem contato, via adesivo, com as duas do pilar.

Esta ideia permite quantificar a área de colagem necessária para fazer frente ao combate dos esforços atuantes:  $M_d$ ;  $V_d$ ; e  $N_d$ , conforme ilustrado.

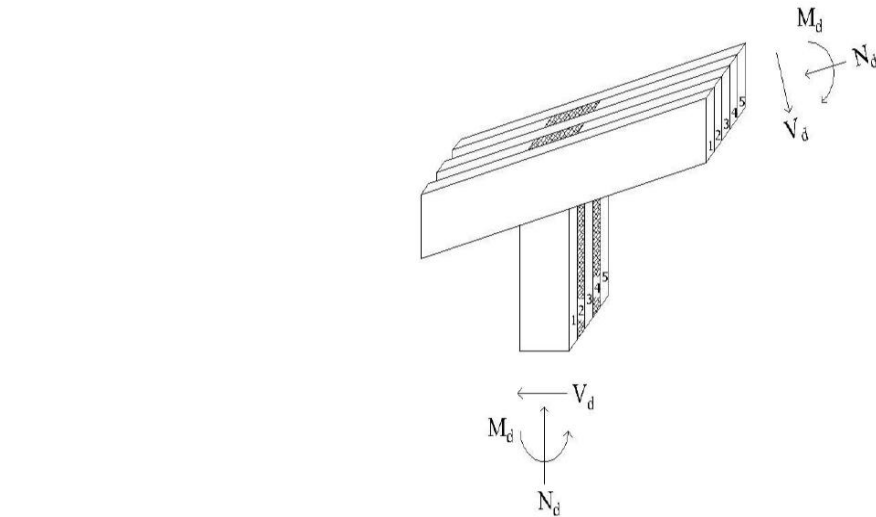


Figura 10 - Esquema da ligação rígida do pórtico. Fonte Petruski (1999)

A formulação básica é apresentada por Couri Petruski (2012) compreende o desenvolvimento de uma situação tal como ilustrado na Figura 11.

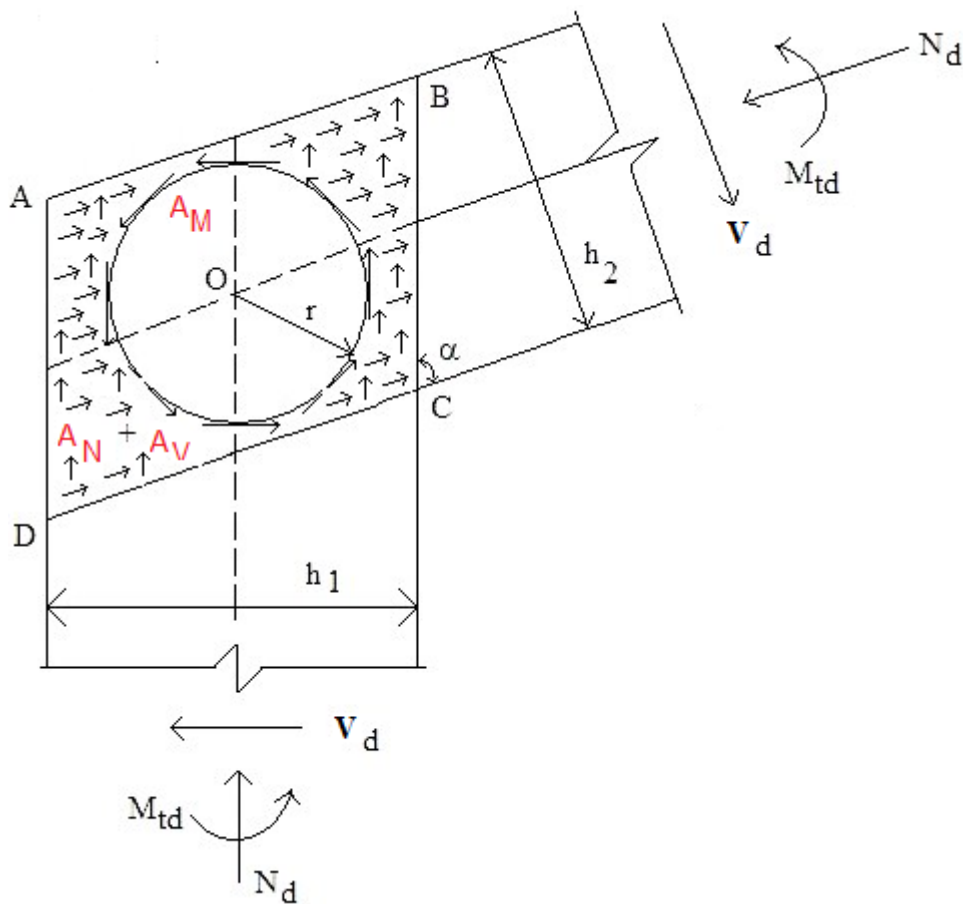


Figura 11 - Esquema geral de análise de uma ligação colada sujeita a esforços simultâneos

Fonte: Couri Petruski (2012)

Conforme ilustra a Figura 11, na região colada ABCD haverá que se garantir a existência de três áreas  $A_M$ ;  $A_N$ ; e  $A_V$ . A área total colada  $A_C$  precisa conter todas as parcelas de modo a satisfazer a Equação 3 apresentada.

$$A_M + A_N + A_V \leq A_C \quad (3)$$

Onde:

$A_M$  = área necessária para resistir às tensões de cisalhamento, provenientes do momento de torção de cálculo  $M_{td}$ ;

$A_N$  = área necessária para resistir às tensões de cisalhamento, provenientes do esforço normal de cálculo  $N_d$ ;

$A_V$  = área necessária para resistir às tensões de cisalhamento, provenientes do esforço cortante de cálculo  $V_d$ ;

$A_C$  = área colada entre duas lâminas da ligação, equivalente à área do paralelogramo.

O desenvolvimento da Equação 3 torna-se a equação 4 conforme se apresenta a seguir.

$$\left(\frac{2 \cdot M_{td} \cdot \pi^{1/2}}{n \cdot f_{tor90,d}}\right)^{2/3} + \frac{N_d}{n \cdot f_{v\alpha,d}} + \frac{V_d}{n \cdot f_{v90,d}} \leq \frac{h_1 \cdot h_2}{\text{sen}(\alpha)} \quad (4)$$

Onde:

$M_{td}$  = momento de torção de cálculo, kNm;

$N_d$  = esforço normal de cálculo, kN;

$V_d$  = esforço cortante de cálculo, kN;

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

$f_{tor90,d}$  = resistência à torção de juntas coladas normais entre si, MPa;

$f_{v90,d}$  = resistência ao cisalhamento de juntas coladas normais entre si, MPa;

$f_{v\alpha,d}$  = resistência ao cisalhamento de juntas coladas inclinadas, em relação às fibras, MPa;

$h_1$  = altura da barra 1, m;

$h_2$  = altura da barra 2, m;

$\alpha$  = ângulo entre a direção das fibras.

Exceto esta verificação apresentada para a região da ligação rígida, todas as outras verificações são aquelas normalizadas e prescritas na NBR 7190 (ABNT, 1997).

Por fim, a verificação das flechas foi realizada como o critério mais brando apresentado pela norma brasileira, uma vez que se trata de uma edificação rural.

### 3.2.6. Redução da Inércia

Com o objetivo de tornar a estrutura mais econômica, foi proposta a diminuição da inércia da peça em regiões menos solicitadas. Com isso foi proposto um corte em ângulo no sentido longitudinal das vigas, conforme apresentado na Figura 12, de maneira semelhante com o que é feito usualmente em concreto armado em edificações rurais.

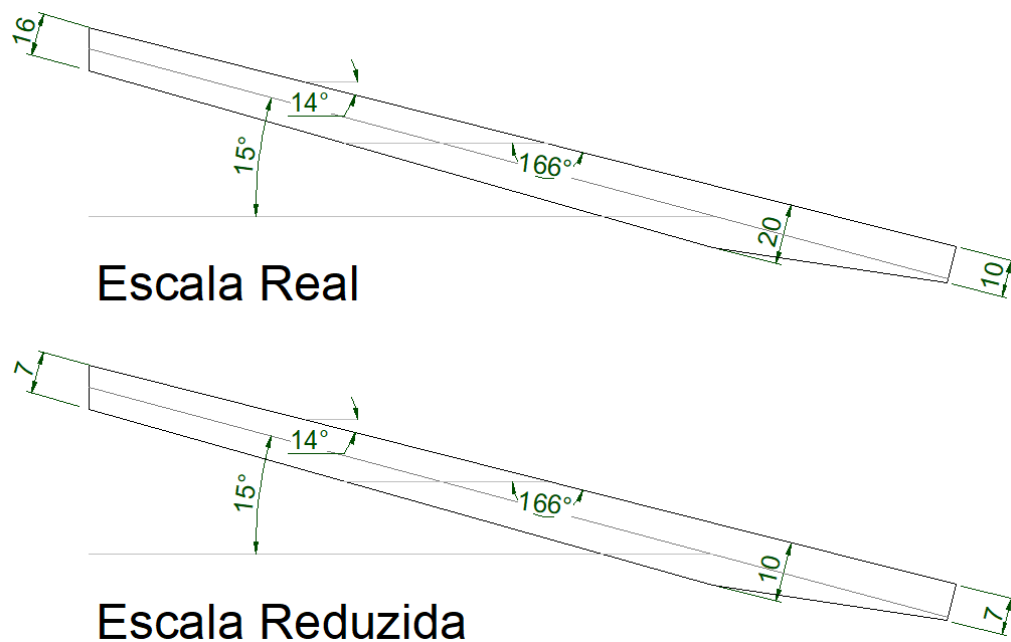


Figura 12 - Esquema geral de redução de inércia em escala real e reduzida respectivamente. Redução de 1:2,5 sem escala

Esta variação contínua de inércia não se consegue, por exemplo, implementar no programa Ftool, da PUC-Rio (<https://www.ftool.com.br/>, 2018), utilizado neste trabalho para análise de flechas. Neste sentido, fez-se a implementação no Ftool utilizando-se trechos com diferentes inércias, conforme apresenta as Figuras 13 e 14,

para escala real e escala reduzida, respectivamente.

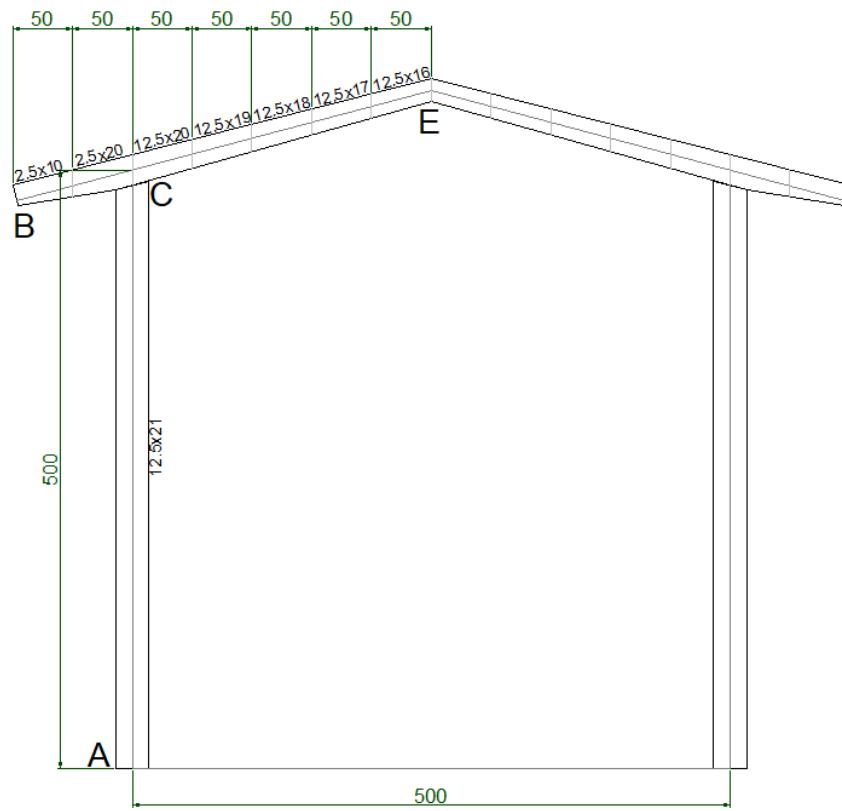


Figura 13 - Configuração Geométrica aplicada ao programa Ftool – Escala Real

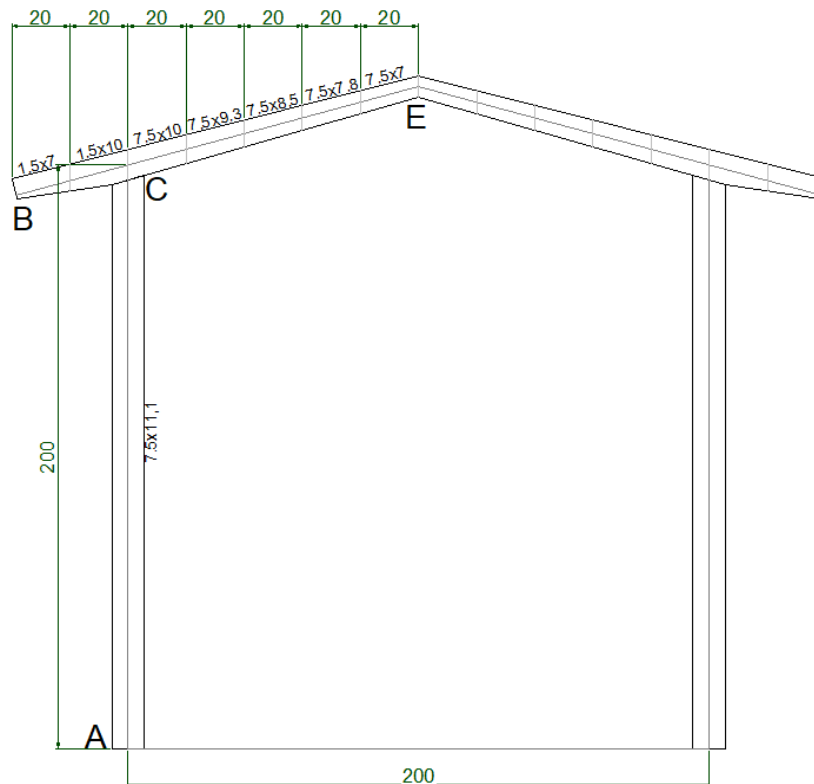


Figura 14 - Configuração Geométrica aplicada ao programa Ftool - Escala Reduzida

### 3.2.7. Execução das Estruturas

A partir da classificação da madeira e divisão em ordem da densidade de cada peça, foram confeccionados 05 pórticos em madeira laminada colada de acordo com a seguinte distribuição:

- Pórtico 01: madeira menos densa;
- Pórtico 02: madeira mais densa;
- Pórticos 03, 04 e 05: madeira com classe de densidade média, divididas entre os pórticos de maneira aleatória;

Cada pórtico foi confeccionado em duas partes distintas, sendo formado por pilar e viga e unidos no centro, região da cumeeira, por um pino metálico. Dentro da distribuição das densidades, ainda, se tomou o cuidado de separar as peças de modo que os lados simétricos de um mesmo pórtico apresentassem valores similares para as médias da densidade.

A primeira etapa constituiu-se na preparação das lâminas para a colagem. As madeiras foram processadas na desgrossadeira, desempenadeira e plaina até uma fase anterior àquela adequada para a colagem. O último processo nas lâminas foi feito no dia da colagem, na plaina desgrossadeira, para que a superfície estivesse propícia a receber o adesivo. As lâminas ficaram com uma espessura final de 1,5 cm.

Foram confeccionados dois gabaritos para a colagem/prensagem das metades dos pórticos. Assim, foi confeccionado 1 pórtico por dia. O gabarito, além de proporcionar a acomodação das peças em sua posição exata teve como objetivo permitir aplicar a carga necessária para a adequada pressão conforme apresentado na Figura 15.



Figura 15 - Gabarito de Colagem e torquímetro eletrônico para controle da pressão

Antes da colagem foi mensurada a quantidade de adesivo necessário para a colagem das quatro camadas, incluindo pilar, viga e beiral e o total foi separado em quatro recipientes, um para cada camada. Seguiu-se com a aplicação da cola na



superfície da madeira, espalhamento com pincel, posicionamento das lâminas e repetição da operação até a última camada.

Para o adesivo a proporção entre os componentes isocianato e polioliol, em massa, foi de 1:1,5. A quantidade de adesivo foi de 300 g/m<sup>2</sup>, aplicado em uma das faces.

Depois de aplicado o adesivo em todas as camadas e posicionadas as tábuas houve um período de acomodação das lâminas e, posteriormente, começou-se a prensagem. A pressão foi realizada com o aperto do conjunto de barras rosqueadas, fixadas no gabarito. O controle do aperto foi realizado com uma chave de boca, instrumentada com “*strain gage*”, cuja leitura era feita em *datalogger* calibrado anteriormente. A pressão utilizada foi de 11 kgf/cm<sup>2</sup>. O processo de montagem/colagem envolvia, em média, cinco pessoas para sua execução. O tempo de montagem em fechado foi, no máximo, 25 minutos, e o tempo de montagem em aberto foi nulo. Por ocasião da colagem das 5 estruturas, a madeira estava com teor de umidade médio de 12,07%, obtido a partir da determinação de umidade em 31 corpos de prova.

Após o procedimento de colagem, a estrutura ficou sob pressão no gabarito por um período mínimo de 12 horas. Depois disso a estrutura era retirada para que fosse armazenada. Segundo recomendação do fabricante foi aguardado o período mínimo de 7 dias para a realização dos ensaios com os pórticos.

### **3.2.8. Ensaio das estruturas construídas**

Os testes foram conduzidos utilizando-se o quadro de reação em concreto armado disponível no LEME. Para a realização dos ensaios o quadro de reação teve que ser preparado para dar suporte não apenas aos pórticos, mas também aos cilindros aplicadores de carga, sistema de contraventamento e relógios comparadores para medida e registro dos deslocamentos.

Com relação ao sistema de aplicação de cargas, foram confeccionados e fixados apoios de madeira em pontos específicos, para dar suporte aos cilindros hidráulicos para aplicação das cargas verticais. Para os beirais optou-se por confeccionar bandejas para a aplicação de carga através de corpos de prova de concreto. A Figura 16 ilustra parte do aparato utilizado. Devido a inclinação da viga foi necessário a confecção de um aparato de madeira responsável pela recepção

das cargas nos cilindros, no centro do vão e na cumeeira da estrutura. Foram instaladas duas células de cargas nos meios dos vãos das vigas para o acompanhamento e registro das cargas.



Figura 16 - Detalhe das bandejas utilizadas para aplicação das cargas nos beirais.

Para viabilizar o vínculo dos pórticos na base criou-se apoios de 2º gênero em madeira, garantindo o grau de liberdade necessário à estrutura. Essa base foi fixada ao quadro de reação em concreto armado através de parafusos. O sistema de contenção lateral foi realizado através de parafusos soldados com um rolamento

metálico na ponta, permitindo o deslizamento da estrutura e o acompanhamento do seu estado de deformação. Os sistemas de sustentação e contenção da estrutura objetivaram simular contraventamentos teóricos de projeto, permitir o livre deslocamento na direção da carga, impedindo, porém, deslocamentos consideráveis, fora do plano da estrutura, bem como evitar acidentes, quando de sua ruptura.

Para a leitura dos deslocamentos do pórtico sob ação de carga, foram instalados 06 relógios em pontos pré-estabelecidos. Os pontos que foram considerados mais importantes para aferição dos deslocamentos foram aqueles que, em simulação no programa Ftool, apresentaram maiores deslocamentos. A configuração final do teste com a montagem do aparato é apresentada na Figura 17.



Figura 17 - Aparatos finais para realização do teste

Instalado todo o aparato de teste, aplicou-se uma carga de “acomodação” na estrutura de cerca de 3 kN no total, aplicada pelos três cilindros. Aliviada essa carga, todos os relógios comparadores foram “zerados” e procedeu-se ao ensaio.

Por se tratar de um número grande de relógios, para a fase de teste foram necessárias cerca de 06 pessoas para auxiliar nos trabalhos.

Inicialmente, aplicou-se sobre a estrutura um carregamento até o nível correspondente à carga de projeto, incluindo o carregamento no beiral, e fez-se o registro dos deslocamentos apresentados nos relógios comparadores. Em seguida, a carga foi aliviada e os relógios foram zerados.

Depois, aplicou-se um segundo carregamento. Contudo, desta vez, sem a aplicação de carga nos beirais. Os deslocamentos foram lidos a cada nível de aplicação de carga até um valor de segurança para não danificar os relógios nem proporcionar perigo aos presentes.

Por fim, foi conduzida a aplicação de carga até a ruptura da estrutura ensaiada e registrou-se a carga última apontada pelo equipamento de leitura das células de carga. Tal procedimento foi repetido para as 05 estruturas construídas. Na Figura 18 apresenta-se uma ilustração da posição dos instrumentos utilizados.



Figura 18 - Esquema de montagem do aparato de teste.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização e classificação das peças de madeira

Além da caracterização mecânica da madeira, realizada por Wei (2017) e Peixoto (2017), foi realizada a caracterização de algumas propriedades de adesão da madeira com o adesivo bi componente adotado nesta pesquisa. Ao todo foram produzidos 116 corpos de prova sendo 68 colados com fibras paralelas e 48 colados com fibras perpendiculares entre si. De cada um destes dois grupos metade foi preparada para ensaio à compressão e metade para ensaio à torção. Na Tabela 4 os resultados estão apresentados comparativamente aos encontrados por Couri Petruski (2012).

Tabela 4 - Propriedades de adesão médios da madeira de *Araucaria angustifolia* colada com adesivo bicomponente à base de óleos vegetais, comparados aos obtidos por Couri Petruski (2012), efetuados com *Lyptus*

| Ensaio            | Ângulo<br>(graus) | Esta Pesquisa |                   |               | Couri Petruski (2012) |               |
|-------------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-----------------------|---------------|
|                   |                   | Nº de CP      | Resistência (MPa) | Desvio Padrão | Resistência (MPa)     | Desvio Padrão |
| f <sub>v0</sub>   | 0                 | 34            | 10,99             | 1,37(12,46)   | 13,05                 | 1,22(9,35)    |
| f <sub>v90</sub>  | 90                | 24            | 4,09              | 1,02(24,94)   | 5,66                  | 0,77(13,6)    |
| t <sub>vt0</sub>  | 0                 | 34            | 10,60             | 2,16(20,38)   | 9,77                  | 1,45(14,84)   |
| t <sub>vt90</sub> | 90                | 24            | 8,51              | 1,94(22,8)    | 8,20                  | 1,06(12,93)   |

Percebe-se que os resultados obtidos seguem a mesma tendência dos obtidos por Couri Petruski (2012). Contudo, a pesquisadora trabalhou com Eucalipto e, ainda, o adesivo à época tinha base no óleo de mamona, o que atualmente não é mais uma realidade. Nos dois casos porém, a ordem de resistências foi a mesma. As maiores resistências foram observadas para colagens a 0° e nos ensaios que conduziram a ruptura por compressão (ensaio normalizado). Observa-se que para colagens à 90° os melhores desempenhos ocorrem para ensaios à torção. Os coeficientes de variação obtidos pela pesquisadora foram menores que os obtidos nesta pesquisa. Ainda, as menores variabilidades ocorreram nos ensaios com colagens a 90° entre as fibras. Por fim, o Eucalipto gerou maior resistência nos ensaios com ruptura por compressão e a Araucária naqueles ensaios com ruptura por torção.

Posteriormente, estes resultados permitiram calcular as resistências características, as quais foram usadas no dimensionamento/verificação dos pórticos. Resumidamente, foram encontrados os seguintes valores:

- resistência característica ao cisalhamento na compressão com juntas coladas à  $0^\circ$ ,  $f_{v0,k} = 9,98$  MPa;
- resistência característica ao cisalhamento na compressão com juntas coladas à  $90^\circ$ ,  $f_{v90,k} = 3,03$  MPa;
- resistência característica ao cisalhamento na torção com juntas coladas à  $0^\circ$ ,  $f_{vt0,k} = 7,58$  MPa;
- resistência característica ao cisalhamento na torção com juntas coladas à  $90^\circ$ ,  $f_{vt0,k} = 5,96$  MPa;

Estes valores foram os utilizados na equação 2 para verificações das ligações.

Todas as mais de 240 lâminas pré-processadas para uso na execução dos pórticos, separadas por posição na estrutura, foram ordenadas por sua densidade média. Assim, optou-se por produzir os pórticos com a seguinte ideia: utilizar-se as lâminas mais densas e menos densas para produzir uma unidade com madeira de maior densidade e uma unidade com madeira de menor densidade. As outras três unidades executadas foram feitas com densidades intermediárias com lâminas escolhidas aleatoriamente. Desta forma, após execução, as estruturas foram pesadas, encontrando-se as massas indicadas a seguir.

Os pórticos foram separados no ensaio seguindo a seguinte ordem:

- Pórtico 01: madeira menos densa (27,20 kg) – Ensaio 01
- Pórtico 02: madeira mais densa (31,80 kg) – Ensaio 02
- Pórticos 03: madeira com classe de densidade média (29,2 kg) – Ensaio 03
- Pórticos 04: madeira com classe de densidade média (29,5 kg) – Ensaio 04
- Pórticos 05: madeira com classe de densidade média (29,7 kg) – Ensaio 05

## **4.2 Resistência apresentada pelas estruturas**

Para a determinação da resistência das estruturas todos os pórticos foram testados até a ruptura. Isto ocorreu na segunda fase de carregamento para cargas crescentes aplicadas apenas pelos 3 cilindros hidráulicos.

Na Tabela 5 apresenta-se, para cada pórtico, um resumo das informações relacionadas à resistência

**Tabela 5 - Desempenho das estruturas testadas, em termos de resistência**

| <b>Pórtico</b> | <b>Massa<br/>(kg)</b> | <b>Local de<br/>Ruptura</b> | <b>Carga de<br/>Ruptura<br/>(kN)</b> | <b>Carga de<br/>Projeto<br/>(kN)</b> | <b>Quociente entre<br/>carga de ruptura e<br/>carga de projeto</b> |
|----------------|-----------------------|-----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--|
| Pórtico 01     | 27,2                  | Nós C e E                   | 25,21                                | 6,946                                | 3,63   |
| Pórtico 02     | 31,8                  | Nós C e E                   | 34,60                                | 6,946                                | 4,98   |
| Pórtico 03     | 29,2                  | Nó C                        | 24,37                                | 6,946                                | 3,51   |
| Pórtico 04     | 29,5                  | Nós C e E                   | 31,24                                | 6,946                                | 4,50   |
| Pórtico 05     | 29,7                  | Nó C                        | 28,52                                | 6,946                                | 4,11   |
| Média          | 29,48                 | -                           | 28,79                                | 6,946                                | 4,14   |

Conforme está apresentado na Tabela 5, todas as cinco estruturas apresentaram ruptura em, pelo menos, um dos lados e na ligação rígida, nó C. Destas, três apresentaram também rupturas na articulação da cumeeira, nó E. Durante os ensaios, nos instantes finais, percebeu-se em todos os casos, o som característico das fraturas. Ainda, considerando-se os elevados deslocamentos verticais observados no ponto central, parecia, de fato, que as lâminas da cumeeira poderiam romper-se. É muito difícil, contudo, afirmar se a primeira ruptura teve início na ligação rígida colada ou na cumeeira. Isto se deve ao fato observado de que, no instante final da ruína, a ruptura é brusca com liberação imediata da energia acumulada.

Um indicativo interessante é o quociente entre a carga de ruptura e a carga considerada para o projeto das estruturas. Neste caso, obteve-se um quociente médio da ordem de 4,14. Tal valor dá uma ideia aproximada da segurança das estruturas. Neste experimento, este valor parece indicar uma adequação aos critérios gerais de segurança estabelecidos para o Estado Limite Último conforme estabelece a NBR 7190:97. Ainda, Couri Petruski (2012), por exemplo, obteve esta relação média da ordem de 4,43 para as duas unidades de pórticos colados com o adesivo de mamona. A média encontrada pela pesquisadora para as três estruturas coladas com resina resorcinol formaldeído foi de 4,63.

No experimento conduzido por Couri Petruski (2012) todas as unidades também romperam nas ligações rígidas. Neste experimento, de forma similar, as rupturas nestas ligações ocorreram provavelmente associadas à tração

perpendicular às fibras. Isto era esperado uma vez que o momento fletor gerado era de grande magnitude e impunha, na face externa elevada tração.

As Figuras a seguir ilustram as rupturas observadas.



Figura 19 - Detalhe de Ruptura nos nós C e E na estrutura do ensaio 01, pórtico 01



Figura 20 - Detalhe de Ruptura nos nós C e E na estrutura do ensaio 02, pórtico 02





Figura 21 - Detalhe de Ruptura no nó C na estrutura do ensaio 03, pórtico 03

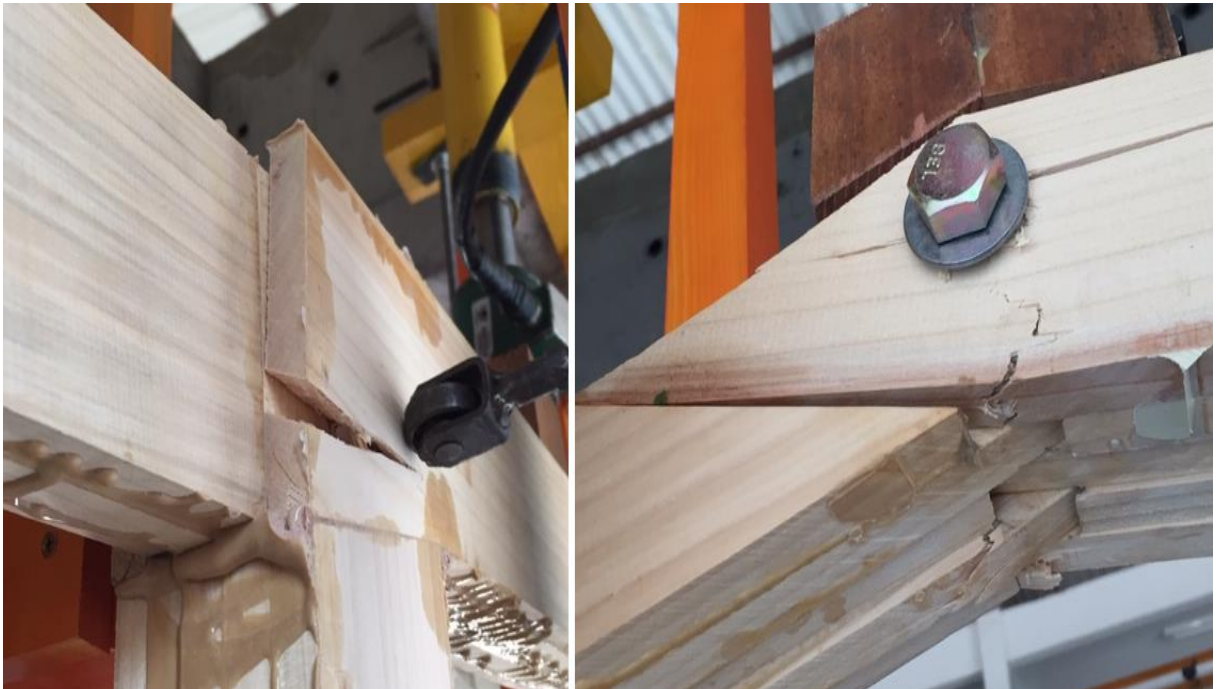


Figura 22 - Detalhe de Ruptura nos nós C e E na estrutura do ensaio 04, pórtico 04



Figura 23 - Detalhe de Ruptura no nó C na estrutura do ensaio 05, pórtico 05

Em algumas das figuras apresentadas acima, ficou evidente a posição de disposição dos rolamentos utilizados como contraventamento na região da ligação rígida. Perceba-se que tais rolamentos foram dispostos na horizontal. Como se sabia, nestes pontos, a deformada esperada era a de um deslocamento horizontal. Acredita-se, então, que esta disposição foi a mais adequada.

### 4.3 Rigidez apresentada pelas estruturas

O deslocamento da estrutura sob ação do carregamento foi acompanhado por seis relógios comparadores instalados em pontos específicos do pórtico, priorizando-se os pontos que simulados no Ftool apresentaram os maiores níveis de deformação. Isto é ilustrado nas Figuras 24 e 25 a seguir.

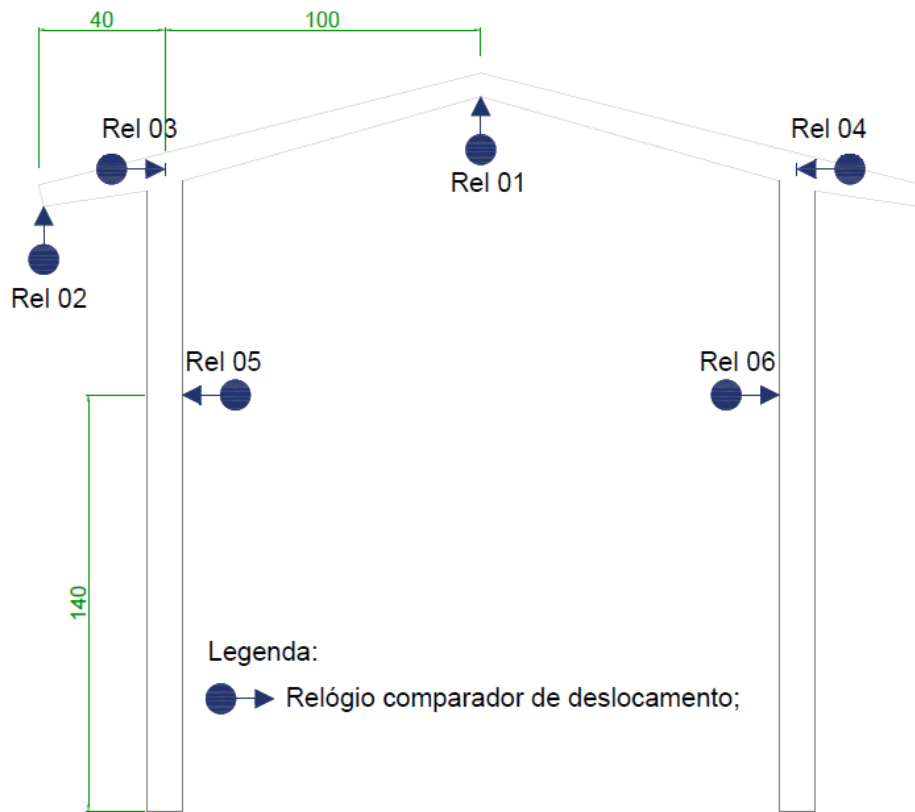


Figura 24 - Esquema de instalação dos relógios comparadores

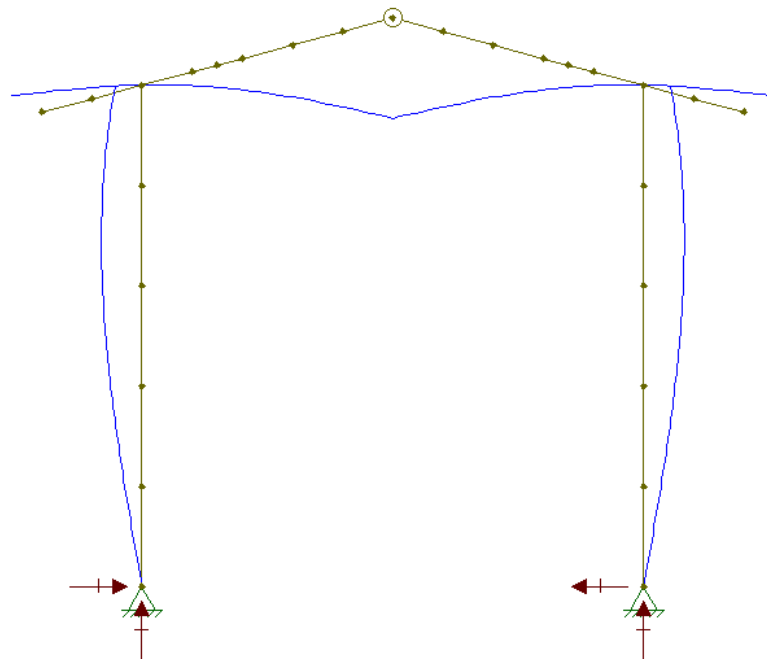


Figura 25 - Exemplo de deformação encontrada no Ftool para certo carregamento

Numa primeira fase dos testes individuais aplicou-se a carga de projeto, incluindo-se cargas nos beirais, por meio de bandejas, como ilustrado na Figura 26.

A aplicação desta carga foi dividida em uma marcha de 5 acréscimos proporcionais até atingir-se as forças indicadas entre parênteses na Figura.

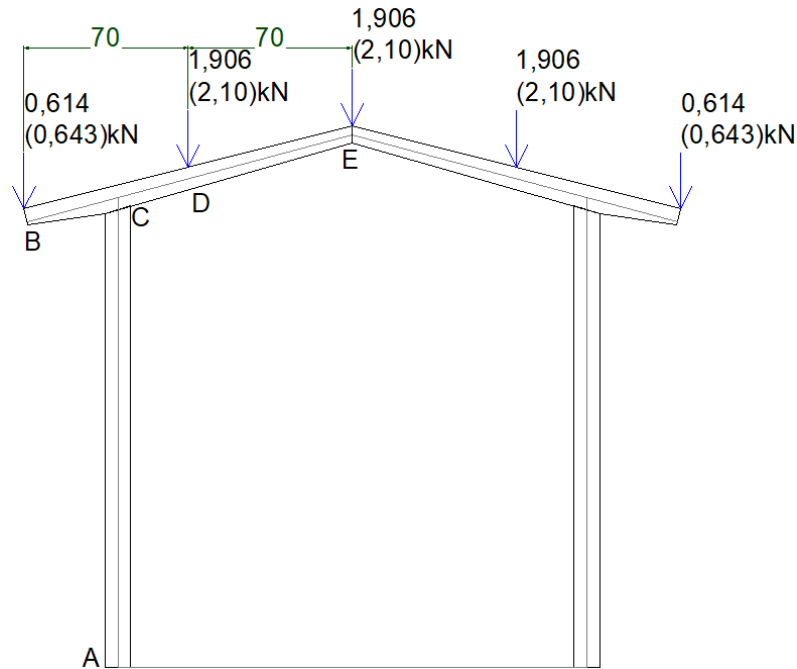


Figura 26 - Carga de projeto do pórtico em escala reduzida, sendo que os valores entre parênteses equivalem à máxima carga aplicada na primeira fase

Para cada acréscimo de carga foram feitas as leituras dos deslocamentos apontados nos relógios. Na Tabela 6 estão apresentados os valores finais apresentados para o último nível de forças. No caso dos relógios 3, 4, 5 e 6, são apresentadas as médias.

Perceba-se na Tabela 6 que o relógio da cumeeira, nó C, indicou uma média de deslocamento vertical, para a carga de projeto, de praticamente 7 milímetros. O critério de rigidez adotado neste caso, foi o de admitir uma flecha máxima neste ponto igual à razão  $L/200$ , aplicável à estruturas correntes, inclusas as construções rurais desta natureza. Então, dado que o vão era de 200 cm, poderia ser admitida uma flecha de até 10 milímetros. Como consequência, esta evidência indicou um comportamento satisfatório para os pórticos.

Nota-se, também, que os pórticos feitos com as madeiras de menor e maior densidades, respectivamente, pórticos 1 e 2, responderam, como esperado, pelas maior e menor flechas.

Tabela 6 - Deslocamentos finais após a aplicação da carga de 7,586 kN

| Estrutura de Ensaio | REL 1 | REL 2 | REL 3 e 4  | REL 5 e 6  |
|---------------------|-------|-------|------------|------------|
|                     | (mm)  | (mm)  | Média (mm) | Média (mm) |
| Ensaio 01-P1        | 7,29  | 1,46  | 2,20       | 2,34       |
| Ensaio 02-P2        | 6,52  | 1,15  | 1,85       | 2,61       |
| Ensaio 03-P3        | 6,78  | 1,26  | 1,94       | 2,61       |
| Ensaio 04-P4        | 7,14  | 1,15  | 2,14       | 2,94       |
| Ensaio 05-P5        | 6,78  | 1,07  | 1,56       | 2,44       |
| Média               | 6,90  | 1,22  | 1,94       | 2,59       |

O ensaio dos pórticos teve resultado similar aos encontrados nas simulações computacionais feitas por meio do programa Ftool. Isto pode ser visto na Figura 27 na qual são plotadas as deformadas médias obtidas e estimadas pelo programa.

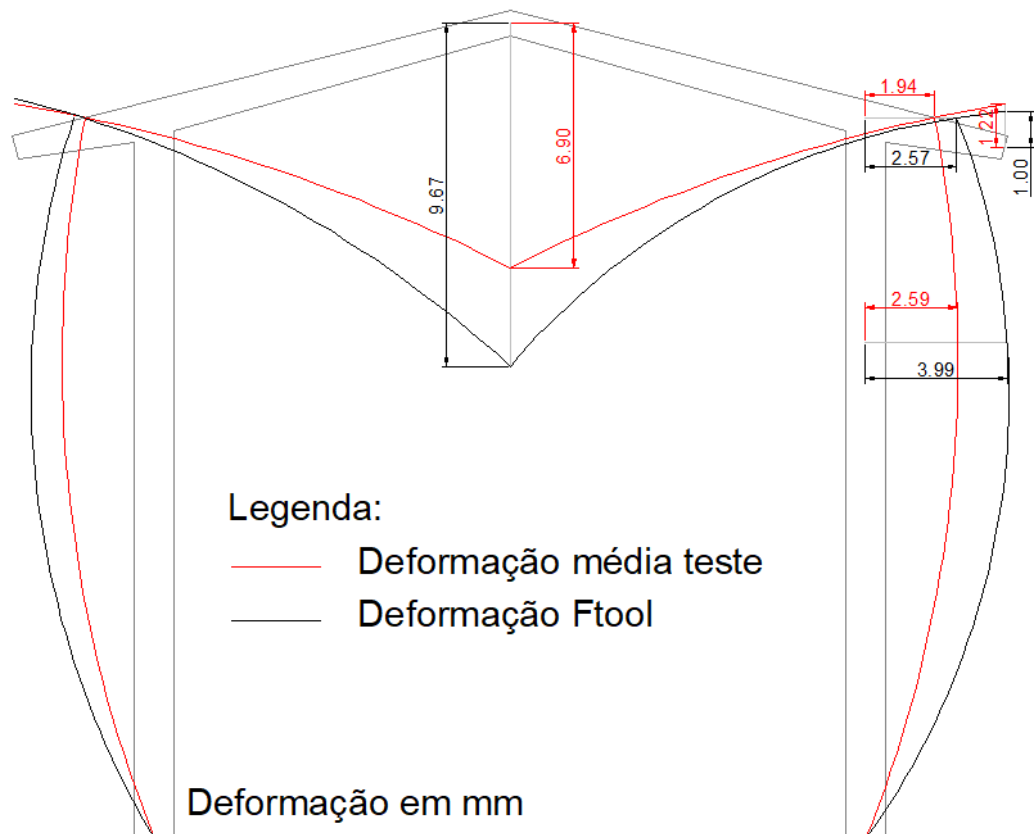


Figura 27 - Comparativo da média da deformada do teste e da deformação no Ftool, para um carregamento total de 7,586 kN

Perceba-se na Figura 27 que os resultados estimados pelo programa Ftool foram sempre maiores dos que os deslocamentos experimentais, exceto para a extremidade do beiral. Isto se deu provavelmente porque no Ftool foram implementadas perdas de inércia abruptas. Na realidade a perda de inércia foi gradual.

Os resultados obtidos nessa fase indicaram um comportamento linear no diagrama força x deformação, conforme se apresenta nos gráficos representados pelas Figuras 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34 e 35.

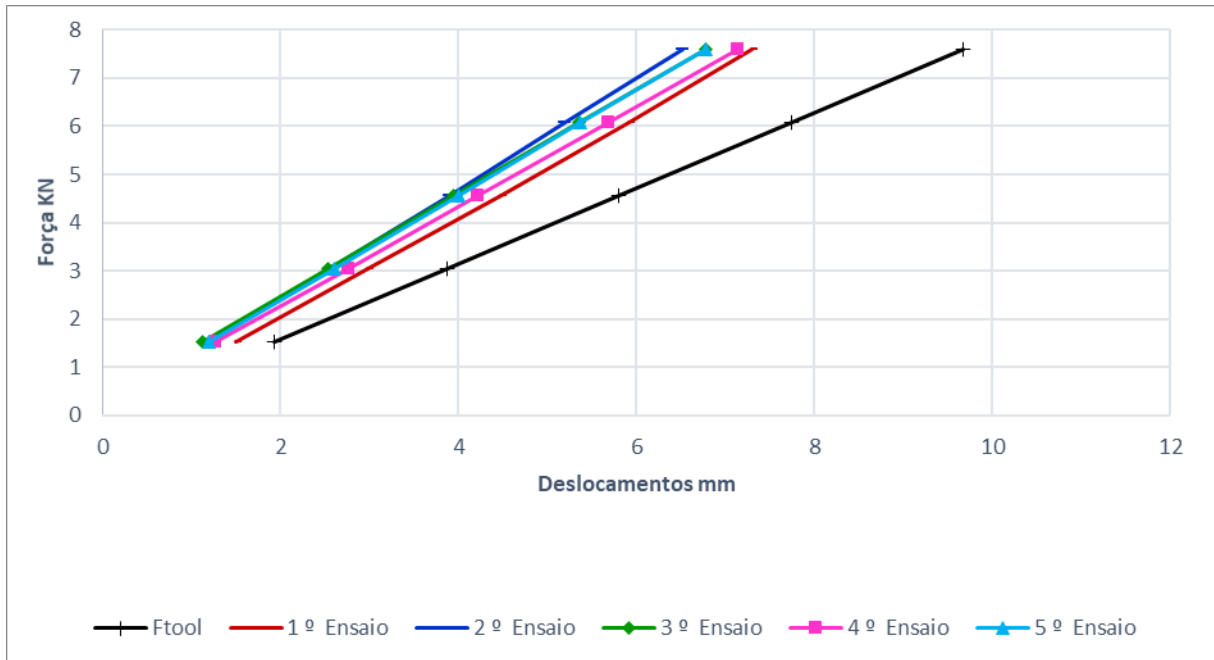


Figura 28 - Diagrama Carga x Deslocamento apresentado pelo relógio 01, cumeeira

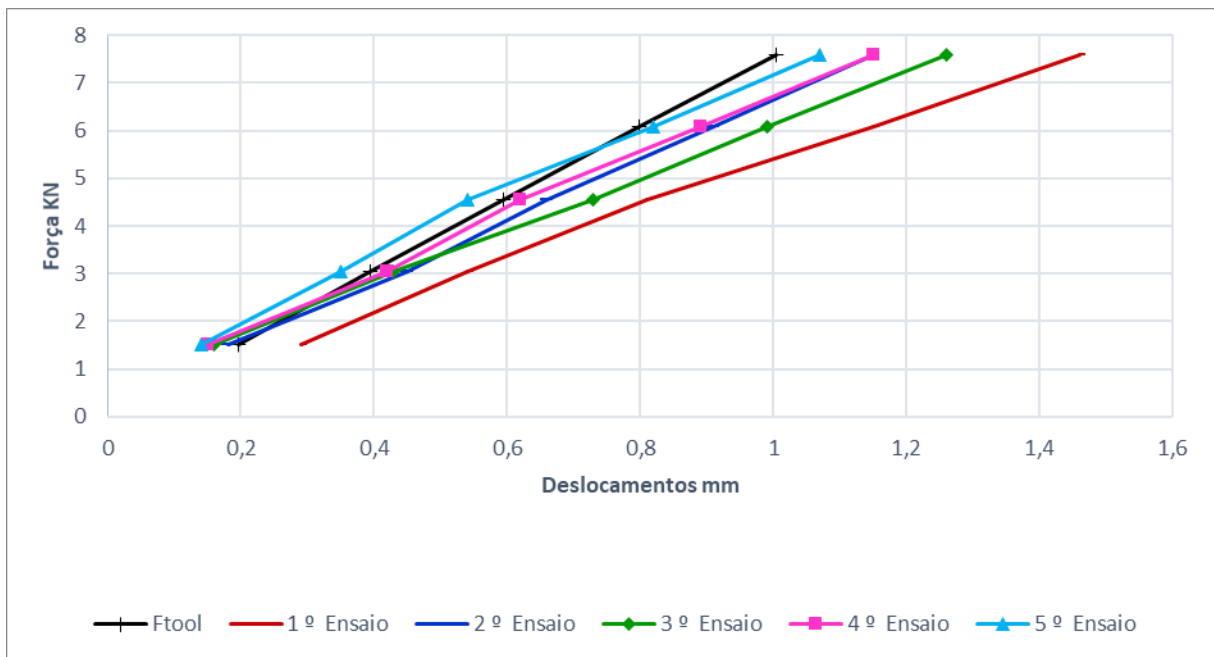


Figura 29 - Diagrama Carga x Deslocamento apresentado pelo relógio 02, beiral

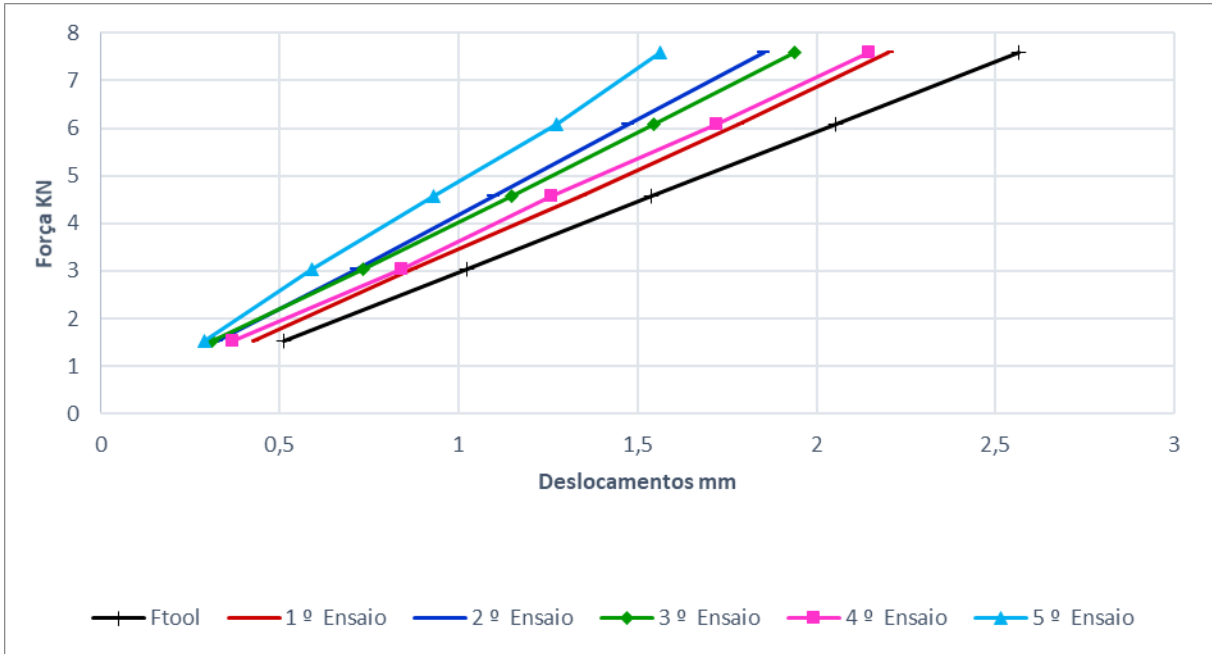


Figura 30 - Diagrama Carga x Deslocamento apresentado pelos relógios 03 e 04, ligação

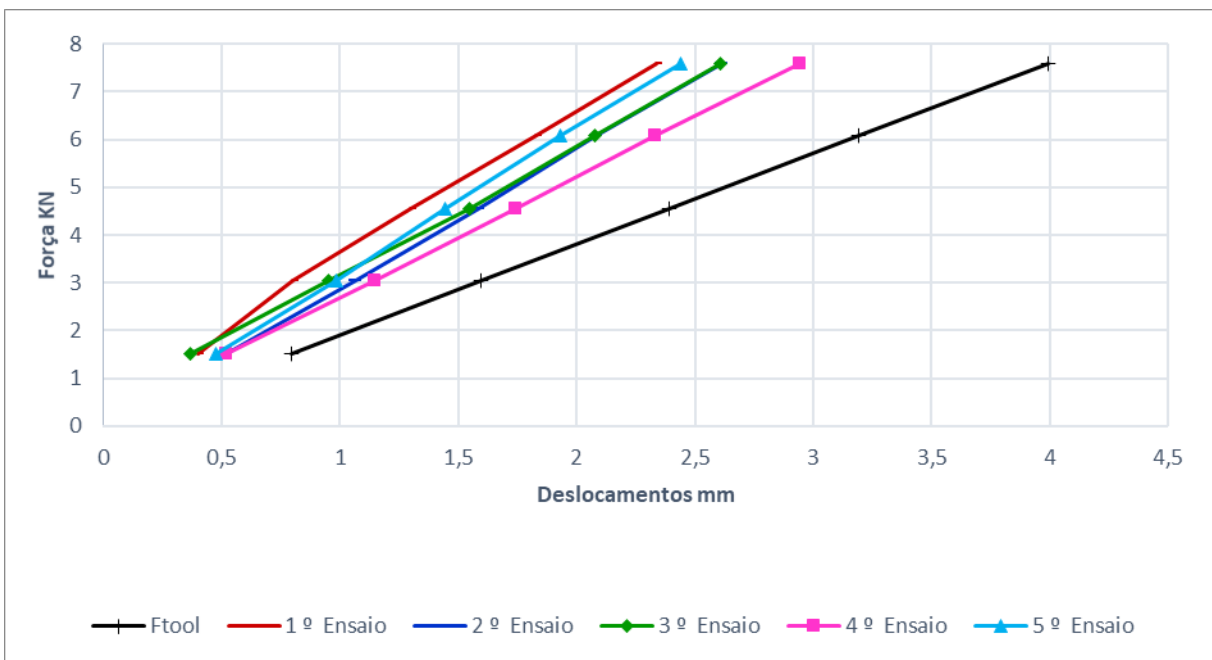


Figura 31 - Diagrama Carga x Deslocamento apresentado pelos relógios 05 e 06, vão do pilar

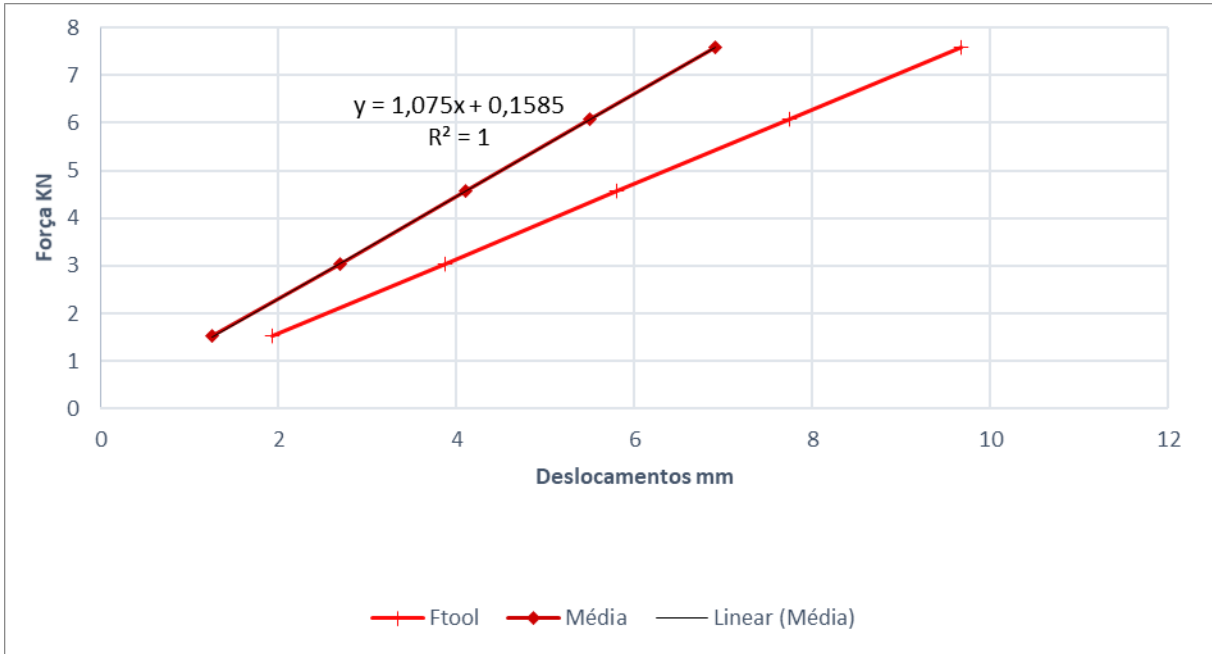


Figura 32 - Médias do Diagrama Carga x Deslocamento apresentado pelo relógio 01, cumeeira

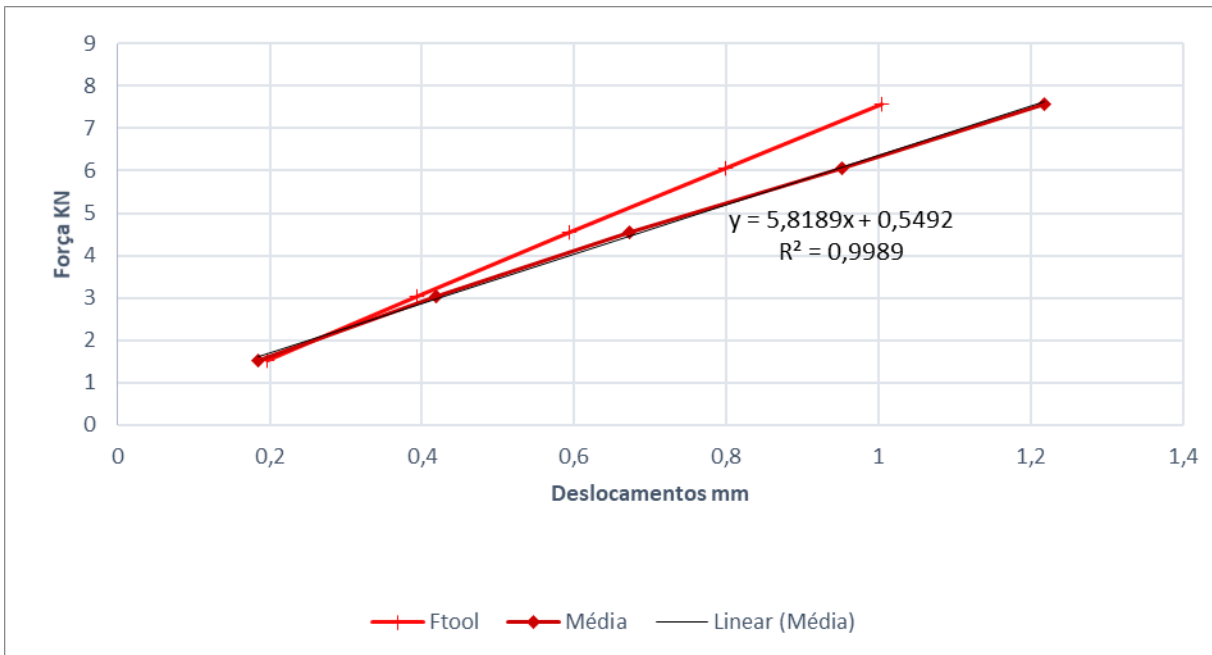


Figura 33 - Médias Diagrama Carga x Deslocamento apresentado pelo relógio 02, beiral



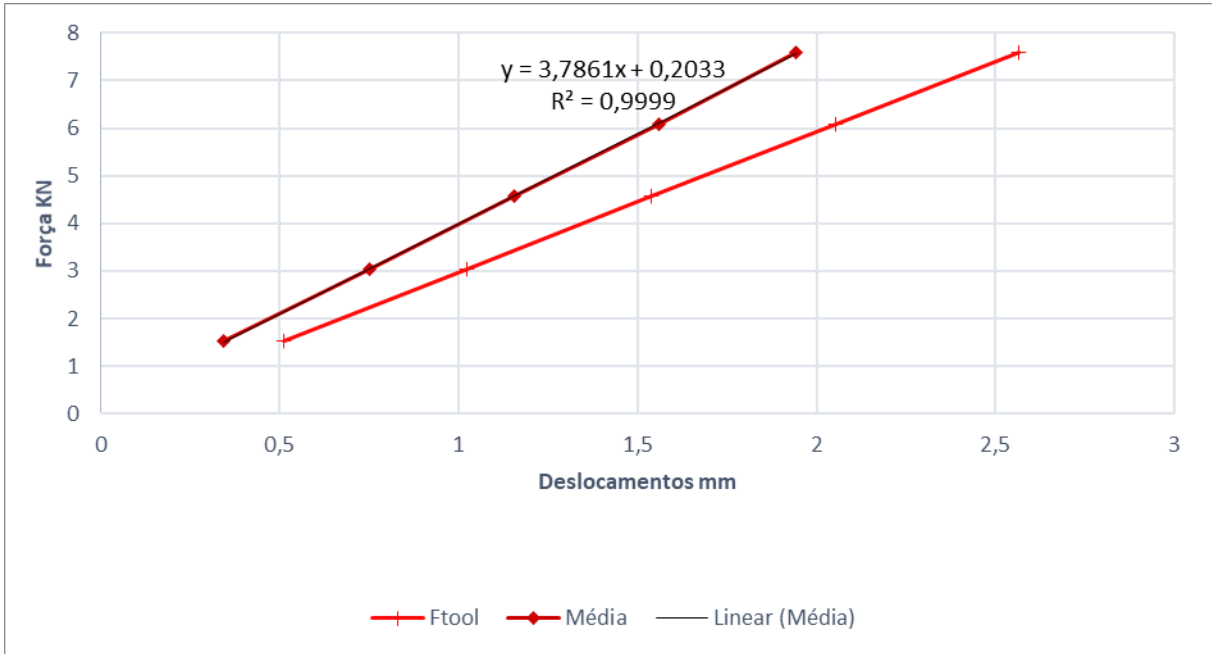


Figura 34 - Médias Diagrama Carga x Deslocamento apresentado pelos relógios 03 e 04, ligação

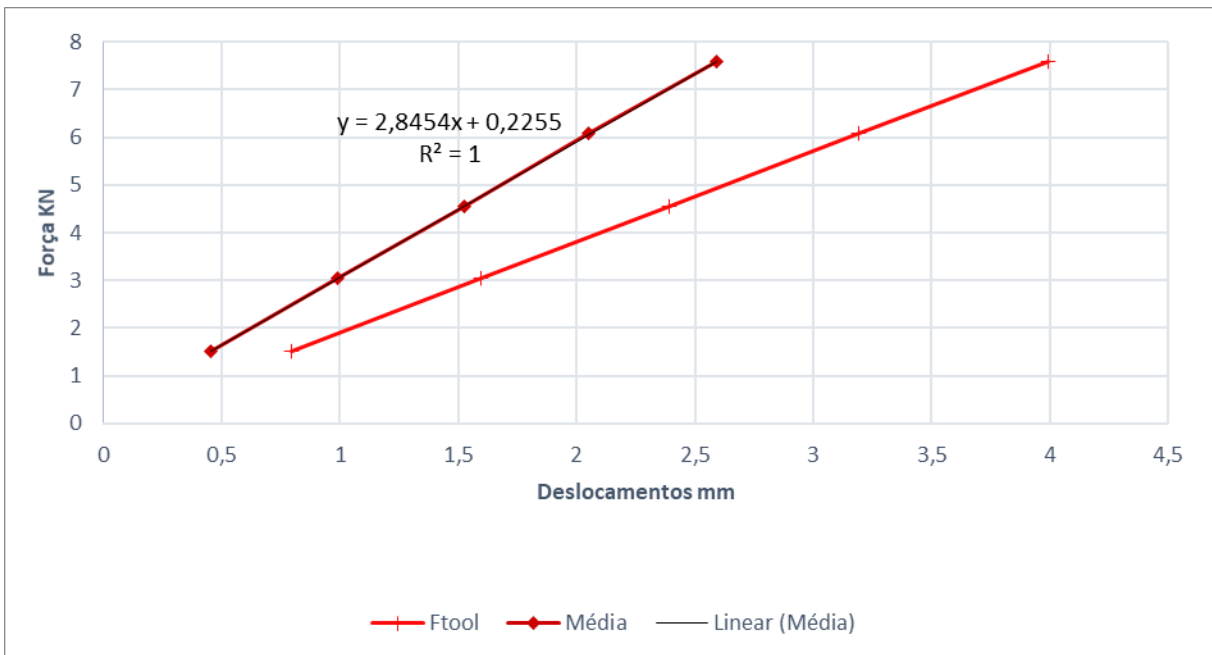


Figura 35 - Médias Diagrama Carga x Deslocamento apresentado pelos relógios 05 e 06, vão do pilar

Após a aplicação da carga de projeto, retirou-se a carga das bandejas, incidentes nos beirais, zerou-se toda a carga aplicada no pórtico e começou-se nova fase de ensaio, aplicando cargas verticais até a ruptura das estruturas. Nesta última

fase, foram aplicadas cargas crescentes por meio de três cilindros hidráulicos dispostos na região interna da cobertura dos pórticos.

Os resultados novamente indicaram similaridade com o encontrado nas simulações computacionais através do programa Ftool. Contudo, as estimativas geradas pelo programa foram, mais pessimistas do que as encontradas, inclusive no beiral. O comportamento nos diagramas carga x deslocamento pode ser considerado linear para os níveis de cargas acompanhados. Estas evidências podem ser observadas nos gráficos representados nas Figuras 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42 e 43.

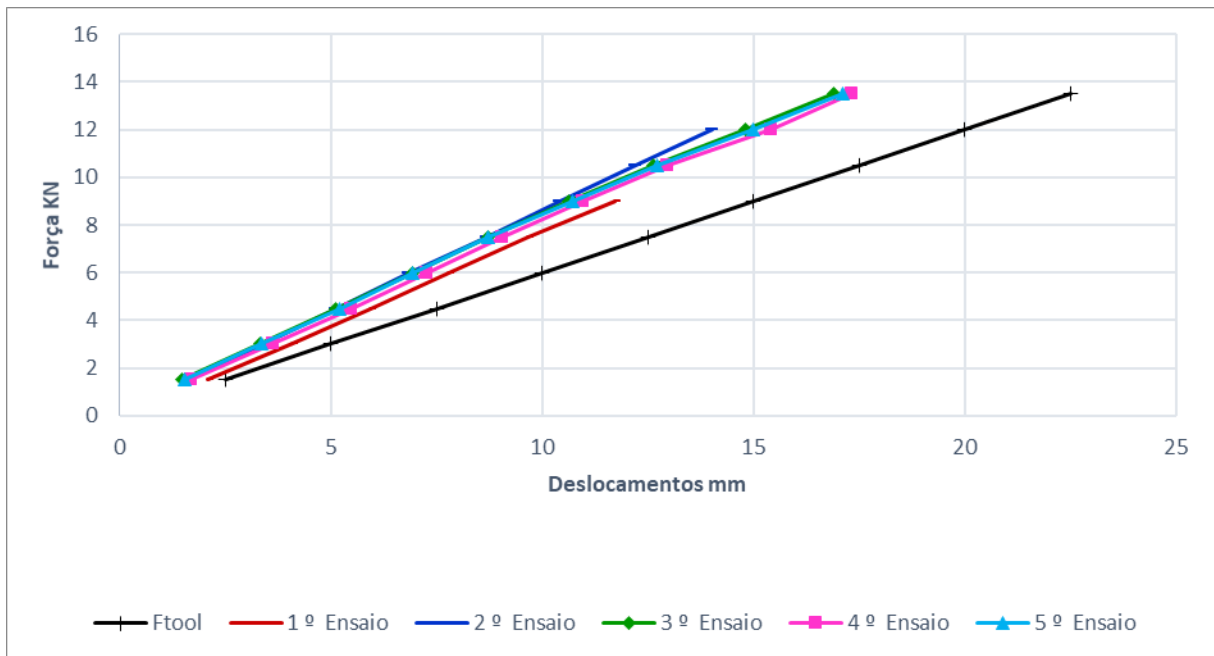


Figura 36 - Diagrama Carga x Deslocamento apresentado pelo relógio 01, cumeeira

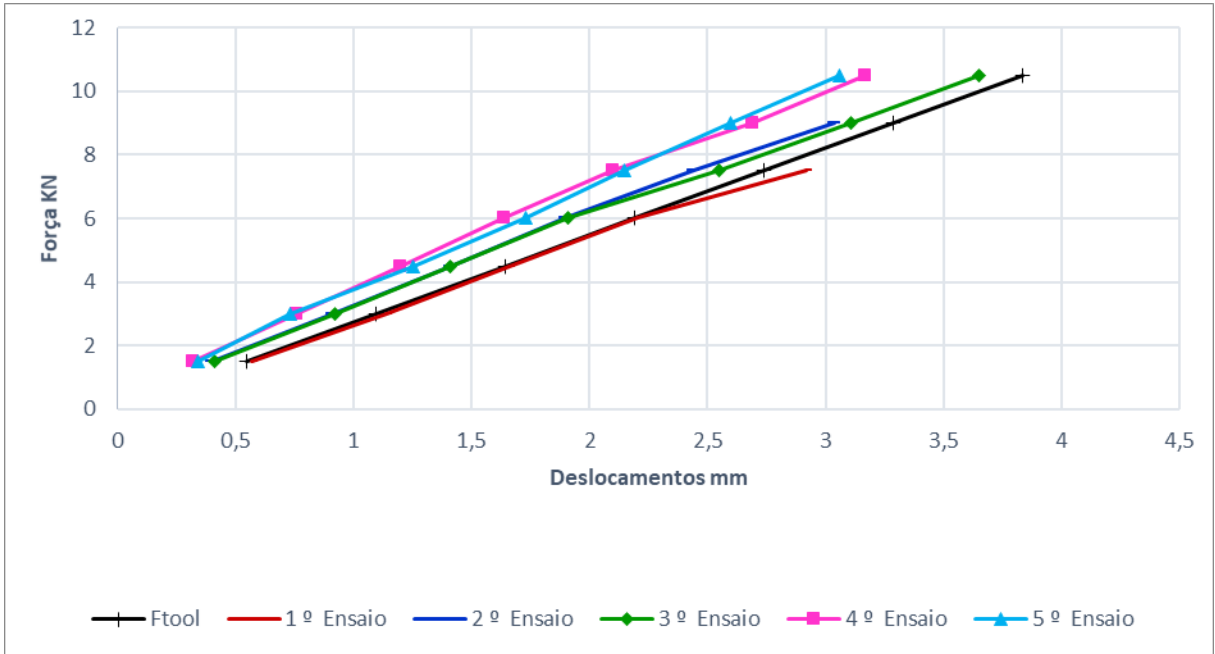


Figura 37 - Diagrama Carga x Deslocamento apresentado pelo relógio 02, beiral

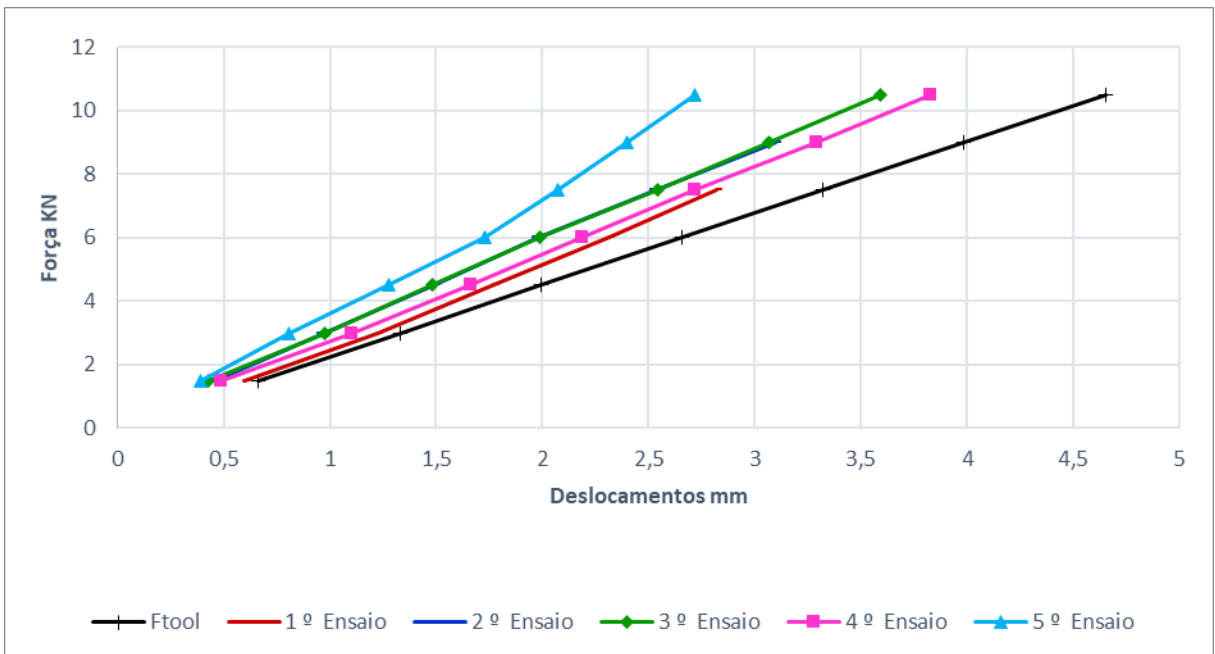


Figura 38 - Diagrama Carga x Deslocamento apresentado pelos relógios 03 e 04, ligação

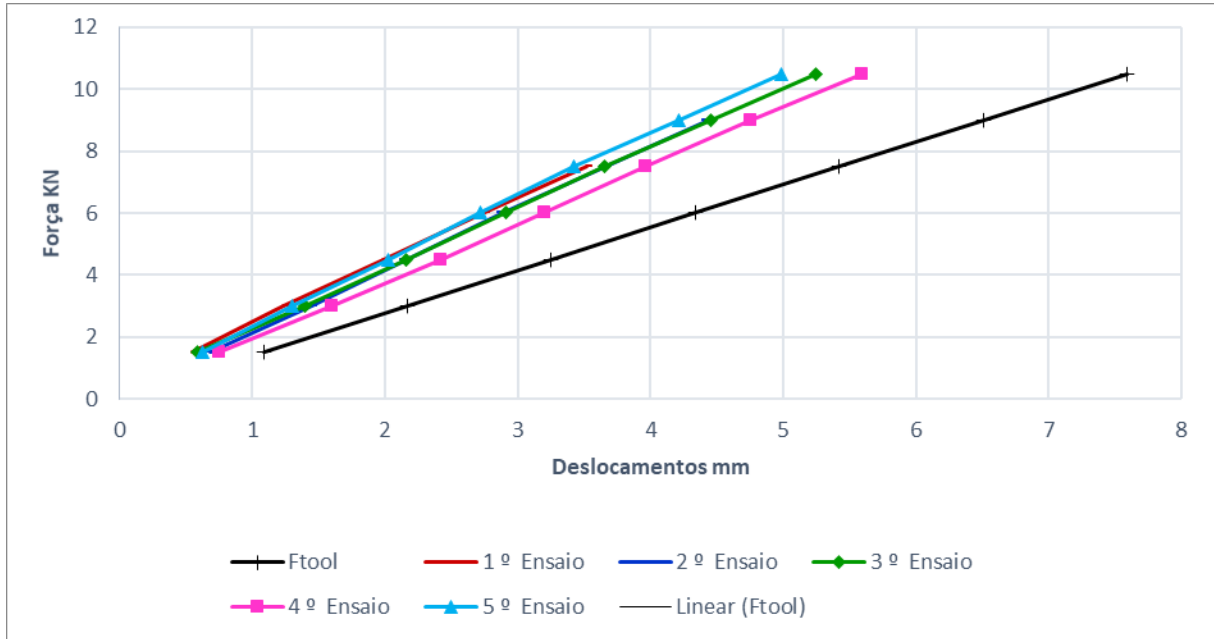


Figura 39 - Diagrama Carga x Deslocamento apresentado pelos relógios 05 e 06, vão do pilar

O comportamento linear da deformação de estruturas feitas inteiramente coladas já fora observado anteriormente por Couri Petrauski (1999; 2012) e Petrauski (2000). Os pesquisadores evidenciaram o potencial da técnica para uso em estruturas.

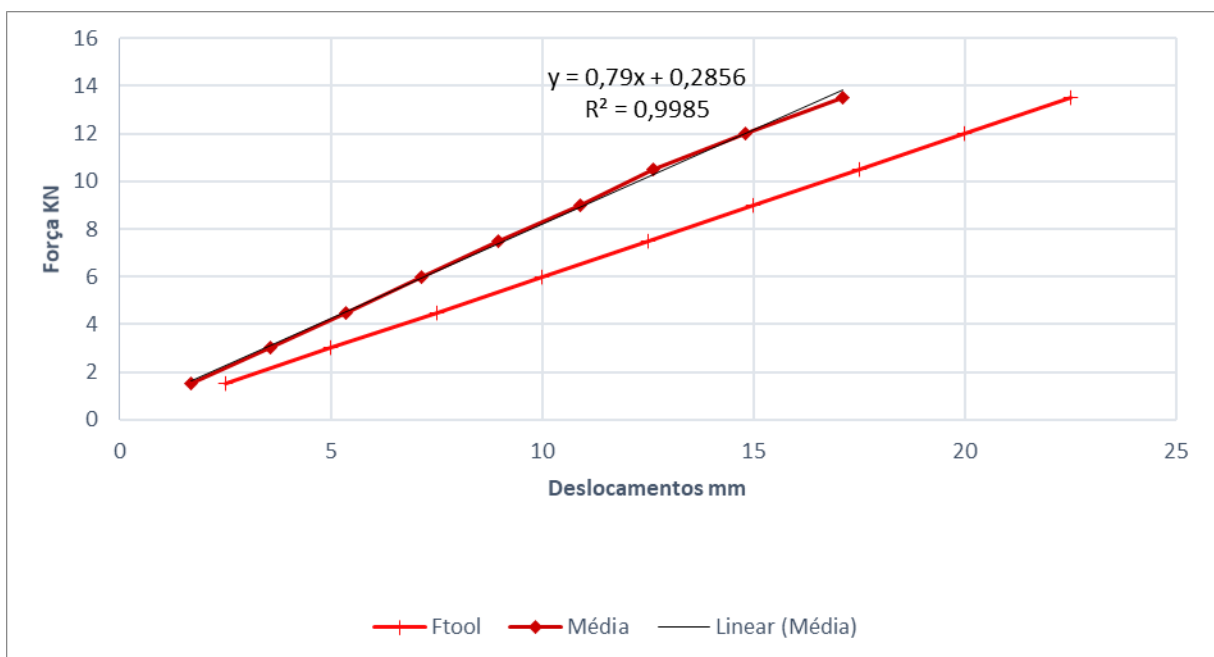


Figura 40 - Médias Diagrama Carga x Deslocamento apresentado pelo relógio 01, cumeeira

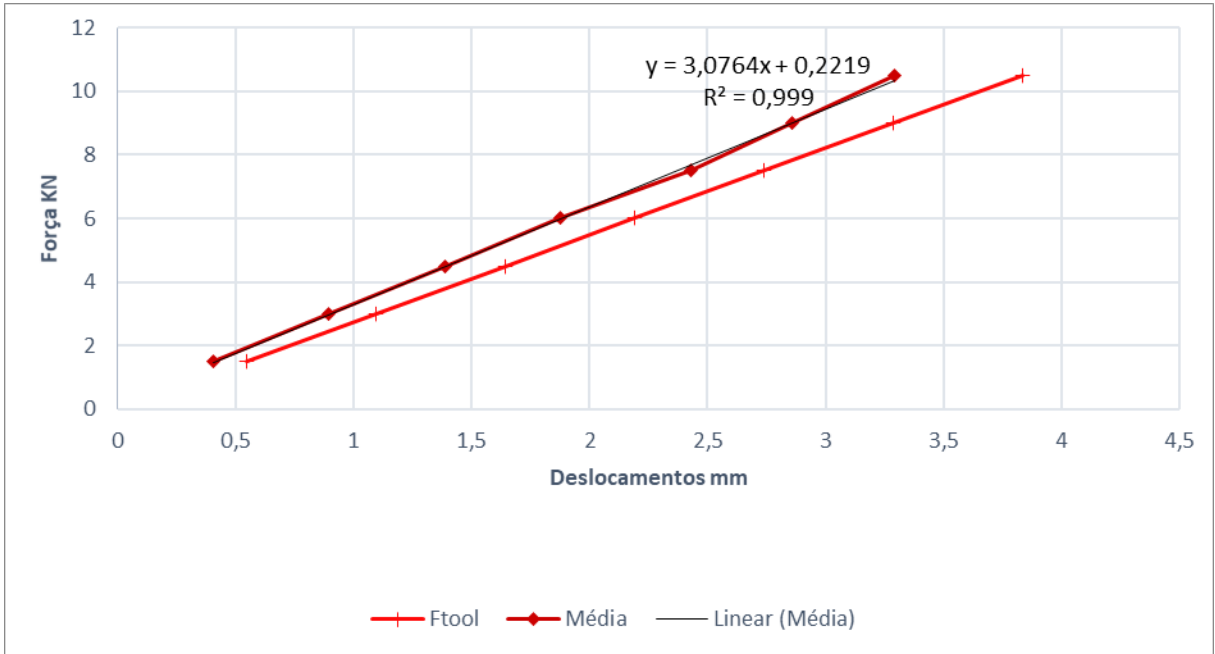


Figura 41 - Médias Diagrama Carga x Deslocamento apresentado pelo relógio 02, beiral

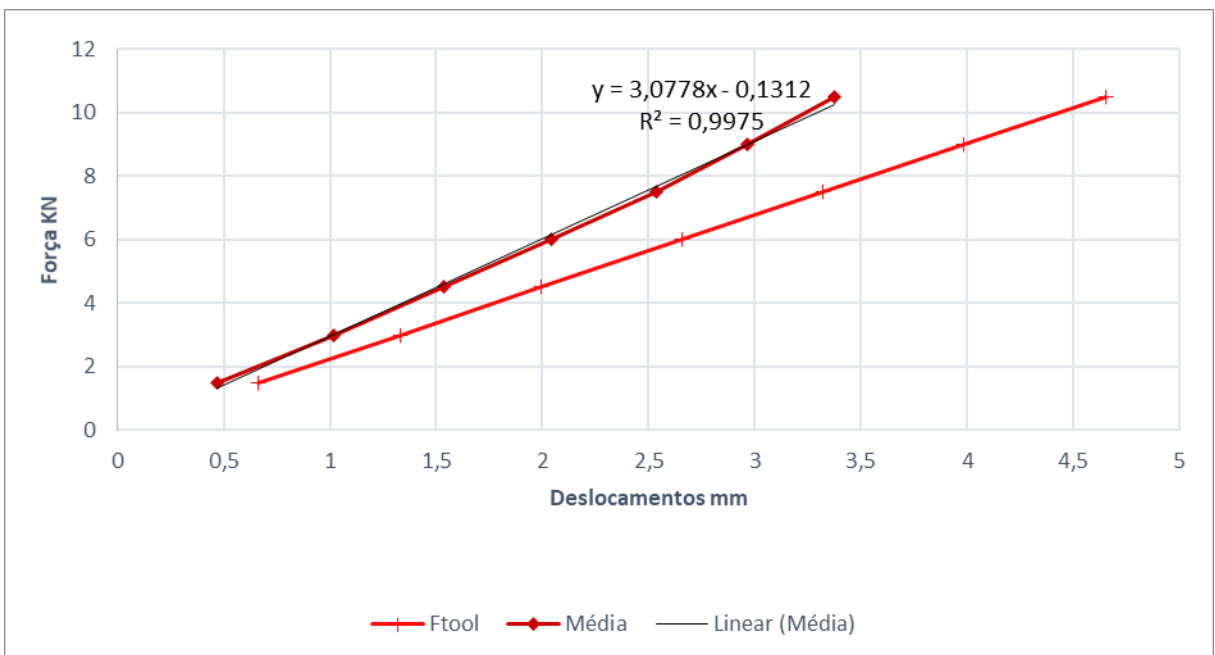


Figura 42 - Médias Diagrama Carga x Deslocamento apresentado pelos relógios 03 e 04, ligação

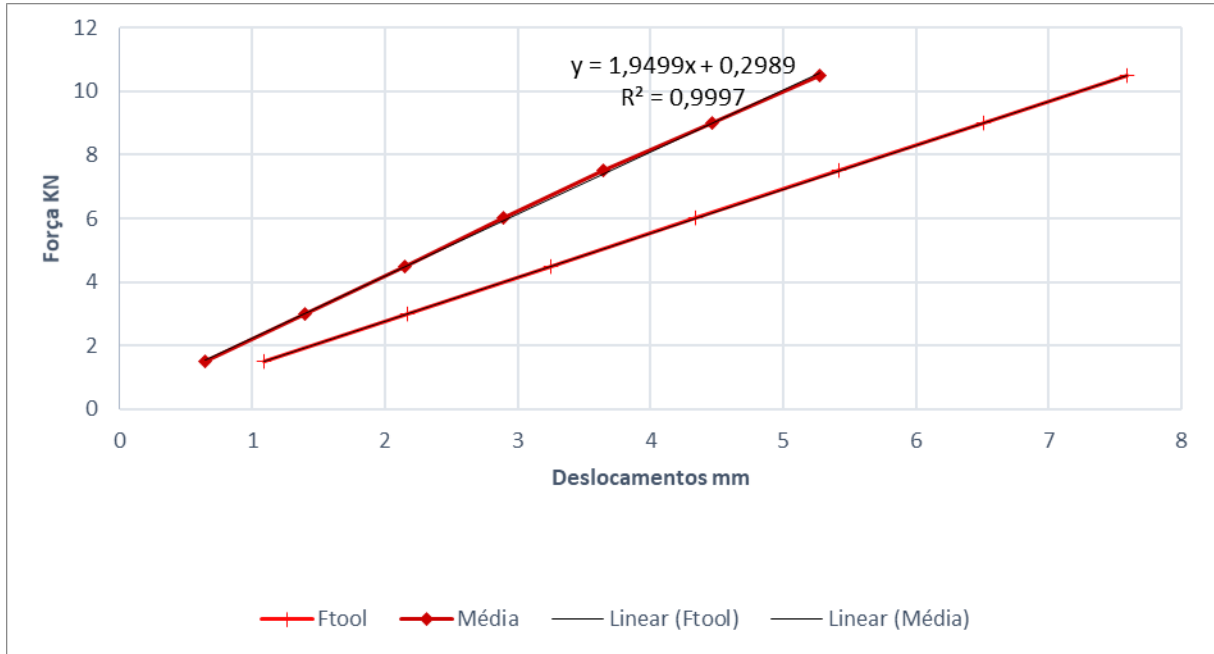


Figura 43 - Médias Diagrama Carga x Deslocamento apresentado pelos relógios 05 e 06, vão do pilar

## 5. CONCLUSÃO

A partir dos resultados apresentados sobre a viabilidade da construção de pórticos inteiramente colados em *Araucaria angustifolia* utilizando adesivo à base de óleos vegetais, pode-se concluir que, dentro de um processo controlado, esses materiais podem produzir estruturas com ligações satisfatórias no que diz respeito ao desempenho de resistência e rigidez.

Os resultados obtidos indicaram um comportamento linear no diagrama força x deformação, mesmo para os mais elevados níveis de carga observados.

As rupturas ocorreram, como esperado, nas ligações rígidas, uma vez que foram o lugar de maiores solicitações e, na fase de projeto, conduziram o dimensionamento/verificações.

Vale ressaltar que o adesivo a base de óleos vegetais apresentou um comportamento estrutural bastante satisfatório, aliado ao uso da metodologia proposta por Couri Petruski (2012) para verificação das ligações coladas.

A técnica proposta para a feitura dos pórticos parece ser uma excelente opção para ser utilizada na prática em aviários de postura, apresentando bons níveis de segurança e confiabilidade estrutural.

Com base nos estudos e conclusões deste trabalho, recomenda-se:

- Avaliar o potencial econômico do uso de pórticos de madeira laminada colada em substituição dos construídos em concreto armado e estrutura metálica na região oeste do Paraná.
- Ampliar a base de informações sobre as possibilidades de utilização do adesivo à base de óleos vegetais na feitura de estruturas de madeira laminada colada.

## 6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6120 - Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 1980. 5p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6123 - Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro, 1988. 66p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7190 - Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 1997. 107p.

AB'SABER, A. N. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.

ALMEIDA, V. C. **Efeito da adição de carga e extensor nas propriedades do adesivo uréia-formaldeído e dos compensados de pinus e paricá**. 2009. 86 f. Dissertação (Mestrado em Manejo Florestal; Meio Ambiente e Conservação da Natureza; Silvicultura; Tecnologia e Utilização de) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D-905**: Standard test for strenght properties of adhesive bonds in shear by compression loading. West Conshohocken, PA, 1994. 5p.

BALTIERI, D. A aspiração involuntária de solventes no ambiente de trabalho está me afetando? **Saúde e Bem-estar**, 2016. Disponível em: <https://www.vyaestelar.com.br/post/4689/a-aspiracao-involuntaria-de-solventes-no-ambiente-de-trabalho-esta-me-afetando> Acesso em: 20 jul. 2018.

BIANCHE, J. J.; TEIXEIRA, A. P. M.; LADEIRA, J. P. S.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, R. V. O., LUCIA, R. M. D.; **Cisalhamento na Linha de Cola de Eucalyptus sp. Colado com Diferentes Adesivos e Diferentes Gramaturas**. Floresta Ambient., Seropédica, v. 24, e00077114, 2017.

BLACHÉRE, Gérard – **Técnicas de la Construcción Industrializada**, trad. Jesús Martin. - Barcelona: Gustavo Gili, 1977

BREGINSKI, H. D. B. **Qualidade do ar: estudo sobre a presença de formaldeído**. 2015. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Área de Concentração Ambiente Construído e Gestão, Departamento de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR.

CALIL NETO, C. **Madeira Laminada Colada (MLC): controle de qualidade em combinações espécie-adesivo** - tratamento preservativo. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. doi:10.11606/D.88.2011.tde-19042011-171909.

CALIL NETO, C.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R.; CALIL JUNIOR, C. **Analysis of specie – treatment – adhesive combinations for glulam purpose**. International Journal of Materials Engineering, v. 4, n. 1-6, p. 41-47, 2014.



CALIL NETO, C. *et al.* **Specie – treatment – adhesive combinations for glulam purpose.** Revista de Engenharia Civil IMED, Passo Fundo, v. 3, n. 2, p. 16-23, dez. 2016. ISSN 2358-6508. Disponível em: <https://seer.imed.edu.br/index.php/revistaec/article/view/1359>  
doi:<https://doi.org/10.18256/2358-6508/rec-imed.v3n2p16-23>.

CANGEMI, J. M. **Biodegradação de poliuretano derivado do óleo de mamona.** 2006. Tese (Doutorado em Química Analítica) - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. doi:10.11606/T.75.2006.tde-26042007-091940.

CAVALHEIRO, R. S. **Madeira laminada colada de Schizolobium amazonicum Herb. (Paricá):** combinação adesivo/tratamento preservante. 2014. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. doi:10.11606/D.18.2014.tde-07102014-143850.

CHIAPARINI, E. J. (Org.). Erechim: **Retratos do passado, memórias no presente.** Erechim: Grafoluz, 2012.

COURI PETRAUSKI, S. M. F. **Desenvolvimento e teste de pórticos treliçados feitos de madeira de Eucalyptus citriodora e Eucalyptus grandis laminada e colada.** Viçosa, 1999. 129p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa.

\_\_\_\_\_. **Desenvolvimento de pórticos de madeira laminada colada de eucalipto, utilizando adesivos à base de resorcinol e óleo de mamona.** 2012. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

COURI PETRAUSKI, S. M. F., CARNEIRO A. C. O., PETRAUSKI, M. C., PETRAUSKI, A. **Avaliação de juntas coladas com adesivos poliuretanos.** In: Anais do XII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira - Ebramem; 2010; Lavras. Lavras: Universidade Federal de Lavras; 2010.

COURI PETRAUSKI, S. M. F. *et al.* Analysis of eucalyptus glued-laminated timber porticos structural performance. **Rev. Árvore**, Viçosa , v. 40, n. 5, p. 931-939, Oct. 2016 .

CURTO, R. A. *et al.* **Wood density of Araucaria angustifolia from overstocked strand.** Pesquisa Florestal Brasileira, v. 36, n. 85, p. 51-59, 2016. DOI: 10.4336/2016.pfb.36.85.963.

DIAS JÚNIOR, A. F.; SANTOS, P. V. dos; PACE, J. H. C.; CARVALHO, A. M. de; LATORRACA, J. V. de F. **Caracterização da madeira de quatro espécies florestais para uso em movelaria.** Revista Ciência da Madeira - RCM, v. 4, n. 1, p. 93–107, 2013.

DOWNES, G. M. A. **Sampling plantation Eucalyptus for wood and fibre properties.** Collingwood: CSIRO, 1997. 132 p.

FIORELLI, J.; DIAS, A. A. **Fiberglass-Reinforced Glulam Beams: mechanical properties and theoretical model**. *Materials Research*, São Carlos, v. 9, n. 3, p. 263-269, 2006.

FREAS, A. D. **Studies of the strength of glued laminated wood construction**. Wisconsin: Forest Products Laboratory, Forest Service, U. S. Department of Agriculture, 1949. 7 p. Relatório técnico, No. R1749.

GANDINI, J. M. D. **Aplicação de conceitos de sustentabilidade no desenvolvimento de projeto de componentes estruturais pré-fabricados com emprego de madeira de florestas plantadas**. 2016. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016. doi:10.11606/D.102.2016.tde-14102016-093427.

GOMES, N. B. **Análise de elementos estruturais de MLC na flexão com base na versão de revisão da norma ABNT NBR 7190:2013**. 2018. Dissertação de mestrado apresentado ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, 2018.

HILLING, E. et al. **Propriedades físicas da madeira de Araucaria angustifolia (Bert.) O. Kuntze em função da posição no fuste para diferentes idades**. *Cerne*, v. 18, n. 2, 2012. DOI: 10.1590/S0104-77602012000200010

IBÁ, **Relatório Anual 2017**, Indústria Brasileira de Árvores, Edição 2017.

\_\_\_\_\_. **Sumário Executivo 2018**, Indústria Brasileira de Árvores, Edição 2018.

Instituto Nacional de Câncer José Alencar Gomes da Silva [INCA]. **Formol ou Formaldeído**, 2006. Disponível em: [http://www2.inca.gov.br/wps/wcm/connect/comunicacao/informacao/site/home/sala\\_imprensa/releases/2016](http://www2.inca.gov.br/wps/wcm/connect/comunicacao/informacao/site/home/sala_imprensa/releases/2016). Acesso em: 19 abr. 2018.

IWAKIRI, S.; MATOS, J. L. M.; PINTO, J. A.; VIANA, L. C.; SOUZA, M. M.; TRIANOSKI, R.; ALMEIDA, V. C. **Produção de painéis laminados unidirecionais-LVL com lâminas de Schizolobium amazonicum, Eucalyptus saligna e Pinus taeda**. *Cerne*, Lavras, v. 16, n. 4, p. 557-563, 2010. DOI: 10.1590/S0104-77602010000400015

IWAKIRI, Setsuo *et al.* **Avaliação da qualidade de juntas coladas de seis espécies de madeiras tropicais da amazônia**. *FLORESTA*, [S.l.], v. 46, n. 4, p. 455-464, jan. 2017. ISSN 1982-4688. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/36311>>. Acesso em: 18 abr. 2018. doi:<http://dx.doi.org/10.5380/rf.v46i4.36311>.

KAMKE, F. A. *et al.* Adhesive penetration in wood – a review. **Wood Fiber Sci.** V.39, p. 205-220. 2007.

LEHMANN, M. *et al.* Investigation of the bond quality of semi industrially produced ash glulam. *In: World Conference on Timber Engineering*, 2016, Vienna. Anais... Vienna: TU Verlag, 2016.

MACHADO, N. C. C. M. **Variação dimensional da madeira devida ao seu comportamento higroscópico.** 2006. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2006.

MELO, R. R. et al. **Caracterização física e mecânica da madeira de *Araucaria angustifolia*** (Bertol.) Kuntze. Agrária, v. 5, n. 1, p. 67-73, 2010. DOI:10.5039/agraria.v5i1a515

MÖLLEKEN, R. E. **Aplicação do Adesivo Poliuretano Derivado do óleo de Mamona da Obtenção de Páinéis de Madeira Colados Lateralmente.** Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. 2017.

MOLINA, J. C. **A madeira na engenharia teoria experimentação e simulação.** Itapeva: Novas Edições Acadêmicas, 2017.

MOREIRA, M. A. N. T. **Arquitetura e Pré-fabricação: A expressividade dos sistemas construtivos em madeira maciça.** 2017. 230 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto, Porto, 2017.

NODARI, Eunice S.et. Al. **Conservação do Oeste Catarinense: O Parque Nacional das Araucárias e a Estação Ecológica da Mata Preta.** ANPUH – XXV SIMPÓSIO NACIONAL DE HISTÓRIA – Fortaleza, 2009. Disponível em: <<http://anais.anpuh.org/wp-content/uploads/mp/pdf/ANPUH.S25.0873.pdf>> Acesso em 20 de abril de 2018.

NOGUEIRA, D. **A versatilidade da madeira laminada colada.** Revista Construindo, Belo Horizonte, v. 8, n. 1, p.01-14, jul. 2017.

PEDROSA, A. L.; IWAKIRI, S.; MATOS, J. L. M. **Produção de vigas estruturais em perfil “I” com painéis de madeira reconstituída de *Pinus taeda* L. E *Eucalyptus dunnii* Maiden.** Floresta, Curitiba, v. 35, n. 3, p. 443-449, 2005. DOI: 10.5380/ufv.v35i3.5189

PEIXE, M. A. **Uma linguagem de padrões para a madeira: conjunto de práticas projetuais para valorização plástica, técnica e funcional do uso desse material.** Curitiba, 2017. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná.

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

\_\_\_\_\_. **Metodologia e aparato de teste de resistência ao cisalhamento na torção de corpos de prova colados sob diferentes ângulos entre as fibras da madeira.** Viçosa, 2012. 10 p. (Não publicado)

PIO, N. S. *et. al.* **Análise da resistência e elasticidade em flexão estática em painéis LVL de Eucalyptus grandis produzidos com lâminas pré-classificadas.** Floresta, Curitiba, v. 42, n. 1, p. 11 - 20, 2012. DOI: 10.5380/ufv.v42i1.26288

PUNHAGUI, K. R. G. **Potencial de reducción de las emisiones de CO2 y de la energia incorporada en la construcción de viviendas en Brasil mediante el incremento del uso de la madera.** 2014. Tese (Doutorado) - Universidad Politécnica de Cataluña y Universidade de São Paulo. Barcelona, 2014.

ROCHA, D. C. **Desenvolvimento de estruturas articuláveis de madeira.** 2010. 166 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP.

RODRIGUES, I.; PSIDONIK, L. D. G.; SILVA, R. I. C. **Impactos socioambientais e a redução das áreas da Floresta Ombrófila Mista na Microrregião de Erechim-RS.** Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, n. 29, p. 9-29, mar. 2017.

ROLIM, M. B.; FERREIRA, M. Variação da densidade básica da madeira produzida pela *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze em função dos anéis de crescimento. **Revista IPEF**, n. 9, p. 47-55, 1974.

ROODMAN, D. M.; LENSSEN, N. A building revolution: how ecology and health concerns are transforming construction. **Worldwatch Paper**, 124, 1995. 67 p. Disponível em: <http://www.worldwatch.org/node/866> . Acesso em: 28 mar. 2018.

SALTHAMMER, T.; MENTESE, S.; MARUTZKY, R. **Formaldehyde in the Indoor Environment.** American Chemical Society. Chem. Rev., n. 110, p. 2536-2572, 2010.

SEGUNDINHO, P. G. A. *et al.* **Avaliação de Vigas de Madeira Laminada Colada de Cedrinho** (*Erisma uncinatum* Warm.). Cerne, Lavras, v. 19, n. 3, p. 441-449, 2013.

SILVA, J. R. M. **Relações da usinabilidade e aderência do verniz com as propriedades fundamentais do Eucalyptus grandis hill ex. Maiden.** 204 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

TELES, R. F. **Propriedades tecnológicas de vigas de madeira laminada colada produzidas com louro-vermelho: (sextonia rubra).** 2009. 101 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

TREVISAN, R. *et al.* Axial variation of basic density of *Araucaria angustifolia* wood in different diameter classes. **Ciência Rural**, v. 46, n. 11, p. 1969-1972, 2016. DOI: 10.1590/0103-8478cr20141312.

VIEIRA, M. C. S; GESUALDO, F. A. R. Efeitos produzidos por entalhes nos terços extremos do vão de vigas estruturais de madeira. **Ciência & Engenharia (Science & Engineering Journal)**, v. 25, n. 1, 2016.

VITAL, B. R; MACIEL, A. S.; DELLA LUCIA, R. M. Qualidade de juntas coladas com lâminas de madeira oriundas de três regiões do tronco de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 4, p. 637-644, 2006.

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.

WU, S. **Polymer interface and Adhesion**. New York, USA: Marcel Dekker, 1982. pp. 410-420.

ZAQUE, L. A. M.; FERREIRA, M. D.; MELO, R. R. Variação radial e longitudinal da massa específica básica da madeira de *Araucaria angustifolia* com diferentes idades. **Revista Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 38, p. 1-5, 2018.