



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA



UEL - UEM
Mestrado em
Metodologia
do Projeto

EMANUELLE GRACA RECCO

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO SISTEMA DE COBERTURA
CAIBRO TRELIÇADO EM MLP (MADEIRA LAMINADA
PREGADA) UTILIZANDO MADEIRA SERRADA DE *PINUS
SPP.***

Londrina
2015

EMANUELLE GRACA RECCO

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO SISTEMA DE COBERTURA
CAIBRO TRELIÇADO EM MLP (MADEIRA LAMINADA
PREGADA) UTILIZANDO MADEIRA SERRADA DE *PINUS*
*SPP.***

Dissertação apresentada como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM METODOLOGIA DE PROJETO, no Programa Associado de Pós-Graduação em Metodologia de Projeto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina e Universidade Estadual de Maringá.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Daniel de Melo Moura.

Londrina
2015

|

**Catálogo elaborado pela Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central da
Universidade Estadual de Londrina**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

R295a Recco, Emanuelle Graça.

Análise experimental do sistema de cobertura caibro treliçado em MLP (madeira laminada pregada) utilizando madeira serrada de Pinus spp / Emanuelle Graça Recco. – Londrina, 2015.
128 f. : il.

Orientador: Jorge Daniel de Melo Moura.

Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa Associado de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, 2015.

Inclui bibliografia.

1. Arquitetura de habitação – Teses. 2. Estruturas de madeira – Teses.
3. Cobertura (Engenharia) – Teses. I. Moura, Jorge Daniel de Melo. II. Universidade Estadual de Maringá. III. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo. IV. Título.

CDU 728.222

EMANUELLE GRACA RECCO

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO SISTEMA DE COBERTURA CAIBRO
TRELIÇADO EM MLP (MADEIRA LAMINADA PREGADA)
UTILIZANDO MADEIRA SERRADA DE *PINUS SPP.***

Dissertação apresentada como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM METODOLOGIA DE PROJETO, no Programa Associado de Pós-Graduação em Metodologia de Projeto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina e Universidade Estadual de Maringá.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Jorge Daniel de Melo
Moura
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof. Dr. Everaldo Pletz
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr
Universidade de São Paulo - USP

Prof. Dr. Ricardo Dias Silva
Universidade Estadual de Maringá – UEM

Londrina, 27 de Abril de 2015.

Dedico este trabalho a Deus, a minha família, aos amigos e a todos os colaboradores.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me guiar sempre.

Agradeço a minha família e amigos pelo incentivo, apoio e carinho constantes.

Agradeço ao meu orientador Jorge Daniel de Melo Moura, primeiramente por ser para mim referência de profissional e pesquisador, por todas as reflexões que motivaram meu interesse pela pesquisa, pela orientação e participação no desenvolvimento do trabalho, pela confiança e por todas as conversas que foram essenciais não apenas para o meu crescimento profissional, mas também pessoal.

Agradeço ao professor Everaldo Pletz pelo acompanhamento e participação em todas as etapas do trabalho, pelo conhecimento compartilhado, por estar sempre disponível e pelas diversas considerações, fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço a todos os professores do Programa pelo apoio e pelas aulas ministradas.

Agradeço aos professores do departamento da Engenharia Civil, em especial ao Marcos Strass pela participação na secagem da madeira e a professora Berenice pelo empréstimo do equipamento ultrassom.

Agradeço a todos os técnicos dos laboratórios de maquetes, estruturas e materiais, em especial ao técnico Carlos Alberto Duarte, pelo apoio e ajuda em todas as etapas práticas do trabalho, desde o beneficiamento da madeira, montagem das peças e realização dos ensaios laboratoriais, essenciais para o desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço as estagiárias que colaboraram para a pesquisa.

Agradeço a Empresa Metalsoma, pela doação das peças metálicas necessárias para a montagem do aparato utilizado nos ensaios.

Agradeço aos professores Everaldo Pletz, Francisco Antonio Rocco Lahr e Ricardo Dias Silva pelas importantes considerações na fase de qualificação.

A CAPES e a Fundação Araucária pela bolsa de mestrado

“So e lutador quem sabe lutar consigo mesmo.” (Carlos Drummond de Andrade)

RECCO, Emanuelle Graça. **Análise experimental do sistema de cobertura caibro treliçados em MLP (madeira laminada pregada) utilizando madeira serrada de *Pinus spp.*** 2015. 128 f. Dissertação de Mestrado em Metodologia do Projeto. Programa Associado de Pós-Graduação em Metodologia de Projeto de Arquitetura e Urbanismo, do Centro de Tecnologia e Urbanismo – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2015.

RESUMO

Grande parte das moradias brasileiras apresenta coberturas com utilização de componentes em madeira provenientes de florestas nativas e processo construtivo artesanal, decorrente de déficit de mão de obra qualificada para incorporação da pré-fabricação. Diante dessa constatação atual, surge a necessidade de desenvolvimento de novos sistemas construtivos, com uso de madeira de florestas plantadas, a fim de viabilizar seu uso em estruturas, agregando valor a essa matéria prima com grande disponibilidade no mercado. Nos ensaios trabalhados nesta pesquisa foi utilizada a madeira do gênero *Pinus*, por constituir uma matéria prima sustentável, que, no entanto, apresenta muitos defeitos naturais e por isso, para sua utilização em estruturas, torna-se necessária sua classificação visual e mecânica não destrutiva. A tecnologia de MLP (Madeira Laminada Pregada) foi aplicada nos ensaios, pois permite a utilização de peças de menor comprimento e seção transversal, eliminando os defeitos principais. O presente trabalho está inserido no projeto de pesquisa “Estruturas leves de madeira laminada pregada de *Pinus ssp.*, usando ligações com prego para telhados de habitações de interesse social”, cuja proposta consiste na utilização de madeira serrada *Pinus spp.* no sistema caibro treliçado em MLP. Em trabalhos anteriores, dedicados ao desenvolvimento do produto, foram ensaiados dois protótipos de caibros treliçados em MLP, nos quais observou-se melhorias de desempenho do primeiro para o segundo modelo, sendo que a maior fragilidade detectada ocorreu nas emendas das barras tracionadas em MLP. Na primeira etapa deste trabalho, foi realizada uma avaliação experimental das emendas em MLP submetidas a tração, sendo que, para o ensaio das emendas, foram executados 7 modelos para 3 variações de pino metálico, quais sejam, prego liso, prego liso com ponta dobrada e prego tipo ardox, totalizando 21 modelos. A análise final dos experimentos revelou que o prego liso, em geral, obteve os piores resultados, sendo o melhor desempenho constatado no ensaio a tração com o prego ardox, razão pela qual optou-se pela sua utilização nos ensaios dos caibros treliçados em MLP. Na segunda etapa do trabalho foi realizado o ensaio destrutivo de 7 amostras de dimensões estruturais do sistema caibro treliçado em MLP, sendo 6 com madeira classificada e 1 com madeira não classificada com o objetivo de comprovar a eficiência do sistema e verificar o impacto da classificação da madeira no desempenho estrutural do modelo. Os resultados obtidos permitem concluir que o sistema de cobertura Caibro treliçado em MLP proposto atende as condições necessárias de desempenho estrutural com baixa condição de infra-estrutura requerida para o seu processo de produção. A relevância do trabalho está no fato de agregar valores não comuns às coberturas das habitações de interesse social tais como qualidade e desempenho, abrindo possibilidade para sua replicação em situações semelhantes.

Palavras-chave: *Pinus spp.* MLP (madeira laminada pregada). Caibro treliçado. Pré-fabricação. Sistema de cobertura. Ligações pregadas.

RECCO, Emanuelle Graça. **Experimental analysis of Trussed rafter system in Pine NLT (Nailed Laminated Timber)**. 2015. 128 p. Dissertação de Mestrado em Metodologia do Projeto. Programa Associado de Pós-Graduação em Metodologia de Projeto de Arquitetura e Urbanismo, do Centro de Tecnologia e Urbanismo - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2015.

ABSTRACT

Most Brazilian houses have inadequate roof structure using wood components from native forests, handmade construction process, shortage of skilled labor and of not incorporating prefabricated systems. There is nowadays a great need of new building systems using timber from planted forests in order to enable their use in structures and add value to this sustainable material that now is of great availability in the market. Pine wood has many defects and therefore to use it in structures is necessary visual and non-destructive mechanical grading. The NLT technology (Nailed Laminated Timber) was chosen since it allows the use of shorter length pieces and cross section, eliminating major defects. This work is inserted in the research project "Lightweight Structures laminated wood nailed Pinus spp, using connections with nail to roof of social housing", whose purpose is the study of viability of Pinus spp application in trussed rafter system using nailed laminated timber (NLT). In previous work, dedicated to the product development, two prototypes of trussed rafters were tested, in which improvements in performance were observed and currently the biggest issue to be addressed is the connection behavior. In a first stage of this research, were tested the nailed laminated timber beams butt joints located on bottom chord of the trusses, where the tension stresses are the highest. Three variations of metal nails were tested, common nail, common nail with bent tip and ardox nail. Seven specimens of each variation were tested totaling 21 specimens. the experimental results, showed the nail ardox as the best option. In the following step, seven samples of the structural trussed rafter using NLT were tested; 06 manufactured with graded lumber and one ungraded in order to verify the impact of the wood grading in the structural performance. The results showed that the trussed rafter system in NLT meets the necessary structural performance requiring no sophisticated conditions of infrastructure for the manufacture process. The relevance of the work is in fact no common values add to the coverage of social housing such as quality and performance, opening possibility for replication in similar situations.

Keywords: Pine wood. Nail laminated wood. Trussed rafter. Prefabrication. Roof systems. Nailed connections.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|------------------|---|-----------|
| Figura 1 | Retração dimensional decorrente da variação no teor de umidade, conforme a posição dos anéis de crescimento e seção da peça..... | 22 |
| Figura 2 | Tipo de laminação: horizontal (a) e vertical (b) | 28 |
| Figura 3 | G (Ganho de resistência em %) comparativo dos 3 tipos de pregos em função da densidade de pregação | 31 |
| Figura 4 | Plano das 5 variações de pregação em vigas bilaminadas com 3 linhas de pregos | 31 |
| Figura 5 | Detalhe do meio de ligação – pregos de aço 17x27 liso, antes e depois de dobrados..... | 32 |
| Figura 6 | Desenho final de uma das VLPs propostas por Valle (2011) | 33 |
| Figura 7 | Sistema de cobertura em caibros treliçados – Treliça tipo “W” (belga)..... | 35 |
| Figura 8 | Estruturas em Caibro trelicado ligados por chapas de dentes estampados..... | 36 |
| Figura 9 | Transporte de Caibros treliçados pré-fabricados | 36 |
| Figura 10 | Imagem ilustrativa de armazenamento do Caibro trelicado..... | 36 |
| Figura 11 | Detalhe do contraventamento para forças verticais | 37 |
| Figura 12 | Sistema convencional (tesoura) e caibro trelicado, respectivamente | 37 |
| Figura 13 | Projeto arquitetônico padrão..... | 38 |
| Figura 14 | Projeto de caibro trelicado de Jaouiche | 40 |
| Figura 15 | Partes constituintes das camadas do banzo inferior (linha)..... | 40 |
| Figura 16 | Foto da tesoura após ruptura..... | 41 |
| Figura 17 | Distribuição das tabuas (emendas) pela tesoura conforme as camadas..... | 43 |
| Figura 18 | Exemplo de distribuição de pregos na MLP de CADURIN (2013)..... | 43 |
| Figura 19 | Detalhe das ligações de CADURIN (2013)..... | 44 |
| Figura 20 | Indicação das emendas da MLP e localização da ruptura do Caibro trelicado de CADURIN (2012) | 45 |
| Figura 21 | Deslocamentos das emendas na tesoura após a quinta série de carregamento (13,6 kN) e a estrutura após sua ruptura, respectivamente | 45 |

| | | |
|------------------|--|-----------|
| Figura 22 | Deslocamentos na emenda de ruptura apos os carregamentos de 9,81; 11,71 e 13,6 kN, respectivamente | 46 |
| Figura 23 | Tipos de pregos | 48 |
| Figura 24 | Pinos em corte simples | 51 |
| Figura 25 | Pinos em corte duplo | 51 |
| Figura 26 | Espaçamentos em ligações com pinos | 52 |
| Figura 27 | Definições de t1 e t2 (a) para corte simples, (b) corte duplo | 52 |
| Figura 28 | Ensaio de ruptura feito por Jaouiche | 54 |
| Figura 29 | Esquema de montagem de ensaio com carregamento aplicado de forma simultânea | 54 |
| Figura 30 | Fotos do carregamento da treliça individual e do sistema global, respectivamente | 55 |
| Figura 31 | Arranjo da ligação da emenda da MLP a ser estudada | 59 |
| Figura 32 | Detalhe do modelo | 60 |
| Figura 33 | Fotos do gabarito, pré-furação e pregação dos modelos | 61 |
| Figura 34 | Detalhe do aparato para realização do ensaio de tração paralela as fibras | 62 |
| Figura 35 | Fotos das pecas e confecção do aparato | 62 |
| Figura 36 | Foto da célula de carga, pórtico metálico e montagem do aparato | 63 |
| Figura 37 | Fotos dos LVDTs, vista frontal e superior deles instalados nos modelos | 63 |
| Figura 38 | Gráfico modelo do ensaio de tração da ligação | 64 |
| Figura 39 | Mecanismo de transferência de esforços na emenda | 65 |
| Figura 40 | Fotos dos modelos rompidos. Grupo PA, PB e PC, respectivamente | 67 |
| Figura 41 | Fotos de modelos rompidos | 67 |
| Figura 42 | Fotos das tabuas empilhadas no momento da chegada e diferença da quantidade de anéis | 69 |
| Figura 43 | Foto e croqui da Estufa | 70 |
| Figura 44 | Características da Estufa | 70 |
| Figura 45 | Foto interna das adaptações da estufa (ventiladores laterias), entablicamento, colocação dos medidores de umidade da madeira e medição da umidade | 71 |
| Figura 46 | Fotos das tabuas sobre cavaletes, classificação visual e pesagem das pecas | 72 |

| | | |
|------------------|---|-----------|
| Figura 47 | Fotos do gabarito utilizado na classificação visual..... | 73 |
| Figura 48 | Fotos de defeitos descartados e permitidos de acordo com o manual de classificação..... | 73 |
| Figura 49 | Pecas com as demarcações apos a finalização da classificação visual..... | 74 |
| Figura 50 | Detalhes do efeito das pecas com e sem aparelhamento apos a montagem da MLP..... | 75 |
| Figura 51 | Processo de calibração do aparelho Pundit 6..... | 76 |
| Figura 52 | Fotos das pecas agrupadas conforme comprimentos e medição pelo ultrassom..... | 76 |
| Figura 53 | Croqui da composição do Caibro trelicado em MLP..... | 77 |
| Figura 54 | Croqui com a localização das emendas nas camadas externas..... | 78 |
| Figura 55 | Fotos da montagem do primeiro Caibro trelicado em MLP..... | 80 |
| Figura 56 | Fotos do momento do encaixe das pecas do Caibro trelicado..... | 80 |
| Figura 57 | Fotos das pecas organizadas ja cortadas no formato final para montagem..... | 81 |
| Figura 58 | Fotos da elaboração e utilização do gabarito..... | 81 |
| Figura 59 | Croqui da distribuição de pregos do Caibro trelicado..... | 82 |
| Figura 60 | Croqui dos 2 arranjos de pregos das emendas..... | 82 |
| Figura 61 | Fotos da utilização do gabarito, montagem/pré-furação das pecas e MLP após pregação..... | 83 |
| Figura 62 | Fotos do gabarito executado para a execução das 6 amostras..... | 83 |
| Figura 63 | Fotos dos Caibros treliçados nos laboratórios e carrinho para transporte..... | 84 |
| Figura 64 | Croqui com as especificações dos instrumentos e equipamentos utilizados no ensaio destrutivo do Caibro trelicado em MLP..... | 85 |
| Figura 65 | Croqui e foto do apoio dos caibros treliçados no ensaio..... | 85 |
| Figura 66 | Indicação dos 8 pontos de aplicação da carga, dos pesos do conjunto de vigas e modo de aplicação da carga para o ensaio de ruptura do Sistema Caibro trelicado em MLP..... | 86 |
| Figura 67 | Foto do Caibro trelicado instrumentalizado para o ensaio. Em destaque a localização dos 5 relógios comparadores..... | 87 |
| Figura 68 | Fotos dos relógios comparadores instalados..... | 87 |
| Figura 69 | Fotos do local do ensaio, cilindro hidráulico, bomba hidráulica e manômetro..... | 88 |

| | | |
|------------------|--|------------|
| Figura 70 | Esquema de aplicação de carga para aferição do manômetro..... | 88 |
| Figura 71 | Gráfico com valores da aferição do manômetro | 89 |
| Figura 72 | Diagrama de esforços normais (em KNm) com aplicação de 30 kN ... | 89 |
| Figura 73 | Gráfico do carregamento padrão realizado no ensaio dos caibros treliçados | 90 |
| Figura 74 | Evolução da carga no final do terceiro ciclo (apos carregamento de 47,35 kN) das amostras 2 e 6..... | 91 |
| Figura 75 | Fotos do deslocamento das emendas durante o ensaio e apos a ruptura | 92 |
| Figura 76 | Croqui com indicação da emenda onde ocorreram as rupturas | 93 |
| Figura 77 | Diagrama de momentos fletores (em KNm)..... | 93 |
| Figura 78 | Diagrama de esforços normais (em KNm) com aplicação de 60 kN ... | 94 |
| Figura 79 | Curva Carga X Deslocamento no centro do vão (ate carregamento de 47,35 kN)..... | 96 |
| Figura 80 | Esquema representativo do comportamento das curvas dos resultados obtidos no ensaio dos caibros treliçados em regime elástico ate 47,35 kN..... | 97 |
| Figura 81 | Curva de deslocamento das 7 amostras - Carga de serviço (6 kN) | 98 |
| Figura 82 | Forca (kN) quando atingido o estado limite de utilização - (L/200 e L/300)..... | 99 |
| Figura 83 | Deslocamento das emendas com aumento do carregamento..... | 100 |
| Figura 84 | Fotos da emenda no ensaio de RECCO, 2015 e CADURIN, 2013, respectivamente | 102 |
| Figura 85 | Telha cerâmica adotada | 117 |
| Figura 86 | Carga aplicada na posição das ripas sobre a tesoura..... | 118 |
| Figura 87 | Carga distribuída nas barras da tesoura..... | 118 |
| Figura 88 | Diagramas..... | 119 |
| Figura 89 | Esquema da tesoura para dimensionamento das ligações | 120 |

LISTA DE QUADROS

| | | |
|------------------|--|------------|
| Quadro 1 | Valores de k_{mod3} para coníferas (para madeira classificada) | 23 |
| Quadro 2 | Classes de resistência de coníferas | 23 |
| Quadro 3 | Resultados obtidos de combinações entre estruturas de cobertura na análise comparativa realizada por JAOUICHE, (2012) | 39 |
| Quadro 4 | Comparativo das propostas estudadas | 41 |
| Quadro 5 | Quantidade mínima de pregos para as ligações | 42 |
| Quadro 6 | Resultados de rigidez das emendas e resistência por prego | 66 |
| Quadro 7 | Tabela com as características dos tabiques para a secagem da madeira de acordo com a sua espessura | 71 |
| Quadro 8 | Planilhas modelo utilizadas para anotação dos dados das tabuas e classificação visual, respectivamente | 74 |
| Quadro 9 | Planilha modelo utilizada para o calculo do modulo de elasticidade (MOE) | 77 |
| Quadro 10 | Planilha modelo da distribuição das pecas de acordo com o MOE | 79 |
| Quadro 11 | Carrega de ruptura apresentada no ensaio destrutivo das amostras | 92 |
| Quadro 12 | Fotos do local da ruptura e descrição do modo de ruptura de cada amostra | 95 |
| Quadro 13 | Valores de coeficiente de rigidez (K) das amostras para os dois ciclos de carregamento | 97 |
| Quadro 14 | Comparativo das duas primeiras propostas com os resultados obtidos no ensaio dos caibros treliçados | 101 |
| Quadro 15 | Comparativo das duas primeiras propostas com os resultados obtidos no ensaio dos caibros treliçados | 101 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|------|---|
| ASTM | <i>American Society for Testing and Materials</i> |
| ELU | Estado Limite Ultimo |
| Kmod | Coeficiente de Modificacao |
| LVDT | <i>Linear Variable Differential Transformer</i> |
| MLP | Madeira laminada pregada |
| MLC | Madeira laminada colada |
| MOE | Modulo de elasticidade |
| MOR | Modulo de ruptura |
| MSR | <i>Machine Stress Rating</i> |
| NBR | Norma Brasileira Registrada |
| OSB | <i>Oriented Strand Board</i> |
| SPIB | <i>Southern Pine Inspection Bureau</i> |
| VLP | Viga laminada pregada |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1 | Objetivo da pesquisa | 18 |
| 1.2 | Limitações da pesquisa..... | 19 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 20 |
| 2.1 | Madeira de reflorestamento | 20 |
| 2.1.1 | Subproduto de madeiras no processo produtivo..... | 20 |
| 2.2 | Secagem da madeira serrada..... | 21 |
| 2.3 | Classificação da madeira serrada..... | 22 |
| 2.3.1 | Classificação visual | 24 |
| 2.3.2 | Classificação mecânica | 25 |
| 2.4 | Madeira laminada | 27 |
| 2.4.1 | Madeira laminada pregada (MLP)..... | 29 |
| 2.4.2 | Sistema de cobertura com Viga laminada pregada (VLP)..... | 32 |
| 2.5 | Sistemas construtivos para cobertura | 33 |
| 2.5.1 | Sistema de cobertura em caibro trelicado | 34 |
| 2.5.2 | Sistema caibro trelicado em MLP | 38 |
| 2.6 | Ligações em estruturas de madeira | 46 |
| 2.6.1 | Dimensionamento das ligações pregadas em estruturas de madeira..... | 49 |
| 2.6.2 | Pré-furação das ligações | 49 |
| 2.6.3 | Critérios de dimensionamento de ligações com pinos metálicos | 50 |
| 2.7 | Dimensionamento e metodologia de ensaio de tesouras | 53 |
| 2.7.1 | Metodologia de ensaios de ruptura de Treliças..... | 53 |
| 3 | SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 56 |
| 4 | MATERIAIS E MÉTODOS – EXECUÇÃO E ENSAIO A TRAÇÃO DOS MODELOS | 58 |
| 4.1 | Madeira..... | 58 |

| | | |
|-----|---|------------|
| 4.2 | Classificação da madeira | 58 |
| 4.3 | Concepção do arranjo da ligação da emenda em MLP..... | 59 |
| 4.4 | Execução dos modelos | 60 |
| 4.5 | Aparelhos utilizados e instrumentação para o ensaio a tração dos modelos | 61 |
| 4.6 | Ensaio de tração das emendas em modelos | 63 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO – ENSAIO A TRAÇÃO DOS MODELOS..... | 64 |
| 5.1 | Avaliação experimental dos resultados | 64 |
| 6 | MATERIAIS E MÉTODOS – EXECUÇÃO E ENSAIO DOS CAIBROS TRELIÇADOS EM MLP..... | 68 |
| 6.1 | Madeira..... | 69 |
| 6.2 | Secagem da madeira..... | 69 |
| 6.3 | Classificação da madeira | 72 |
| 6.4 | Critério de escolha das peças que compõe o Caibro Trelicado | 77 |
| 6.5 | Etapas de montagem dos Caibros treliçados..... | 79 |
| 6.6 | Aparelhos utilizados e instrumentação para o ensaio estrutural do sistema Caibro trelicado | 84 |
| 6.7 | Carga estimada..... | 89 |
| 6.8 | Carregamento no ensaio | 90 |
| 7 | RESULTADOS E DISCUSSÃO - ENSAIO DOS CAIBROS TRELIÇADOS EM MLP | 91 |
| 8 | COMENTÁRIOS FINAIS..... | 103 |
| 8.1 | Conclusões..... | 103 |
| 8.2 | Sugestões para trabalhos futuros | 105 |
| | REFERÊNCIAS..... | 106 |
| | APÊNDICES | 111 |
| | ANEXOS..... | 116 |

1 INTRODUÇÃO

Ao considerar as circunstâncias sociais do déficit habitacional brasileiro e a precariedade das condições de moradia na atualidade, verifica-se que existe um vasto campo de pesquisa para investigação da fabricação e utilização de sistemas construtivos pré-fabricados, com madeira de plantios florestais, sobretudo para a habitação de interesse social. Com efeito, no setor da construção civil tem se evidenciado cada vez mais o caráter de imprescindibilidade do desenvolvimento de produtos e processos que promovam a redução de custos e melhoria da qualidade dos sistemas construtivos e das habitações em geral.

As madeiras de plantio florestal ocupam espaço cada vez maior no mercado, em virtude de seu crescimento rápido e também devido à crescente redução da oferta de madeira nativa, que tem se tornando mais onerosa e menos disponível. Pode ser observado o crescimento percentual de reflorestamentos de *Eucalyptus spp.* e *Pinus spp.* de 60% entre 2005 e 2012, saindo de pouco mais de 300 mil hectares para 520 mil hectares (ABRAF, 2013).

A madeira de boa qualidade é aquela que apresenta menos defeitos, sejam estes referentes à madeira em si ou àqueles provenientes da cadeia produtiva. Embora a madeira do *Pinus spp.* apresente boas características que facilitam o seu transporte e utilização para diversos fins, ela também apresenta aspectos que merecem maior atenção durante o processo de cultivo das árvores para obtenção de produto final com melhor qualidade. Além disso, é necessária a adoção de procedimentos corretos de transporte, desdobro, secagem e classificação da madeira, que visam torná-la uma matéria-prima adequada para a produção de serrados, tanto para a indústria moveleira, marcenaria ou construção civil.

Em razão disso, deve-se reunir esforços e aprimorar os estudos no sentido de agregar valor à madeira de reflorestamento, aumentar sua área plantada, fomentar a construção em madeira, contribuindo, dentre outras coisas, para a diminuição da emissão de dióxido de carbono na atmosfera, mitigando os problemas ambientais, sociais e econômicos com uma maneira mais eficaz (BRITO et. al, 2010).

Experiências realizadas em outros países indicam que a madeira pode ser empregada em grande escala para a produção de habitação independentemente da classe social a que se destina e, nesse sentido, várias são as opções quanto ao seu grau de industrialização que pode ser parcial, semi ou inteiramente industrializado.

A Fundação João Pinheiro¹ incluiu em 2007 mais um critério para a avaliação da qualidade das moradias brasileiras, o termo “cobertura inadequada”, independentemente da análise quantitativa do déficit habitacional (BRASIL, 2009). Essa inclusão vem confirmar a relevância que as coberturas das residências têm para a questão habitacional brasileira.

Para DAMIANO e SALES (2004), a forma de se executar um telhado no Brasil, no século XX, permanece ainda hoje inalterada, cristalizada em costumes de comércio, consumo e carpintaria, baseados em tradições de execução que passam de pai para filho, habituados ao uso de exageradas bitolas das poucas espécies ainda existentes de madeiras conhecidas, de alta qualidade, e comumente utilizadas.

Atualmente, o critério que determina a escolha da técnica construtiva da cobertura está diretamente relacionado ao seu custo total com materiais e mão de obra, atrelado às condições de desempenho e questão cultural.

Os meios empregados na construção tradicional não têm contribuído para a superação do déficit habitacional existente e, devido a isso, a pré-fabricação se apresenta como um caminho viável a ser perseguido. Verifica-se que, nas estruturas pré-fabricadas, as ligações são de extrema importância. De acordo com DUARTE (2004), elas viabilizam o transporte das peças, permitem sua união, sendo responsáveis pela continuidade e pelo comportamento global das construções, além de serem a causa da maioria dos problemas e falhas estruturais.

O Sistema Caibro treliçado é um sistema conhecido e muito utilizado como um subsistema pré-fabricado para coberturas em países da Europa, EUA e Canadá. A madeira laminada pregada se apresenta como uma alternativa eficaz para possibilitar o uso de peças de madeira menores em

¹ Órgão da Secretaria de Estado de Planejamento e Gestão do Governo de Minas Gerais.

elementos estruturais, considerados seu dimensionamento e exigências normativas.

Diante do exposto, o presente trabalho pretende desenvolver uma alternativa de subsistema de cobertura com possibilidade de industrialização, que permita a redução de custos e a melhoria do desempenho dos componentes construtivos.

1.1 Objetivo da pesquisa

Este trabalho trata da verificação do uso de *Pinus spp* no desenvolvimento de subsistema para cobertura e tem como objetivo principal demonstrar a viabilidade estrutural do sistema caibro treliçado em MLP através da análise experimental para emprego em projetos habitacionais.

Os objetivos específicos constituem:

- Definição do arranjo da ligação e do tipo de prego a ser utilizado entre as emendas da MLP;
- Avaliação experimental das ligações das emendas da barra tracionada, utilizando 02 tipos de pregos com três composições diferentes, prego liso, prego liso com ponta dobrada e prego ardox.
- Definição de uma metodologia para a fabricação otimizada do caibro treliçado em MLP, com disposição seletiva das lâminas em função do módulo de elasticidade (MOE);
- Avaliação do desempenho estrutural do sistema proposto, através de ensaio experimental de 07 amostras, mediante a incorporação dos resultados atingidos no ensaio em modelos das emendas, quando solicitadas a tração.

1.2 Limitações da pesquisa

O presente trabalho é voltado para a análise experimental do Sistema Caibro treliçado em MLP e será realizado o ensaio destrutivo de 7 amostras com madeira seca. Nessa pesquisa não será abordado ensaio com madeira verde, pois pode causar problemas aos pregos ao longo do tempo devido as retrações da madeira.

O ensaio a ser realizado refere-se ao ensaio destrutivo da amostra individual, não serão realizados ensaio do sistema global e não será avaliado o comportamento da estrutura em estado de fluência.

O enfoque do trabalho está no desenvolvimento da estrutura e também não considera os outros níveis do mercado e da indústria.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Madeira de floresta plantada

As madeiras de reflorestamento apresentam como grande vantagem seu crescimento rápido e ocupam um espaço cada vez maior no mercado. O *Pinus spp*, por exemplo, é considerada uma madeira leve, de fácil manuseio e grande trabalhabilidade, isto é, de fácil processamento mecânico.

Segundo STAMATO (2006), “a grande variabilidade do *Pinus spp* frente às outras madeiras folhosas não deve ser entendida como inviabilização de seu uso como material estrutural, e sim, que ela deve ser estudada e entendida para garantir sua boa aplicação”.

Se considerar a disponibilidade dessa madeira nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, seria imprudência descartar seu uso na construção civil, alegando ignorância de suas características. Com o entendimento de suas peculiaridades, revela-se possível sua utilização no desenvolvimento em subsistemas construtivos em madeira (VALLE, 2011).

A grande quantidade de madeira juvenil pode influenciar na qualidade da madeira. De modo geral, a maioria dos trabalhos sobre madeira juvenil enfatiza que o crescimento rápido nas plantações origina a formação de madeira de qualidade inferior e que, atualmente, é grande a proporção de madeira juvenil comercializada nos mercados, trazendo como resultado problemas de qualidade nos produtos obtidos deste tipo de matéria-prima. Em um estudo com o *Pinus taeda L.* de 37 anos de idade, PALMA e BALLARIN (2003) definiram, utilizando inspeção visual da tendência do comprimento dos traqueóides, a região de madeira juvenil desde o centro da árvore até 14º anel e a região de madeira adulta desde o anel 18º até o anel 37º.

2.1.1 Subproduto de madeiras no processo produtivo

No processo produtivo da madeira e de produtos que utilizam a madeira como matéria prima, há uma grande quantidade de subprodutos, muitas vezes de peças com dimensões e qualidades que poderiam ser reaproveitadas.

Em diagnóstico sobre serrarias de Telemaco Borba/PR, MOURA *et al.* (2012), constatam que a geração desses subprodutos está associada a três aspectos: a classificação, a presença de fungos manchadores e o formato da tora. As empresas classificam as peças eliminando os nós, descartando muitas vezes peças de boa qualidade para serem utilizadas em atividades de menor valor agregado, como a comercialização do material para lenha ou estrutura de estofados, etc.

Segundo MOURA *et al.* (2012), é impossível a eliminação de geração de rejeitos na linha de produção, razão pela qual se propõe a utilização de peças de pequeno comprimento para recomposição de peças estruturais a serem desenvolvidas para a construção civil. Destacam-se várias possibilidades, dentre elas, peças laminadas (coladas ou pregadas), treliças para telhados, caibros treliçados e estruturas diafragma para estruturação de cobertura e construções temporárias:

“Na verdade pode-se, tanto projetar um novo componente ou matéria prima a partir das “sobras” existentes, como projetar componentes que demandem cortes específicos e reorientem o desdobro de acordo com um novo produto.” (MOURA *et al.* 2012, p. 04)

2.2 Secagem da madeira serrada

Toda madeira serrada apresenta índices de umidade irregulares que podem causar danos à peça quando utilizada nessa condição. Deste modo, a madeira necessita passar pela secagem, etapa que exige muita atenção para evitar o surgimento de defeitos provenientes desse processo (figura 1). O processo de secagem mal realizado pode causar vários tipos de defeitos (encanoamento, arqueamento, encurvamento e torcimento), o colapso, o endurecimento superficial, as rachaduras, as manchas e os defeitos de grã. Todos estes defeitos podem ser prevenidos conforme o controle das condições de secagem, já que os defeitos estão diretamente ligados ao mecanismo adotado para equilibrar a umidade da madeira (FAGUNDES, 2003).

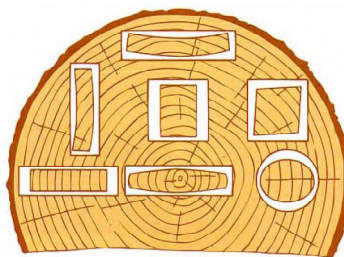


Figura 1 Retração dimensional decorrente da variação no teor de umidade, conforme a posição dos anéis de crescimento e seção da peça.
Fonte: FAGUNDES, 2003.

A secagem proporciona melhoria nas características de trabalhabilidade, redução da variação dimensional e menor possibilidade de ataques por fungos e insetos xilófagos. Também, com o aumento do teor de umidade da madeira, há uma diminuição em sua resistência.

Existem dois métodos para se secar a madeira: naturalmente (ao ar livre, com as peças devidamente espaçadas) ou artificialmente, em estufas. A secagem ao ar livre pode levar de 30 a 90 dias, sendo muito dependente das condições climáticas e da seção das peças, enquanto em estufas este prazo pode ser de menos de uma semana. Como o método artificial é muito rápido e pode danificar seriamente a madeira, é necessário maior controle das condições ambientais - temperatura, pressão, umidade e aspecto visual. (VALLE, 2011)

2.3 Classificação da madeira serrada

No Brasil, o solo e as condições climáticas (luz e umidade) são altamente favoráveis para a formação de florestas plantadas, como a de *Pinus spp*, que apresenta alta produtividade. Entretanto, em consequência a esse crescimento acelerado, as madeiras coníferas provenientes dessas florestas são formadas com baixa densidade e muitos nós, tornando-se necessária a realização de uma classificação antes de serem utilizadas como componente estrutural, (CARREIRA e DIAS, 2005).

Segundo VALLE (2011), com a realização de um projeto de arquitetura e estrutura com critérios bem claros e de acordo com especificações

estabelecidas pela norma, a baixa densidade do gênero *Pinus spp* pode ser considerada uma grande vantagem frente às madeiras mais densas.

De acordo com a NBR 7190/97, madeira conífera não classificada não pode ser utilizada em estruturas. A norma apresenta um coeficiente de minoração da resistência, o k_{mod3} , que leva em consideração a qualidade da madeira. No Quadro 1 são apresentados os valores de k_{mod3} para as coníferas de acordo com a densidade da madeira e o tipo de classificação realizada. É possível observar que a redução no valor da resistência é maior, quando realizada apenas a classificação visual, evidenciando a importância da classificação mecânica para fins estruturais.

| Classificação | Classe | Tipo de classificação | |
|--------------------|--------|-----------------------|-------------------|
| | | Apenas visual | Visual e mecânica |
| Densas (D) | SE-D | 0,70 | 0,90 |
| | S1-D | 0,60 | 0,80 |
| | S2-D | 0,50 | 0,70 |
| | S3-D | 0,40 | 0,60 |
| Não-Densas (ND) | SE-ND | 0,60 | 0,80 |
| | S1-ND | 0,50 | 0,70 |
| | S2-ND | 0,40 | 0,60 |
| | S3-ND | 0,30 | 0,50 |

Quadro 1 Valores de k_{mod3} para coníferas (para madeira classificada).

Fonte: Proposta de revisão da NBR 7190/97.

Com o objetivo de orientar a escolha da madeira com propriedades padronizadas para a elaboração de projetos estruturais, a norma especifica as classes de resistência da madeira e classifica em patamares as propriedades mecânicas. As coníferas são divididas em três classes de acordo com suas resistências, propriedades mecânicas e densidade. No Quadro 2, pode-se observar a grande diferença de rigidez entre peças mais e menos densas.

| Coníferas (Valores na condição-padrão de referência U = 12 %) | | | | |
|---|------------------|-------------------|-------------------|--|
| Classes | f_{cdk} MPa | $f_{v0,k}$ MPa | $E_{c0,m}$ MPa | $\rho_{aparente}$ kg/m ³ |
| C20 | 20 | 4 | 3500 | 500 |
| C25 | 25 | 5 | 8500 | 550 |
| C30 | 30 | 6 | 14500 | 600 |

Quadro 2 Classes de resistência de coníferas.

Fonte: NBR 7190/97.

Dois métodos são usados para a classificação estrutural de peças de madeira, cita CARREIRA (2003): a classificação visual, cujo classificador examina cada peça e limita o tipo, localização e tamanho dos vários defeitos que podem afetar a resistência estrutural e a classificação mecânica, baseada no uso de um estimador para avaliar a resistência da madeira. Entre os estimadores mais utilizados destacam-se a densidade e a rigidez à flexão.

2.3.1 Classificação visual

A classificação visual consiste em um processo de separação das peças de madeira em diferentes grupos de qualidade, através de uma análise da quantidade e tipos de defeitos apresentados nas peças.

A classificação visual é baseada na premissa de que as propriedades mecânicas de uma peça de madeira diferem das propriedades mecânicas da madeira isenta de defeitos devido às características de crescimento, e que tais características podem ser vistas e julgadas pelo olho humano. Com o auxílio de regras de classificação, as características de crescimento são usadas para selecionar a madeira em classes de qualidade. (CARREIRA, 2003, p.26)

De acordo com a norma *National Grading Rule* que apresenta as condições para a elaboração de regras de classificação visual de coníferas, as regras de classificação visual do SPIB - *Southern Pine Inspection Bureau* (1994), bem como todas as outras regras de classificação visual em vigor nos Estados Unidos, devem ser fundamentadas na norma ASTM D245 (1993), para a definição de seus critérios de classificação. A norma ASTM D245 (1993) descreve os princípios básicos da classificação visual que permitem a avaliação de qualquer peça de madeira em termos de uma razão de resistência à flexão.

As normas brasileiras existentes são a NB-1381 que, juntamente com a PB-1560 e CB-205, estabelecem as condições para a medição dos defeitos, bem como definem os padrões de dimensões e os procedimentos para a classificação das madeiras serradas de coníferas para uso geral. Segundo GAVA (2005), tais regras estão voltadas muito mais para a definição das

características da madeira com vistas à comercialização do que preocupadas com sua aplicação.

Baseado no SPIB (1994) dos EUA, CARREIRA e DIAS (2005) elaboraram uma proposta de método para classificação visual estrutural para madeira do gênero *Pinus* do Brasil. A classificação proposta consiste na análise das quatro faces e das duas extremidades (seções transversais) de cada peça. Nas faces são avaliados o comprimento das peças, a localização e a natureza dos nós, o desvio de grã, os empenamentos e as fendas. Em função da ocorrência e dimensão desses defeitos, é atribuído um nível de qualidade visual e as peças são enquadradas em quatro classes: Estrutural Especial (SE), Estrutural nº 1 (S1), Estrutural nº 2 (S2) e Estrutural nº 3. Nas extremidades das peças são observadas as quantidades de anéis de crescimento, e a quantidade de madeira de lenho inicial ou primaveril presente em 2,5 cm, medidos em uma linha radial representativa, atribuindo à peça um nível de densidade de anéis, sendo classificadas como: Densa (D) e Não Densa (ND). Dessa forma, a classificação visual avalia tanto a qualidade visual, denotada pela quantidade de defeitos, quanto à densidade de anéis da madeira.

2.3.2 Classificação mecânica

Em relação às propriedades mecânicas de peças com dimensões estruturais, atualmente, as principais pesquisas em desenvolvimento na área da madeira e os principais documentos normativos nacionais e internacionais utilizam valores de resistência, determinados por meio de ensaios em corpos de prova de pequenas dimensões. Segundo FIORELLI *et al.* (2009), essas avaliações, apesar de serem mais fáceis de execução e de exigirem menos recursos financeiros, principalmente em relação a equipamento de ensaio e material, não retratam a realidade das propriedades mecânicas do material.

A classificação mecânica é o método mais adequado, realizando uma análise quantitativa e não diferindo os valores em função do senso humano, pois a peça avaliada desta forma é classificada pelo valor do módulo de elasticidade à flexão (MOE) e também em função da tensão convencional de ruptura por flexão, conhecida como módulo de ruptura (MOR), quando é possível correlacionar estatisticamente estes valores. Ambos os valores são obtidos através do ensaio de flexão. (FREITAS, 2004, p.32)

Dentre os vários métodos de classificação mecânica, destaca-se a por tensões (MSR - *Machine Stress Rating*), que é um efetivo sistema de classificação e avaliação de peças estruturais de madeira devido a sua alta produtividade, podendo avaliar e certificar todas as peças produzidas. As vantagens deste sistema de classificação são:

- Trata-se de um ensaio não destrutivo;
- Alta produtividade de classificação, podendo ser classificadas todas as peças estruturais em velocidades de até 300 m/min., em função da máquina utilizada;
- Obtenção da real variabilidade das peças estruturais, considerando que avalia indiretamente os defeitos existentes nas peças;
- No momento da execução, posicionamento adequado das peças estruturais em função da resistência e esforço solicitante.

Para utilização da MSR, deve-se realizar correlações entre os valores do MOE_{din} , como o MOE e o MOR. Estas correlações são obtidas através da realização do ensaio estático em peças previamente classificadas por meio da MSR. Após a classificação pela máquina, algumas peças são ensaiadas para a obtenção do MOE e do MOR, para posterior correlação com os valores de MOE_{din} , podendo a peça, em seguida, ser classificada através desta correlação. (FREITAS, 2004)

Entre outras técnicas de classificação não-destrutiva que podem auxiliar no processo de avaliação da madeira, destacam-se as técnicas de ultrassom, de vibração transversal e a técnica de ondas de tensão, que permite a obtenção de imagem tomográfica da madeira.

No método de avaliação não-destrutiva por ultrassom, para medir a rigidez da madeira é utilizada a velocidade de propagação de uma onda sonora de alta frequência (≥ 20 kHz), segundo ROSS *et al.*, (1999). A velocidade C em que a onda atravessa a peça de madeira, bem como a propriedade mecânica depende da inclinação das fibras e dos nós presentes nas peças de madeira e pode ser determinada pela equação (1).

$$C = 2 \cdot L / \Delta t \quad (\text{eq. 1})$$

Sendo:

L = distância entre os pontos de emissão e recepção da onda (m);

Δt = tempo decorrido para a onda atravessar a madeira (s).

O valor do MOE pode ser determinado usando a velocidade de propagação C e a densidade do material ρ , apresentado na equação (2).

$$\text{MOE} = C^2 \cdot \rho \quad (\text{eq. 2})$$

Sendo:

C = velocidade de propagação da onda (m/s);

ρ = Densidade da madeira (kg/m^3).

Na aplicação da técnica de ultrassom em corpos de prova de *Pinus radiata* com teor de umidade de 12%, BARADIT e FUENTEALBA (2000), observaram uma alta correlação entre os valores do MOE determinado pelo equipamento ultrassônico e pelo teste destrutivo, concluindo assim que a técnica do ultrassom é um meio eficiente de se determinar o valor do MOE.

2.4 Madeira laminada

A madeira laminada é composta por peças de madeira, obtidas a partir de tábuas, solidarizadas entre si, com as fibras das lâminas paralelas ao eixo longitudinal do elemento produzido. Este sistema permite obter elementos estruturais com uma significativa variedade de formas e tamanhos, que na maioria das vezes são limitados apenas pelas questões de transporte (BONO, 1996).

As ligações entre as peças de madeira podem ser obtidas de diferentes maneiras: pregos, parafusos, adesivos, entre outros. Segundo GAVA (2005), independentemente do tipo de ligação, as peças produzidas de madeira laminada apresentam alta resistência a solicitações mecânicas.

As lâminas podem ser formadas por uma ou mais tábuas, unidas longitudinalmente por meio de emendas de topo, biseladas ou dentadas.

Existem dois tipos de laminação que são apresentados na figura 2: horizontal, com as lâminas posicionadas paralelamente ao plano neutro de flexão; e vertical, com as lâminas posicionadas perpendicularmente ao plano neutro de flexão (BONO, 1996).

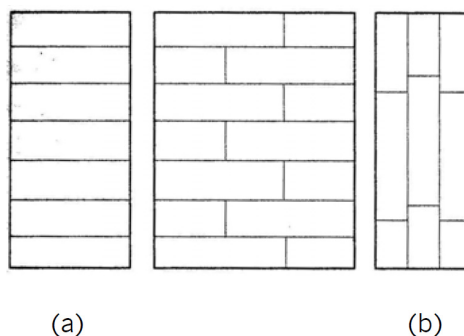


Figura 2 Tipo de laminação: horizontal (a) e vertical (b).
Fonte: BONO, 1996.

Uma das grandes vantagens da utilização da madeira laminada é, sem dúvida, a possibilidade de se compor estruturas com as mais variadas formas e dimensões, a partir de peças de madeira de dimensões reduzidas. Dentre outras vantagens, podemos citar:

- A redução de rachaduras e outros defeitos comuns em peças de grandes dimensões, dada a pequena espessura das lâminas;
- A possibilidade de se utilizar lâminas de qualidade inferior nas zonas de menor solicitação (próximas à linha neutra, por exemplo);
- Relação densidade/resistência bastante reduzida, se comparada com a madeira maciça;
- Possibilidade de pré-fabricação, implicando em canteiros mais limpos e rapidez na montagem da estrutura;
- Manutenção praticamente nula para ambientes internos.

As desvantagens colocadas por BONO (1996) residem basicamente no custo dos componentes que, no caso da madeira laminada colada, é influenciado principalmente pelo alto custo do adesivo utilizado e da mão de obra que precisa ser treinada tanto para selecionar a madeira quanto para produzir as peças estruturais.

A madeira laminada colada pode ser utilizada em estruturas de grande porte e esta técnica permite obter vigas de tamanho praticamente ilimitado, arqueado, com inércia variável, etc. Porém, MARTIN (2006), ao desenvolver trabalhos em Guiana, faz considerações sobre as dificuldades na produção do laminado colado, conforme a seguir:

- Sua produção necessita de um mercado; é rentável se produzido industrialmente; os produtos são geralmente fabricados sob medida; e a produção deve ser absorvida pelo mercado de forma regular;
- Para a produção de produtos acima de 6 metros de comprimento a mão de obra deve ser especializada e passar por uma acreditação. Essa acreditação representa um custo elevado, sendo um fator dificilmente viável para pequenas empresas;
- A técnica deve se apoiar em normas e padrões de qualidade da ligação com controle de parâmetros (tipos de adesivos, tempo de secagem, temperatura, umidade da madeira, tipo de madeira, compatibilidade das madeiras, acidez, rejeito de gordura e rejeição das resinas);
- É preciso ter cuidado com a superfície das lâminas para a colagem e com as juntas nas extremidades. A usinagem da emenda e a colagem são indispensáveis para a redução da possibilidade do início de ruptura dos planos de colagem;
- Os documentos técnicos, normas, assim como os adesivos são projetados para as espécies coníferas (resinosas).

No caso da Guiana, MARTIN (2006) relata que ainda que se tenha sido feito um progresso considerável na área de adesivos para madeira, todas as dificuldades não facilitam o envolvimento da indústria para fabricação de laminado colado na Guiana. Frente a essas dificuldades encontradas na produção da madeira laminada colada, o autor destaca como alternativa a substituição da cola por ligações mecânicas, o laminado pregado.

Apesar de serem considerações realizadas em outra realidade, algumas delas podem ser consideradas para o caso brasileiro.

2.4.1 Madeira laminada pregada (MLP)

A MLP - madeira laminada pregada - consiste na justaposição de camadas de tábuas através da utilização de pregos como elementos de ligação para a união das peças de madeira. O emprego de peças compostas de madeira formadas pela união de peças de dimensões comerciais vem alcançando importância no setor de estruturas de madeira do Brasil, principalmente devido à

gradativa escassez de peças de grandes dimensões. As peças compostas de madeira serrada solidarizadas continuamente por pregos possuem vasta aplicação como material estrutural e apresentam como principais vantagens a facilidade e o baixo custo de produção (GÓES & DIAS 2005).

Segundo MARTIN (2006), as vantagens do laminado pregado são as mesmas que do laminada colado com a diferença da ausência da cola. A madeira laminada pregada está livre de muitas das limitações da laminada colada e os elementos de ligações mecânicas tornam este produto um componente estrutural "tradicional". Algumas vantagens são elencadas quando comparada ao laminado colado:

- A mão de obra não necessita de acreditação e regulamentação, se justificado por cálculos e validado eventualmente por ensaios mecânicos;
- É de fácil aplicação e mais conhecido pela mão de obra quando comparado aos adesivos;
- A produção pode ser interrompida temporariamente sem grandes conseqüências ao funcionamento da empresa;
- Os recursos materiais são simples e baratos;
- As vigas preparadas em oficina podem ser transportadas de forma simples e montadas no local.

As principais desvantagens são: performance estrutural inferior e menos pesquisas realizadas sobre seu desempenho quando comparado ao estudo da madeira laminada colada.

MARTIN (2006) desenvolveu pesquisa focada em estudar o papel da pregação como meio para evitar o deslizamento das lâminas solicitadas à flexão. A análise foi feita em uma viga composta de duas tábuas pregadas.

Uma série de ensaios permitiu a MARTIN (2006), definir o comportamento não linear ao cisalhamento de um conjunto de pregos pelo deslizamento das laminas. Realizou ensaio de flexão em 4 pontos com as vigas bilaminadas pregadas para avaliar a densidade de pregação de 3 diferentes tipos de pregos: liso, torcido (ardox) e anelado, cujos resultados mostraram um desempenho próximo para o prego torcido e anelado, e inferior para o prego liso, conforme figura 3.

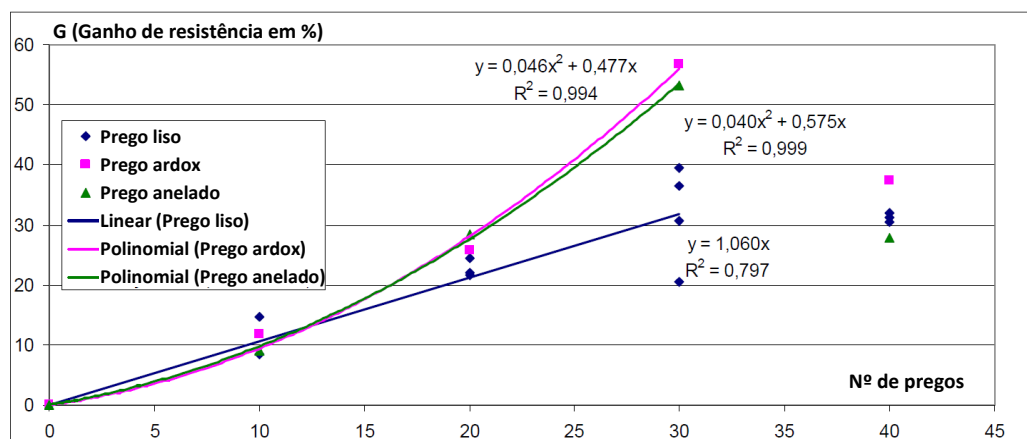


Figura 3 G (Ganho de resistência em %) comparativo dos 3 tipos de pregos em função da densidade de pregação.

Fonte: MARTIN, 2006, adaptado pela autora.

Foram ensaiadas 5 variações de densidade de pregação em vigas bilaminadas (0,89; 1,26; 1,63; 2,00 e 2,49 pregos/dm²), com a densidade aumentando do centro para a extremidade da viga, conforme figura 4.

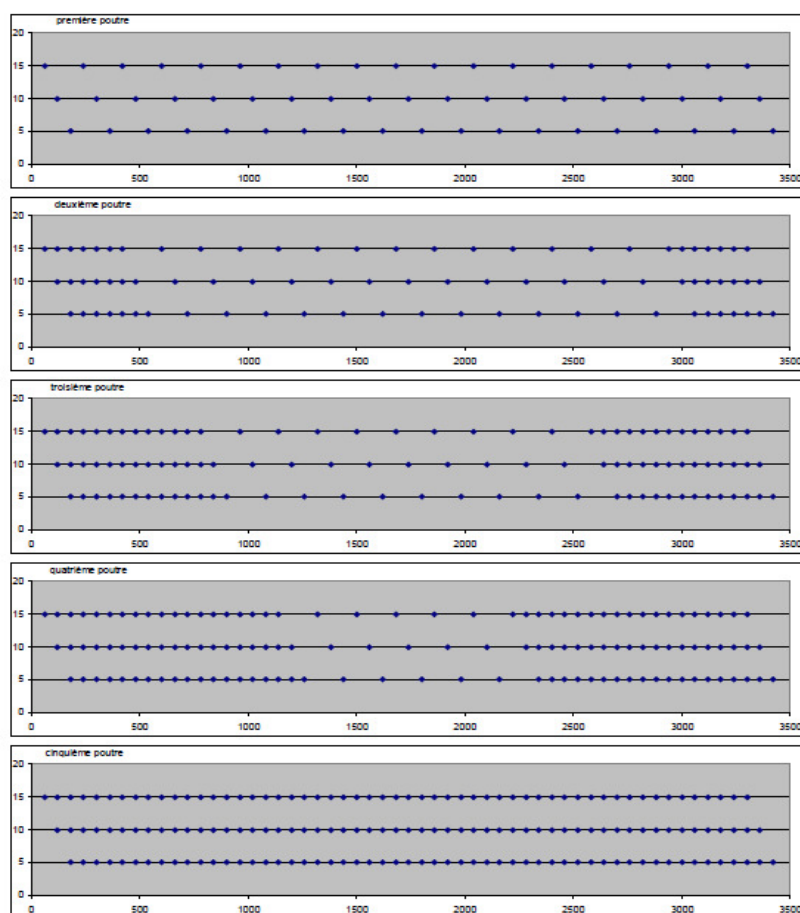


Figura 4 Plano das 5 variações de pregação em vigas bilaminadas com 3 linhas de pregos.

Fonte: MARTIN, 2006.

Os resultados do autor demonstram que, com uma densidade suficiente de pregos, a MLP pode apresentar a rigidez similar à verificada em MLC.

2.4.2 Sistema de cobertura com Viga laminada pregada (VLP)

Em busca de desenvolver sistemas de cobertura para habitação de interesse social, com menor custo, facilidade construtiva, utilizando madeira de reflorestamento, VALLE (2011) propôs alguns modelos. O sistema composto por VLP – viga laminada pregada foi uma das propostas analisadas, que suprime o uso dos três componentes tradicionais das estruturas de telhados – a ripa, o caibro e a terça – por uma única peça composta.

As VLPs proposta por VALLE (2011) foram elaboradas de acordo com as medidas de tábuas encontradas nas serrarias e de acordo com os componentes necessários, resultando em alternância de peças de medidas diferentes, desencontrando as emendas e evitando emendas no meio do vão. O meio de ligação adotado para as três camadas de VLP foi o prego liso de comprimento maior que a largura das três camadas com a parte excedente dobrada com o martelo, dificultando o arrancamento.

Foram ensaiados em corpos de prova diferentes tipos de pregos (liso com ponta dobrada, anelado e espiralado) e diferentes espaçamentos. Apesar de melhores resultados para o prego espiralado, VALLE (2011) optou pelo uso do prego liso com a ponta dobrada devido ao seu menor custo. A principal característica, aumento da resistência ao arrancamento, seria absorvida pelo dobramento da parte do prego liso, que excedia a largura do componente (figura 5).

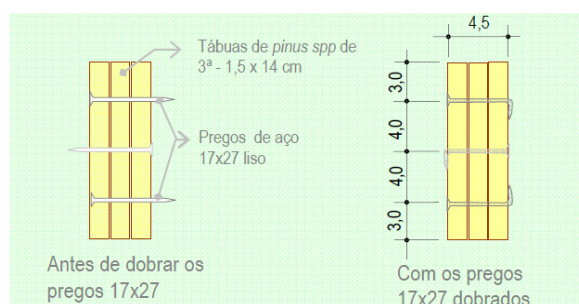
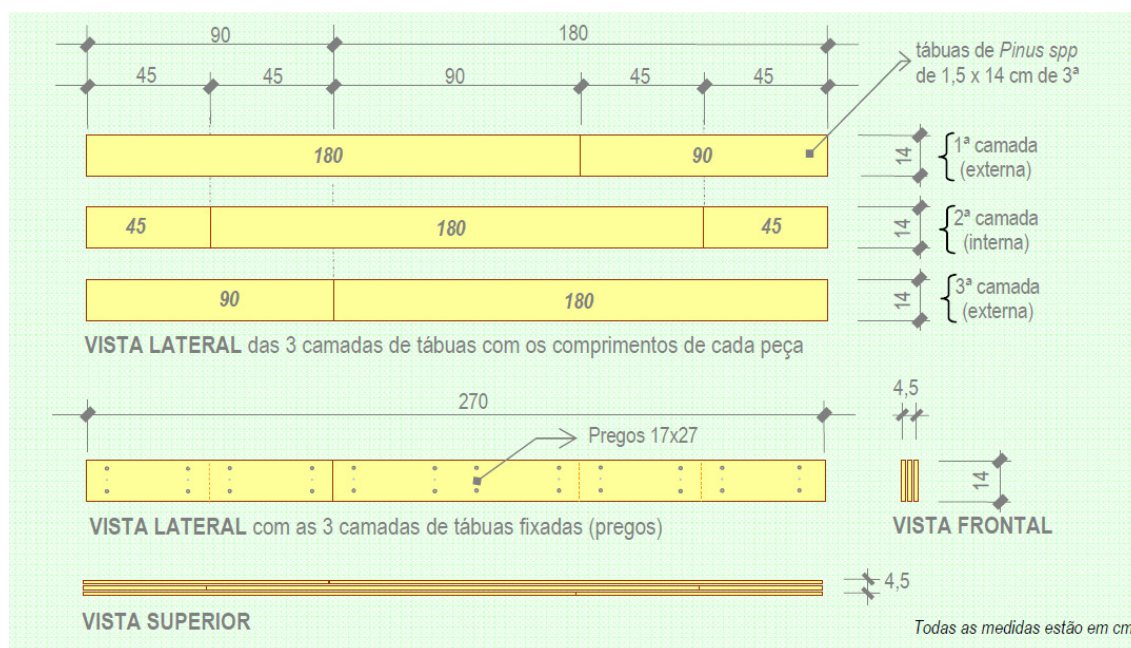


Figura 5 Detalhe do meio de ligação – pregos de aço 17x27 liso, antes e depois de dobrados.

Fonte: VALLE, 2011.

Vários ensaios foram realizados no Laboratório de Estrutura da ESALQ/USP, a fim de se chegar ao produto ideal. Para o projeto da residência foram desenvolvidas 4 variações de geometria para as VLPs. Na figura 6 apresenta-se o desenho final de uma das VLPs com a distribuição das emendas e dos pregos constituintes.



**Figura 6 Desenho final de uma das VLPs propostas por Valle (2011).
Fonte: VALLE, 2011.**

O sistema estrutural proposto pelo autor foi aplicado em residências rurais e pode se observar o processo de produção, considerado simples, facilmente assimilado pelos usuários/mão de obra e com baixa necessidade de infraestrutura devido a utilização de equipamentos de fácil acesso, possibilitando a autoconstrução. O modelo proposto atendeu às condições requeridas em relação ao desempenho estrutural, à durabilidade e à qualidade de acabamento, comprovando a viabilidade do sistema.

2.5 Sistemas construtivos para cobertura

Os sistemas de cobertura são compostos por duas partes: a estrutura de cobertura e a cobertura propriamente dita (ou telhamento). Segundo VALLE, (2011), os sistemas de coberturas em madeira empregados no Brasil

podem ser classificados como: tesoura ou treliça, sistema pontaletado e o caibro treliçado, sendo o terceiro menos utilizado.

O sistema de cobertura em tesoura ou treliça é composto pela estrutura de apoio e a trama, sendo esta formada por ripas, caibros e terças. As ripas recebem diretamente a carga do telhamento e a transmitem para os caibros. Estes se apoiam nas terças, as quais se apoiam diretamente sobre os nós das tesouras. A quantidade de tesouras é dependente do tamanho e tipo da edificação. Numa obra residencial os espaçamentos entre tesouras variam de 2,5 a 5 m e vencem vãos bastante variados, desde 5 metros a vãos superiores a 12 metros. As tesouras se caracterizam por apresentarem apenas dois apoios – um em cada extremidade – onde as cargas da cobertura são distribuídas pelas paredes ou pilares. Existem vários tipos de tesouras, sendo as mais comuns a Howe, a Pratt e a Belga (VALLE, 2011).

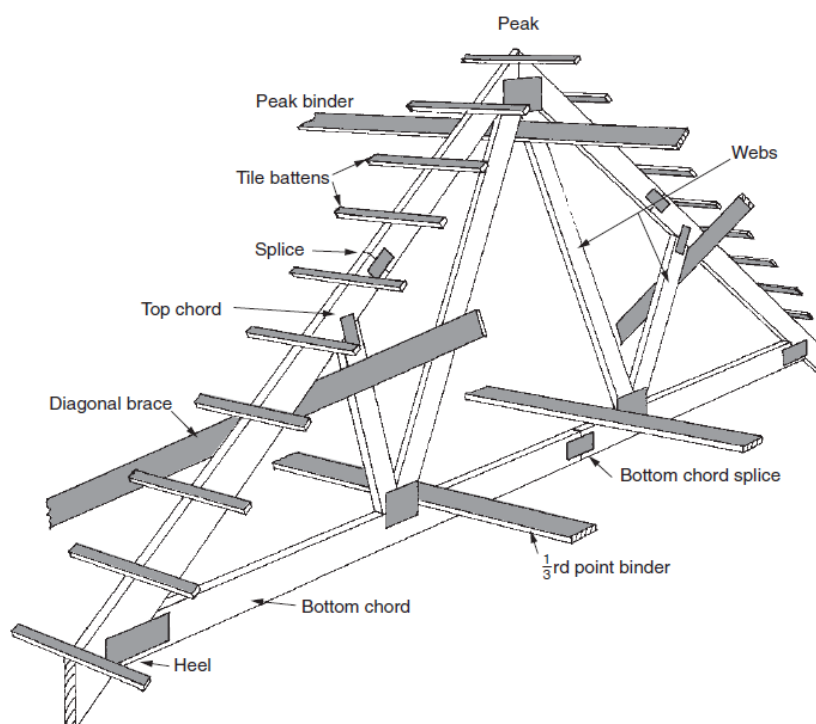
O sistema de cobertura pontaletado é considerado uma variante da estrutura de apoio com tesouras e tem sido amplamente utilizada devido às lajes em concreto. A trama é a mesma utilizada no sistema com tesouras, enquanto a estrutura de apoio é composta por pontaletes (montantes) e seus travamentos. A quantidade de pontaletes é dependente do tipo e tamanho da edificação. A grande diferença em relação ao sistema anteriormente citado está na distribuição das cargas da cobertura, que se dá, nesse caso, em diversos pontos (e não apenas nas extremidades, como no sistema em tesouras). Devido ao modo como ocorre a distribuição das cargas, o sistema pontaletado exige a presença de laje de cobertura maciça ou, no mínimo, laje pré-fabricada (composta por vigotas, lajotas e fina camada de concreto) ou algum outro sistema de vigamento com descarga em colunas, para posterior transmissão das cargas para o encabeçamento das paredes no último pavimento. As grandes vantagens do emprego desse sistema são a diminuição na quantidade de componentes da estrutura de apoio e a simplicidade construtiva na execução dos pontaletes (VALLE, 2011).

2.5.1 Sistema de cobertura em caibro treliçado

O sistema de cobertura em caibro treliçado ainda é pouco disseminado no Brasil, porém muito difundido em outros países. A principal

característica desse sistema revela-se na eliminação das terças e tesouras tradicionais e adoção de caibros na forma treliçada, fato que deu origem ao nome do sistema. A trama é formada apenas pelas ripas, as quais participam do sistema de contraventamento das tesouras, que constituem a estrutura de apoio. São espaçadas entre si geralmente de 100 cm e permitem que as edificações venham a ter vãos que variam de 6 a 12 metros. Os grandes vãos são possíveis devido à grande quantidade de tesouras, distribuindo melhor os esforços atuantes entre os demais elementos estruturais (VALLE, 2011).

As tesouras podem ser de vários tipos, porém, a mais comumente usada é a do tipo “W” (treliça belga), conforme ilustrado na figura 7.



**Figura 7 Sistema de cobertura em caibros treliçados – Treliça tipo “W” (belga).
Fonte: MINDHAM, 2006.**

O interior das edificações se torna mais flexível, por não necessitar de apoios intermediários. As ligações mais utilizadas são chapas de dentes estampados (gang-nail), que facilitam a industrialização destas estruturas (figura 8).



Figura 8 Estruturas em Caibro treliçado ligados por chapas de dentes estampados.
 Fonte: <trussform.co.uk/gallery.php> acessado em 10/06/2014.

Uma grande vantagem para a pré-fabricação desse sistema, diferente do sistema convencional, é o baixo peso dos componentes, possibilitando seu fácil manuseio e transporte, conforme figura 9.



Figura 9 Transporte de Caibros treliçados pré-fabricados.
 Fonte: <trussform.co.uk/gallery.php> acessado em 10/06/2014.

Outra vantagem está na estocagem dos elementos já prontos, pois não carece de muito espaço, uma vez que as peças podem ser sobrepostas ou distribuídas lado a lado, conforme figura 10.

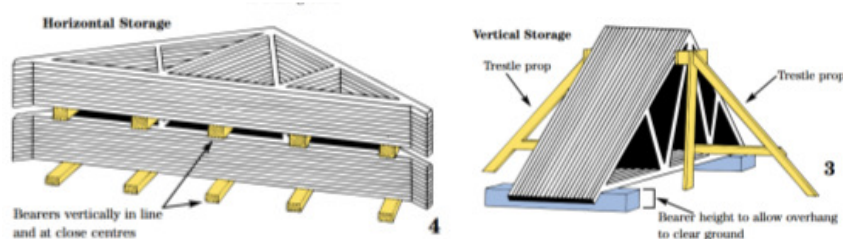


Figura 10 Imagem ilustrativa de armazenamento do Caibro treliçado.
 Fonte: WOLF SYSTEMS LIMITED SHILTON INDUSTRIAL ESTATE - Trussed rafter technical manual, 2004.

MOLITERNO (2003) ressalta que o contraventamento em qualquer treliça é absolutamente necessário e indispensável para dar a indeslocabilidade do conjunto, o que representa um sistema de travamento para evitar possíveis deformações. Em telhados com várias tesouras, o travamento ocorre na parte central com um sistema de diagonais transversais em X, ligando ambas pela sua extremidade. Este deve estar inclinado em aproximadamente 45°, e pregado no mínimo em três tesouras. O suporte longitudinal é acrescentado, caso se faça necessário e há no mínimo uma tesoura livre entre cada contraventamento (figura 11).

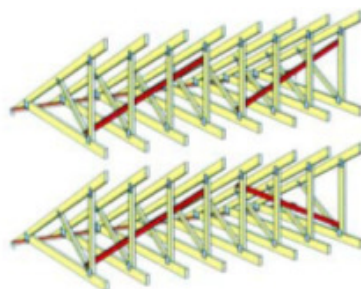


Figura 11 Detalhe do contraventamento para forças verticais.
 Fonte: BRITO, *et al.*, 2010.

Em uma análise comparativa entre os sistemas construtivos convencionais e o caibro treliçado, BRITO, *et al.* (2010) destacam que uma das vantagens é a possibilidade de se usar pequenas bitolas. Na figura 12 pode-se observar a diferença de bitolas entre o sistema convencional e o caibro treliçado.

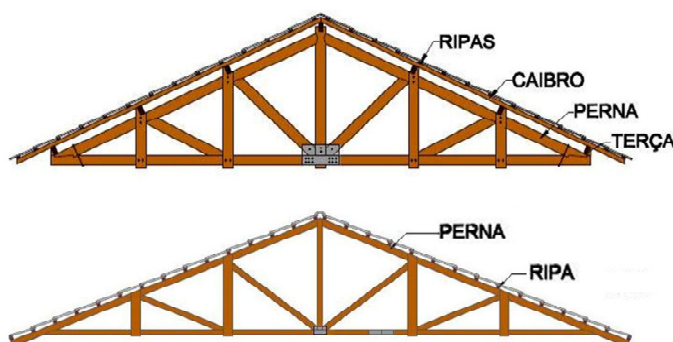


Figura 12 Sistema convencional (tesoura) e caibro treliçado, respectivamente.
 Fonte: BRITO, *et al.*, 2010.

Outra vantagem está no consumo da madeira. De acordo com MINDHAM (2006), o sistema em caibros treliçados utiliza aproximadamente 30% a menos de madeira que os sistemas tradicionais, acarretando em menor custo

da estrutura. O fato de a produção das treliças ser industrializada (e não em campo) também colabora para menor custo e maior eficiência e rapidez no processo.

Como o Sistema de Caibros Treliçados se caracteriza por elementos estruturais com baixa solicitação, suas ligações são simples, envolvem apenas cortes retos e simples, sem entalhes, e possibilita a utilização de pregos ou chapas com dentes estampados. Outro aspecto importante também decorrente da simplicidade de execução de suas ligações é o fato desta técnica ser mais adequada à industrialização. O ambiente industrial permite aproveitar as perdas do processo de forma mais eficiente, aumentando o grau de sustentabilidade desta tecnologia. (BRITO, *et al.*, 2010, p.09)

2.5.2 Sistema caibro treliçado em MLP

Com o objetivo de utilizar o *Pinus spp* no sistema caibro treliçado em MLP, estudos na Universidade Estadual de Londrina tem sido realizados.

JAOUICHE (2012) realizou uma análise de tipos de coberturas para uma residência de padrão popular de 40m², apresentado na figura 13, com aproximadamente 6 metros de vão, comparando quantidade de treliças necessárias, volume total de madeira, índice de consumo m³/m², carga de projeto e custo total para a estrutura.

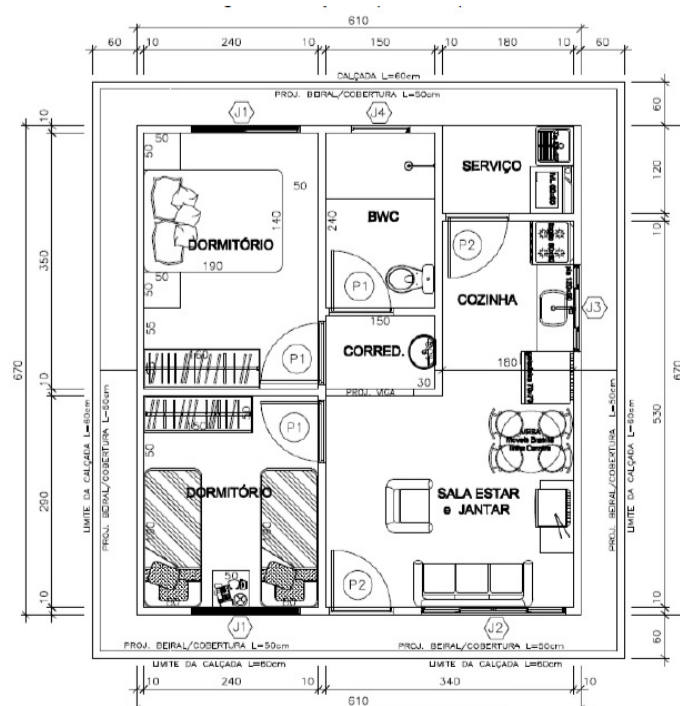


Figura 13 Projeto arquitetônico padrão.
Fonte: JAOUICHE, 2012.

Foram analisadas 04 variações do tipo de tesouras combinadas com ripas de diferentes seções, chapas de OSB e uma VLP, totalizando 14 composições diferentes. Dentre as opções estudadas, a mais viável economicamente e escolhida para o desenvolvimento do trabalho foi o caibro treliçado do tipo Howe feitos com MLP associados às ripas de 5 x 7,5 cm, conforme destacado no Quadro 3.

| COMBINAÇÕES ENTRE ESTRUTURAS DE COBERTURA | | | | | |
|---|------------------------|---|---|-------------------------|--------------------------|
| ALTERNATIVA | QUANTIDADE DE TRELIÇAS | VOLUME TOTAL (m ³) ¹ | ÍNDICE (m ³ /m ²) ² | Fd (Kgf/m) ³ | CUSTO (R\$) ⁴ |
| 01 CAIBRO TRELIÇADO 01 + RIPA 5X6cm | 8 | 1,778 | 0,033 | 111,70 | 707,65 |
| 02 CAIBRO TRELIÇADO 01 + RIPA 5X7,5cm | 6 | 1,560 | 0,029 | 149,70 | 621,01 |
| 03 CAIBRO TRELIÇADO 01 + RIPA 5X2,5cm | 10 | 1,851 | 0,034 | 80,20 | 736,51 |
| 04 CAIBRO TRELIÇADO 02 + RIPA 5X6cm | 8 | 1,729 | 0,032 | 111,10 | 688,08 |
| 05 CAIBRO TRELIÇADO 02 + RIPA 5X7,5cm | 6 | 1,523 | 0,028 | 148,70 | 606,33 |
| 06 CAIBRO TRELIÇADO 02 + RIPA 5X2,5cm | 10 | 1,789 | 0,033 | 79,60 | 712,04 |
| 07 CAIBRO TRELIÇADO 03 + RIPA 5X6cm | 8 | 1,622 | 0,030 | 109,70 | 645,44 |
| 08 CAIBRO TRELIÇADO 03 + RIPA 5X7,5cm | 6 | 1,443 | 0,026 | 147,40 | 574,34 |
| 09 CAIBRO TRELIÇADO 03 + RIPA 5X2,5cm | 10 | 1,655 | 0,030 | 78,30 | 658,74 |
| 10 CAIBRO TRELIÇADO 04 + RIPA 5X6cm | 8 | 1,562 | 0,029 | 108,90 | 621,51 |
| 11 CAIBRO TRELIÇADO 04 + RIPA 5X7,5cm | 6 | 1,398 | 0,026 | 146,60 | 556,4 |
| 12 CAIBRO TRELIÇADO 04 + RIPA 5X2,5cm | 10 | 1,580 | 0,029 | 77,50 | 628,83 |
| 13 CAIBRO TRELIÇADO 04 + OSB 11,1mm | 8 | 1,361 | 0,025 | 78,70 | 894,54 |
| 14 CAIBRO TRELIÇADO 04 + OSB 18,0mm | 6 | 1,387 | 0,025 | 146,40 | 1432,74 |
| 15 CAIBRO TRELIÇADO 04 + VLP 4,5X13,5cm | 4 | 1,736 | 0,032 | 249,00 | 690,92 |

Observações: 1. Corresponde ao volume de madeira da trama e da estrutura de apoio.

2. Índice de consumo de madeira (m³/m²)

3. Calculada segundo NBR 7190/12

4. Valor de R\$ 198,00 para tábuas de *Pinus* de 3ª qualidade acrescidos de R\$ 200,00 para Tratamento superficial.

Quadro 3 Resultados obtidos de combinações entre estruturas de cobertura na análise comparativa realizada por JAOUCHE, (2012).

Fonte: JAOUCHE, 2012.

O projeto final do sistema caibro treliçado em MLP proposto por JAOUCHE (2012) é composto por 3 camadas de *Pinus spp*, sendo 1 central contínua e 2 externas descontínuas (com emendas), com vão de 6,7 m e altura de 1,25 m conforme figura 14. Em toda a treliça, tanto nas barras de MLP quanto nas ligações, foram utilizados pregos 19x39 de modo a ultrapassar a espessura total da VLP, sendo o restante do prego dobrado. A seção da viga laminada pregada que compôs os caibros treliçados foram de 7,5 x 9,7 cm, correspondendo a três tábuas de *Pinus spp*.

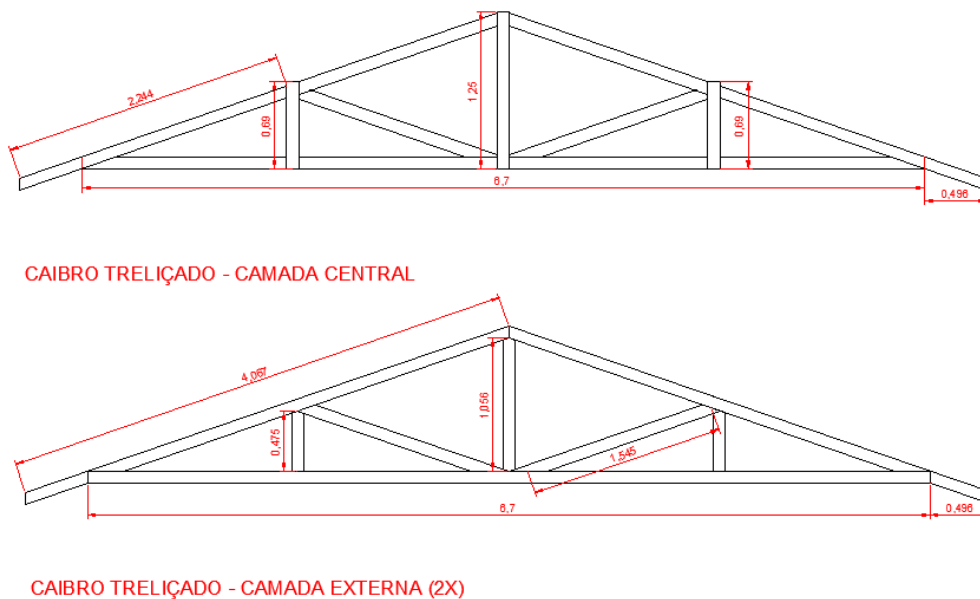
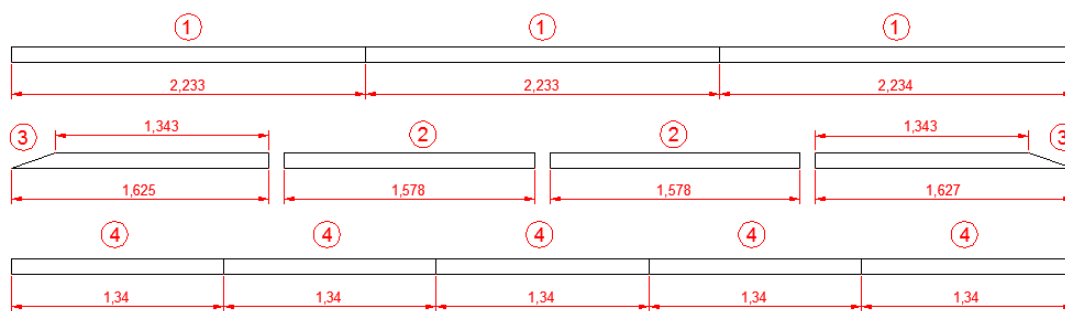


Figura 14 Projeto de caibro treliçado de Jaouiche.
Fonte: JAOUICHE, 2012.

A camada interna era composta por peças inteiras separadas pelos montantes e as camadas externas eram formadas pela união de peças menores gerando as emendas da MLP. A figura 15 apresenta a configuração das peças e localização desencontrada das emendas no banzo inferior (linha).



PARTES CONSTITUINTES - LINHA

Figura 15 Partes constituintes das camadas do banzo inferior (linha).
Fonte: JAOUICHE, 2012.

No ensaio experimental do protótipo, a partir dos 5 kN o deslocamento aumentou 78% com o acréscimo de 0,94 kN, e 81% em relação ao carregamento final de 7,07 kN, com ruptura na ligação entre banzo superior e

inferior (perna e linha). A figura 16 mostra a deformação da ligação rompida no final do ensaio.



Figura 16 Foto da tesoura após ruptura.
Fonte: JAOUICHE, 2012.

A segunda proposta foi desenvolvida por CADURIN (2013), retomando a análise realizada por JAOUICHE (2012). Foi mantido o sistema caibro treliçado do tipo Howe composto por MLP, porém, algumas alterações foram realizadas em busca de melhorias, conforme Quadro 4. O espaçamento proposto entre as tesouras é de 1,20 m e entre as ripas é de 39 cm.

| | Proposta 1 (JAOUICHE, 2012) | Proposta 2 (CADURIN, 2013) |
|--|---|---|
| Tipo de sistema | Caibro treliçado em MLP | Caibro treliçado em MLP |
| Madeira | <i>Pinus spp</i> | <i>Pinus spp</i> |
| Dimensões ripas (cm) | 5 x 7,5 | 5 x 7,5 |
| Seção das MLPs (cm) | 7,5 x 9,7 | 6 x 14 |
| Tipo de prego | Prego 19x39 - liso dobrado | Prego 20x30 –liso sem dobrar |
| Local da ruptura (gargalo da estrutura) | Ligação entre banzo superior e inferior (perna e linha) | Ligação entre as emendas da barra tracionada localizada no banzo inferior |
| Carga ruptura (kN) | 7,07 | 13,6 |

Quadro 4 Comparativo das propostas estudadas.
Fonte: Autora.

As ligações foram redimensionadas de acordo com as novas dimensões, principalmente a ligação entre linha e perna, na qual houve ruptura durante o ensaio de JAOUICHE (2012). Para o dimensionamento das ligações, CADURIN (2013) obteve através da análise numérica (Ftool) os esforços normais, esforços cisalhantes, momentos fletores, reações de apoio e a linha deformada da estrutura. Todas as ligações da tesoura foram dimensionadas por CADURIN (2013) de acordo com a NBR 7190/97 e a Eurocode 5 (2004). Os diagramas dos esforços e dimensionamento das ligações se encontram presentes nos anexos A, B e C desse trabalho.

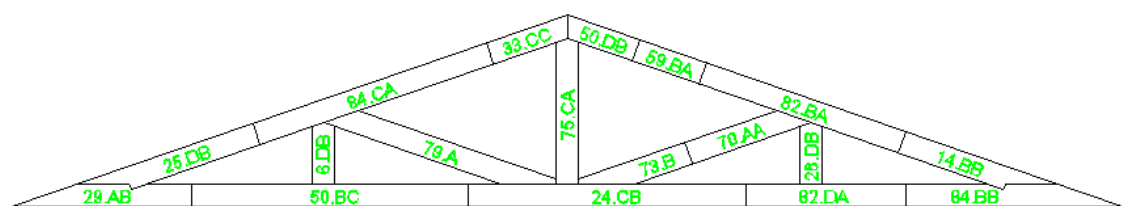
A norma brasileira considera que as ligações devem ser rígidas, por isso suas formulações levam a um número mais elevado de pregos em relação à norma européia, que permite maior flexibilidade às ligações. Segundo CADURIN (2013), o número excessivo de pregos obtido pelo dimensionamento através da NBR 7190/97 dificulta a execução das ligações (Quadro 5). Devido a isso, as quantidades encontradas pelo dimensionamento através da Eurocode5 serviram como valor mínimo norteador da quantidade de pregos adotada em cada ligação na montagem de seu modelo.

| Ligação | Barra | Número mínimo de pregos/face | |
|---------|------------------|------------------------------|-------------------|
| | | NBR 7190/97 | Eurocode 5 (2004) |
| 1 | Montante central | 8 | 2 |
| 2 | Montante lateral | 1 | 1 |
| | Diagonal | 6 | 2 |
| 3 | Banzo superior | 11 | 4 |
| 4 | Diagonal | 4 | 1 |
| | Montante central | 8 | 2 |

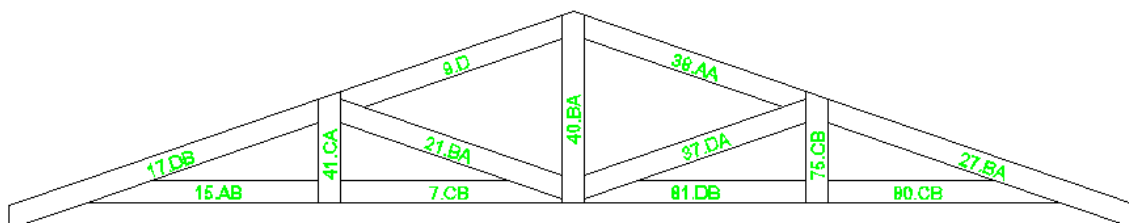
Quadro 5 Quantidade mínima de pregos para as ligações.
Fonte: CADURIN, 2013.

Como se trata de MLP, foram utilizadas tábuas de propriedades mecânicas semelhantes para serem pregadas na mesma barra. Primeiramente, realizou-se a classificação visual e mecânica das peças e essas foram separadas em grupos de rigidez. As barras mais solicitadas foram constituídas por tábuas com maior módulo de elasticidade e as barras menos solicitadas foram compostas por tábuas de menor valor de MOE (CADURIN, 2013).

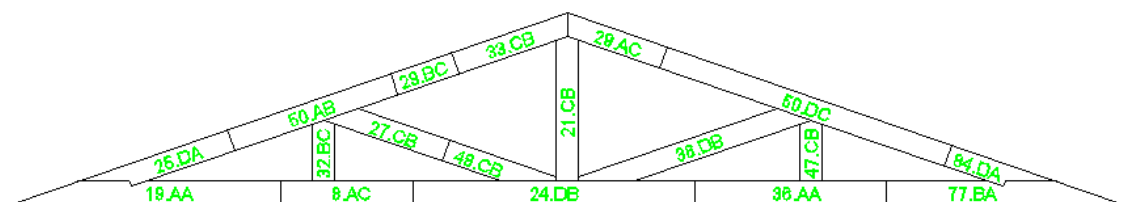
Conforme as novas dimensões adotadas para o protótipo, o autor desenvolveu o projeto das camadas externas e interna da tesoura. É possível observar na figura 17 as combinações de tábuas para cada elemento da tesoura e a disposição construtiva das emendas localizadas nas camadas externas.



CAMADA EXTERNA 1



CAMADA INTERNA



CAMADA EXTERNA 2

Figura 17 Distribuição das tábuas (emendas) pela tesoura conforme as camadas.

Fonte: CADURIN, 2013.

Não foi realizado o dimensionamento das emendas da MLP, apenas elas foram distribuídas nas camadas externas de forma desencontrada. Adotou-se espaçamento médio horizontal de 15 cm entre cada prego ao longo da MLP, sendo estes posicionados de forma alternada, conforme apresentado na figura 18.

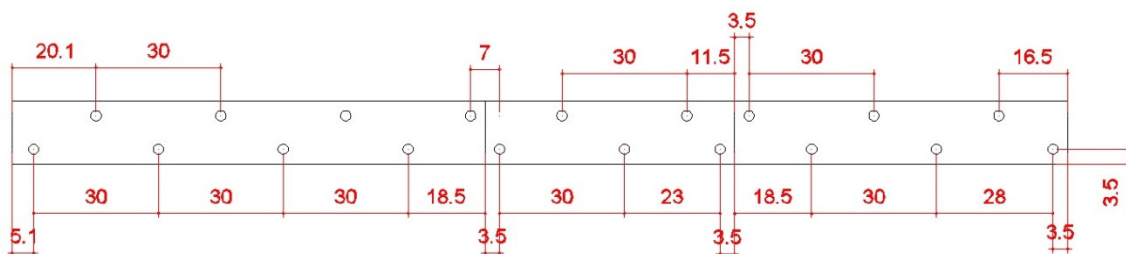
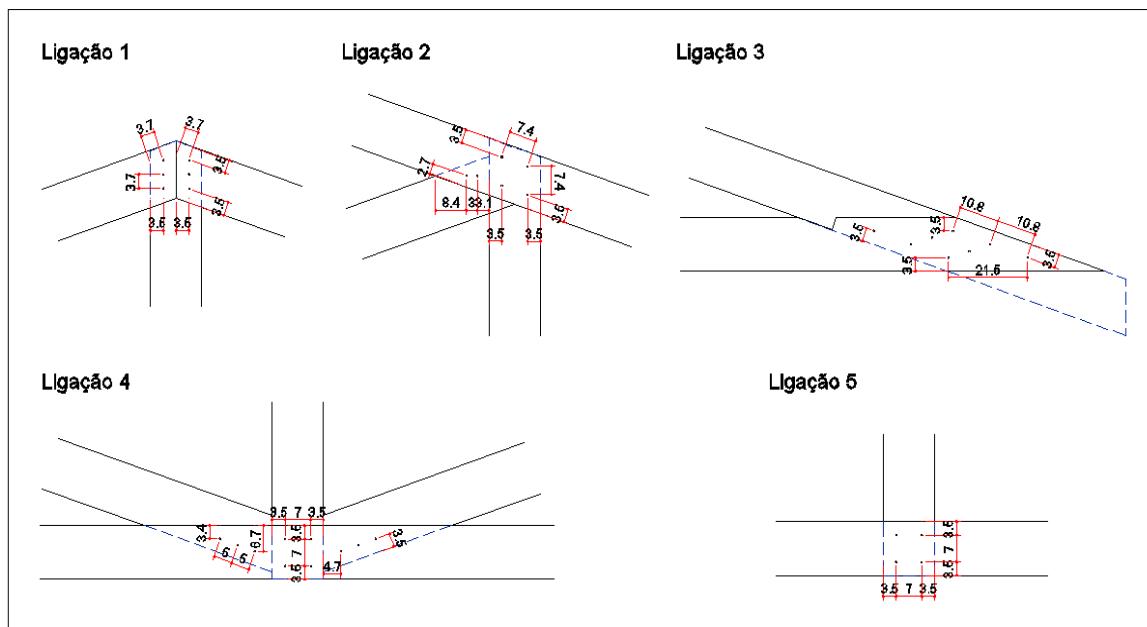


Figura 18 Exemplo de distribuição de pregos na MLP de CADURIN (2013).

Fonte: CADURIN, 2013.

Por fim, realizou-se o detalhamento das ligações do caibro treliçado (figura 19) de acordo com o número mínimo de pregos obtidos com o dimensionamento pelo Eurocode5.



Ligação 1 - Detalhe da ligação de topo. **Ligação 2** - Detalhe da ligação entre diagonal, banzo superior e montante lateral. **Ligação 3** - Detalhe da ligação entre banzos. **Ligação 4** - Detalhe da ligação entre banzo inferior, diagonal e montante central. **Ligação 5** - Detalhe da ligação entre montante lateral e banzo inferior.

Figura 19 Detalhe das ligações de CADURIN (2013).

Fonte: CADURIN, 2013, adaptado pela autora.

De acordo com os dados obtidos no ensaio experimental elaborado por CADURIN (2013), a carga de ruptura foi de 13,6 kN.

A ruptura ocorreu em uma emenda do banzo inferior, conforme indicação na figura 20. Em uma análise do sistema ensaiado, observa-se que a ruptura ocorreu na menor distância entre as emendas das camadas externas. Isso demonstra o ponto frágil da estrutura, já que as demais ligações do sistema resistiram satisfatoriamente ao carregamento aplicado.

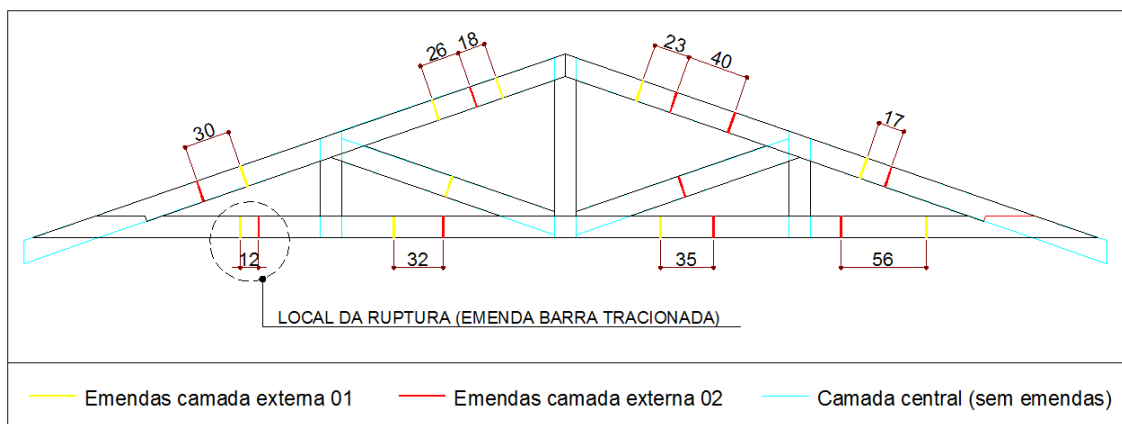


Figura 20 Indicação das emendas da MLP e localização da ruptura do Caibro treliçado de CADURIN (2012).

Fonte: Autora.

Após a terceira série de carregamento (9,81 kN), observou-se o deslocamento relativo das tábuas nas emendas da MLP. Conforme o esperado, as tábuas tracionadas se afastaram, as comprimidas se encostaram e passaram a deslizar uma em relação à outra (figura 21).



Figura 21 Deslocamentos das emendas na tesoura após a quinta série de carregamento (13,6 kN) e a estrutura após sua ruptura, respectivamente.

Fonte: CADURIN, 2013.

Em MLP, a transferência dos esforços nas peças comprimidas é por contato, e os pregos fazem a solidarização da ligação e elas dependem mais da qualidade da madeira. Nas peças tracionadas não há transmissão por contato e, desta forma, elas ficam dependentes do desempenho da ligação pregada, já que os pregos participam da transferência dos esforços.

Segundo ALMEIDA (1990), uma consideração a ser feita é a característica da madeira de ter ruptura sempre frágil à tração, ao contrário da ruptura a compressão que normalmente é mais dúctil.

Na figura 22, observa-se a evolução do afastamento das peças na emenda da barra tracionada, com grande deslocamento antes da ruptura.



Figura 22 Deslocamentos na emenda de ruptura após os carregamentos de 9,81; 11,71 e 13,6 kN, respectivamente.
Fonte: CADURIN, 2013.

Observou-se nos estudos um incremento da qualidade no desempenho do sistema proposto. O primeiro, elaborado por JAOUICHE (2012), apresentou ruptura com carregamento de 7,07 kN devido a uma fragilidade na ligação entre perna e linha. Ensaio dessa ligação foram realizados e aplicados por CADURIN (2013) no segundo estudo e melhores resultados foram observados com carregamento de ruptura da estrutura de 13,6 kN (1,92 vezes mais elevado), cuja ruptura ocorreu em uma das emendas da barra tracionada no banzo inferior, com insuficiência de pregos.

A ruptura na emenda de MLP no banzo inferior indica a necessidade de uma atenção maior, sobretudo, nessa região de tensão à tração.

2.6 Ligações em estruturas de madeira

Entre os elementos estruturais de madeira, existem basicamente três tipos de ligações: ligações por contato, que são formadas apenas pelo contato entre as peças de madeira; ligações coladas, fabricadas a partir da união entre peças de madeira pela ação de um adesivo colocado entre elas, e ainda; ligações mecânicas, em que há penetração do elemento de ligação nas peças de

madeira. O estudo sobre o comportamento dessas ligações é importante, pois permite identificar seus problemas e apontar as soluções, sendo possível melhorar a capacidade de carga, sua rigidez e ductilidade. Como resultado destes estudos, tem-se uma evolução ou mesmo a criação de novos arranjos e/ou elementos de ligações (DUARTE, 2004).

No processo de ruptura das ligações mecânicas entre as peças de madeira utilizando pinos e solicitadas a carregamentos monotônicos, HALLER (1998) descreve em quatro fases o comportamento destas ligações: 1- Deslocamentos sem transferência de carga devido aos erros de fabricação; 2- Fase elástica, com comportamento elástico linear da madeira e do pino; 3- Fase plástica, com deslocamentos irreversíveis, devido ao escoamento do pino ou fissuras na madeira, e; 4- Ruptura completa da ligação. A partir desta identificação, são propostas mudanças nas ligações com o objetivo de corrigir estas falhas.

Como a madeira é um material frágil na tração, as ligações tendem a apresentar este mesmo comportamento se a ruptura acontecer na madeira. De acordo com HALLER (1998), a única forma de aumentar a ductilidade das ligações em estruturas de madeira consiste na utilização de elementos de ligação mecânica que permitam a formação de rótulas plásticas antes da ruptura.

Com relação à ductilidade das estruturas de madeira, quando as ligações são muito resistentes e rígidas, SMITH E FOLIENSTE (2002) afirmaram que a ruptura nessas peças tende a acontecer de forma brusca e não desejada. Diante disso, as ligações devem ser escolhidas e projetadas, a fim de que atuem como fator responsável pela ductilidade das estruturas e não visando apenas a transmissão dos esforços solicitantes com elevada resistência e rigidez. Com efeito, a ductilidade das ligações é caracterizada pelo comportamento da curva de tensão deformação. Um comportamento dúctil para as ligações só é possível quando a ruptura ocorre depois de elevadas deformações plásticas dos elementos de ligação.

Os elementos usados nas ligações mecânicas são divididos em 2 grupos, os elementos tipo pinos e os conectores. Os pregos são os pinos mais comuns e podem ser encontrados no mercado em várias formas, tipos e

tamanhos. Eles podem ser fabricados com uma, duas cabeças e até mesmo sem cabeça. O fuste dos pregos pode ser de seção circular (prego comum), quadrada (prego de marinho) ou trabalhada mecanicamente dando origem a fustes anelados (prego anelar) ou helicoidais (prego ardox), conforme figura 23. Eles podem ser revestidos com o objetivo de aumentar sua resistência à oxidação ou à carga axial (DUARTE, 2004).



(a) Pregos comuns com cabeça (b) Pregos comuns sem cabeça
(c) Pregos com duas cabeças (d) Pregos ardox (e) Pregos anelares

Figura 23 Tipos de pregos.
Fonte: DUARTE, 2004.

Os pregos podem resistir à carga transversal, à carga axial ou uma combinação das duas (FOREST PRODUCTS LABORATORY - WOOD HANDBOOK, 1999). Nas ligações pregadas, desde que grandes deslocamentos não sejam tolerados na ligação, a influência da resistência à carga axial na resistência à carga transversal pode ser desconsiderada. Nos pregos anelares e ardox, que possuem os fustes trabalhados mecanicamente, há um aumento na superfície de contato entre o prego e a madeira sem que haja um aumento no peso do prego. A resistência à carga axial desses pregos é sempre maior que a dos pregos comuns de mesmo diâmetro. A norma europeia EUROCODE 5 (2004) denomina esse comportamento das ligações por pinos metálicos sob grandes deformações de efeito corda (*rope effect*). Ao contrário da norma europeia, a norma brasileira não considera o efeito corda na determinação da resistência das ligações pregadas.

2.6.1 Dimensionamento das ligações pregadas em estruturas de madeira

Segundo ALMEIDA (1990), a utilização de pregos como elementos de ligação em elementos de madeira é dividida em duas gerações. A primeira é caracterizada pela função de solidarização do pino, no caso deste ser solicitado apenas ao arrancamento em ligações por entalhe. Neste caso, havia necessidade de peças com grande seção transversal e elevado comprimento, além de precisão na elaboração do entalhe, requerendo mão de obra capacitada para tais atividades e tornando difícil a execução deste sistema. A segunda geração de ligações possuía a função de transmissão de esforços entre as peças conectadas, sendo utilizadas peças de pequenas dimensões de madeira.

ALMEIDA (1990) então concluiu que, estas ligações na maioria dos casos se caracterizam como pontos críticos das peças de madeira, onde existem concentrações de esforços e estas devem ser controladas. Ao longo do tempo, estudos e desenvolvimentos de novas técnicas de ligações favoreceram o emprego de madeira em estruturas de grande porte.

Em seus estudos, o autor pesquisou a respeito do comportamento de ligações pregadas através de ensaios padronizados, além de propor outros métodos experimentais a fim de representar os estados limites destas ligações.

O critério de dimensionamento abordado pela NBR 7190/97 e também por diversas outras normas, como o Eurocode 5 (2004), se baseiam no conceito de que a resistência de ligações por pinos metálicos depende da resistência da madeira ao embutimento do parafuso e da resistência ao escoamento do pino, sendo determinado assim o comportamento da ligação (OLIVEIRA, 2001).

2.6.2 Pré-furação das ligações

Almeida (1990) observa que deve ser pequena a diferença entre o diâmetro do prego e o diâmetro da pré-furação, com propósito de não gerar tensões que possam levar a madeira ao fendilhamento. Este efeito não pode ser observado macroscopicamente durante a pregação e, caso ocorra, pode provocar o afrouxamento entre a madeira e o prego.

A NBR 7190/97 estabelece que a pré-furação deve possuir diâmetro d_0 inferior ao diâmetro d_{ef} do prego, de acordo com os respectivos valores:

- a) $d_0 = 0,85 d_{ef}$ (Coníferas)
- b) $d_0 = 0,98 d_{ef}$ (Dicotiledôneas)

A execução da pré-furação em ligações pregadas, de acordo com os diâmetros apresentados segundo a NBR 7190/97, eventualmente podem ser dificultadas com relação aos diâmetros das brocas a serem utilizadas, que nem sempre apresentam dimensões comerciais disponíveis neste nível de precisão.

2.6.3 Critérios de dimensionamento de ligações com pinos metálicos

Os critérios de dimensionamento para as ligações em estruturas de madeira utilizando pinos metálicos são apresentados em norma, através de formulações que são expressas em função da ocorrência de flexão do pino e de embutimento do pino na madeira.

A norma brasileira NBR 7190/97 descreve a mesma formulação para ligação em corte simples e em corte duplo. Já o Eurocode 5 (2004) apresenta formulações distintas para corte simples e corte duplo.

A NBR 7190/97 determina que o valor de cálculo correspondente a uma única seção de corte da resistência de um pino metálico seja determinado em função do valor do parâmetro β . E o valor de cálculo R_{vd1} da resistência de um pino, correspondente a uma única seção de corte, é dado em função da forma de ruptura esperada:

- I - Embutimento na madeira ($\beta \leq \beta_{lim}$)
- II - Flexão do pino ($\beta \geq \beta_{lim}$)

Para corte simples a norma NBR 7190/97 especifica que para t , deve-se adotar a menor das espessuras entre t_1 e t_2 de penetração em cada um dos elementos ligados, conforme apresentado na figura 24.

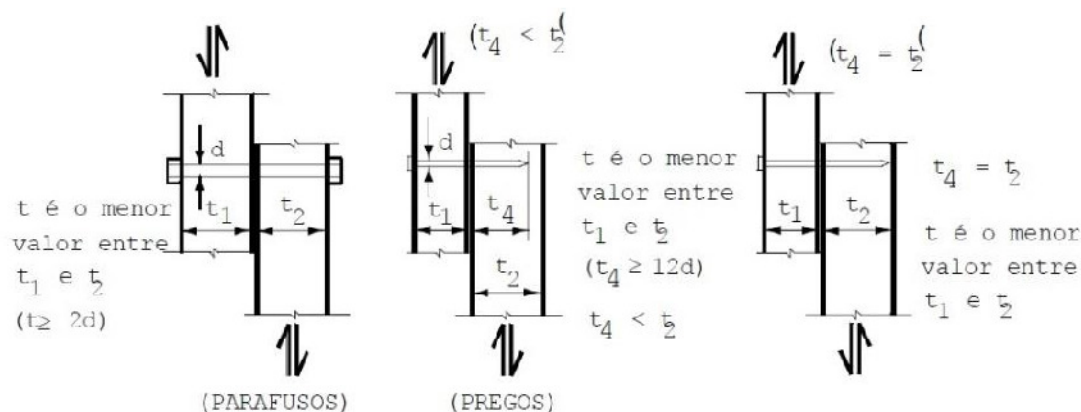


Figura 24 Pinos em corte simples.

Fonte: NBR 7190/97.

No caso de pinos em corte duplo, a NBR 7190/97 determina que sejam aplicados os mesmos critérios anteriores para a determinação da resistência correspondente a cada uma das seções de corte, considerando-se t (espessura de penetração do pino) como o menor dos valores entre t_1 e $t_2/2$ em uma das seções, e entre $t_2/2$ e t_3 na outra (figura 25).

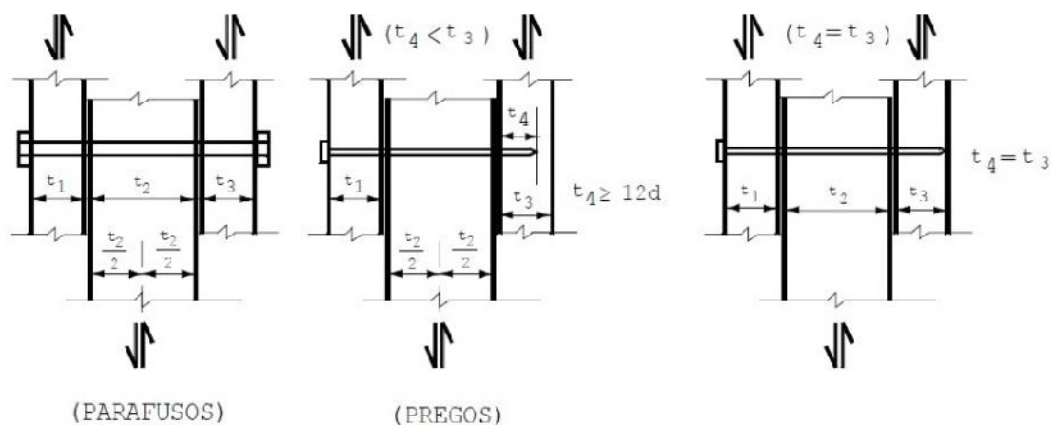


Figura 25 Pinos em corte duplo.

Fonte: NBR 7190/97.

Os valores de cálculo da resistência ao embutimento da madeira são obtidos com base nos seus valores característicos, levando-se em consideração os coeficientes de ponderação das resistências das madeiras e os coeficientes de modificação estabelecidos, em função da classe de carregamento e o tipo de material empregado (k_{mod1}), da classe de umidade e o

tipo de material empregado (k_{mod2}) e consideração a respeito da qualidade da madeira (k_{mod3}).

A NBR 7190/97 recomenda espaçamentos mínimos, para ligações com pinos (pregos com pré-furação, parafusos e cavilhas), demonstrados na figura 26.

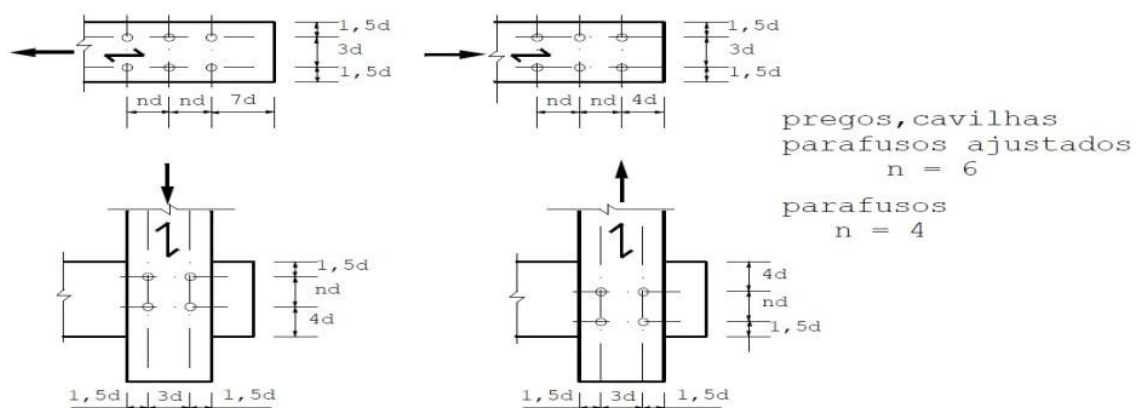


Figura 26 Espaçamentos em ligações com pinos.

Fonte: NBR 7190/97.

O Eurocode 5 (2004), apresenta várias fórmulas para encontrar o valor característico R_K da resistência de um pino, e tanto para uma única seção de corte como para corte duplo, deve ser tomado o menor valor encontrado entre as fórmulas dadas, sendo t a espessura da madeira ou penetração do pino nesta, conforme figura 27.

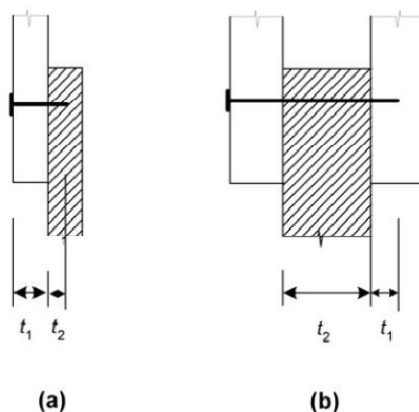


Figura 27 Definições de t_1 e t_2 (a) para corte simples, (b) corte duplo.

Fonte: Eurocode 5, 2004.

2.7 Dimensionamento e metodologia de ensaio de tesouras

Apesar de grande parte das estruturas das coberturas brasileiras serem executadas sem projeto, sabe-se que para alcançar um maior desempenho é necessário o atendimento de todas as etapas – do projeto à execução. Para garantir qualidade, segurança e eficiência para o projeto de coberturas é necessário o dimensionamento dos componentes estruturais que compõem o conjunto (FIORELLI, 2009).

Para propor um sistema alternativo de cobertura em madeira, com fundamento em critérios de racionalização da construção, é importante levar em consideração um método de dimensionamento eficiente. Quando se deseja obter a resistência máxima de uma estrutura até o momento em que parte ou todo o uso da construção necessita de paralisação, o dimensionamento é feito em Estado Limite Último (FIORELLI, 2009).

Na Europa, a norma Eurocode 5 (2004) trata das construções em madeira. No Brasil, a norma para Projeto de Estruturas de Madeira é a NBR7190/97, que se baseia no método dos estados limites últimos.

Além de estados limites últimos relacionados à resistência dos materiais, a norma prevê a restrição de deslocamentos, o que previne o comprometimento estético e o mau funcionamento de equipamentos e instalações, evitando danos aos materiais de acabamento ou às partes não estruturais da construção (CALIL Jr. et al., 2003).

2.7.1 Metodologia de ensaios de ruptura de Treliças

Há diversos métodos para se ensaiar treliças à ruptura, sendo os esquemas de montagem dependentes dos equipamentos e ferramentas disponíveis para o ensaio.

JAOUICHE (2012) e CADURIN (2013) apoiaram seus protótipos (caibro trelaçado em MLP) nos extremos do vão e a travaram lateralmente por ripas pregadas no banzo superior a cada 600 mm. Foram aplicadas cargas em seis pontos, igualmente espaçados, do banzo superior. A aplicação ocorreu através da suspensão, por meio de cabos de aço, de gaiolas contendo blocos de

concreto de aproximadamente 50 kg. Estes blocos foram distribuídos das extremidades para o centro e a cada aplicação total de carga foi medido o deslocamento com o auxílio de um paquímetro, tendo como referência três hastes fixadas no chão, igualmente espaçadas ao longo do vão da tesoura (figura 28).



Figura 28 Ensaio de ruptura feito por Jaouiche.
Fonte: JAOUCHE, 2012.

Outro estudo realizado por PARISI e PIAZZA (2002) utilizou um modelo no qual os carregamentos aplicados foram executados de forma simultânea e automatizada (figura 29). Embora o estudo seja direcionado à avaliação do comportamento de terremotos em treliças de cobertura, o esquema de ensaio pode ser adotado em testes de ruptura convencionais.



Figura 29 Esquema de montagem de ensaio com carregamento aplicado de forma simultânea.
Fonte: PARISI e PIAZZA, 2002.

WOLFE e LABISSONIERE (1991) realizaram ensaio da treliça individual e do sistema global com 9 unidades, como apresentado na figura 30. No ensaio da tesoura individual houve preocupação com o contraventamento e a aplicação da carga foi realizada sobre 4 blocos de cada lado da estrutura.

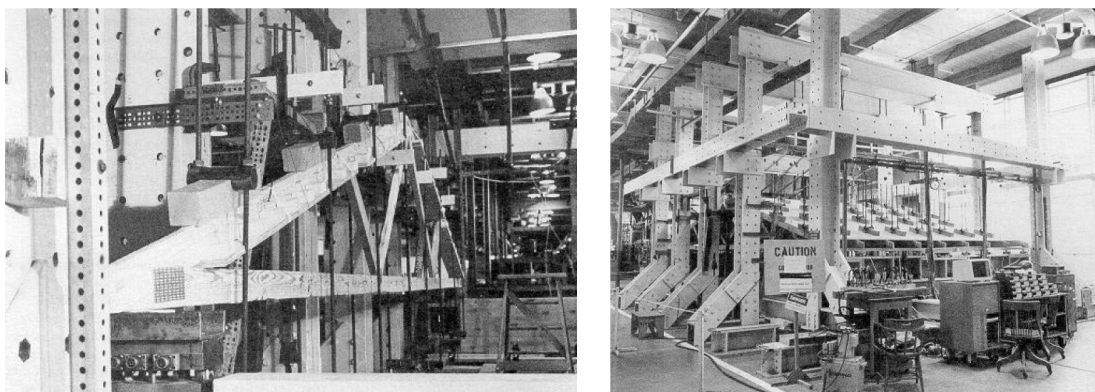


Figura 30 Fotos do carregamento da treliça individual e do sistema global, respectivamente.

Fonte: WOLFE e LABISSONIERE, 1991.

3 SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A partir da revisão bibliográfica, observou-se a viabilidade do uso do *Pinus spp* no desenvolvimento de subsistemas construtivos, desde que sejam respeitadas suas características no processo produtivo e realizada sua classificação de acordo com classes de qualidade da madeira.

Cabe observar que as referências mais recentes são em sua maioria nacionais, tendo em vista que questões como madeira classificada, sistema caibro treliçado e utilização de madeira de reflorestamento em estrutura, são questões já resolvidas internacionalmente.

A trabalhabilidade é uma característica relevante do *Pinus spp* e o manuseio, a usinagem e perfuração nesta madeira, são de fácil execução. Permite, ainda, a adoção de meios de ligação de diversos tipos, tais como: pinos de aço (pregos lisos, anelados e espiralados), chapas de dentes estampados (CDE), diversos tipos de parafusos, dentre outros.

Para a utilização dessa madeira em estruturas é indispensável sua classificação. Separadas em grupos de propriedades mecânicas similares, as peças podem ser combinadas de acordo com a solicitação dos esforços.

A partir das referências sobre a MLP, pode-se observar suas vantagens e desvantagens quando comparadas a MLC. Tendo em vista que este trabalho tem como objetivo o uso de *Pinus spp* em sistemas de cobertura para habitação de interesse social, que não demandam grandes vãos, a MLP, com suas características, se mostra como uma opção eficiente.

Através de estudos apresentados observou-se a viabilidade de se utilizar MLP de *Pinus spp* em sistemas estruturais, como o sistema VLP. Ensaios em vigas bilaminadas pregadas mostraram também que com uma densidade adequada de pregos adequada pode-se alcançar valores apresentados pelos laminados colados.

No desenvolvimento do Sistema caibro treliçado em MLP foi possível verificar melhorias nos ensaios do primeiro para o segundo modelo analisado, apesar de ainda apresentar deficiência nas emendas da MLP.

Com relação aos resultados apresentados na literatura sobre o desempenho dos diferentes tipos de pregos, os autores estudados obtiveram resultados similares. Os pregos mecanicamente trabalhados demonstraram melhores resultados que o prego liso, sendo que o prego ardox apresentou melhor desempenho em comparação ao prego anelado. O prego liso obteve os resultados mais baixos e a variação com a ponta dobrada apresentou bom desempenho quanto ao arrancamento, devido à ponta dobrada, sendo escolhido no caso de VALLE (2011) pelo baixo custo.

Quando comparadas às peças comprimidas, as peças tracionadas em MLP são dependentes do desempenho da ligação pregada. Em MLP as peças comprimidas dependem mais da madeira, os pregos fazem a solidarização da ligação e a transferência dos esforços é por contato, caso este seja inicialmente precário, após uma dada deformação dos pregos ele passa a existir gerando uma não linearidade no sistema. Já nas peças tracionadas, os pregos participam da transferência dos esforços e não há transmissão por contato.

Baseado nos estudos realizados, a escolha do protótipo para a pesquisa apresentada será o sistema caibro treliçado em MLP, com algumas adequações que serão implementadas de modo a aprimorar o desempenho do sistema.

4 MATERIAIS E MÉTODOS – EXECUÇÃO E ENSAIO A TRAÇÃO DOS MODELOS

A primeira etapa da investigação consiste na definição e análise experimental da ligação entre as emendas em MLP e tipo de prego a ser utilizado. Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos utilizados no ensaio a tração dessas ligações em modelos na escala real.

4.1 Madeira

Para o ensaio foram utilizadas pranchas já secas de *Pinus spp*, com umidade em média de 12%, que possuíam dimensões médias de 4 cm de espessura, 28 cm de largura e 300 cm de comprimento. As pranchas foram desdobradas em quatro tábuas.

4.2 Classificação da madeira

As peças foram primeiramente classificadas visualmente com o Manual de classificação visual de peças estruturais de madeira tipo *Pinus spp*, conforme tabela resumida apresentada no anexo D, elaborado de acordo com a norma brasileira NBR 11700-90 e as regras de classificação visual americanas do SPIB (Southern Pine Inspection Bureau) e da norma ASTM D245-93 (MOURA et al., 2012).

Para a determinação dos módulos de elasticidade efetivos das peças de *Pinus spp* foram adotados os procedimentos recomendados no Anexo B da NBR 7190/97. O lote de *Pinus spp* utilizado na presente pesquisa foi classificado como C25.

4.3 Concepção do arranjo da ligação da emenda em MLP

Para a determinação do arranjo elaborou-se uma proposta, cuja a medida mínima entre as emendas é de 20cm, aproximadamente um “palmo de carpinteiro²”.

No intuito de minimizar a fragilidade nas emendas tracionadas e aumentar a segurança no caibro treliçado, as barras tracionadas são compostas pela peça central contínua e as camadas externas descontínuas, com as emendas desencontradas.

Para a conexão das lâminas, são distribuídos 9 pregos 18x36 em uma malha de 3 x 3, dispostos a 2 cm da borda e 5 cm entre eles e as emendas, seguindo as recomendações mínimas de espaçamentos em ligações com pinos metálicos especificados na NBR 7190/97, conforme ilustrado na figura 31.

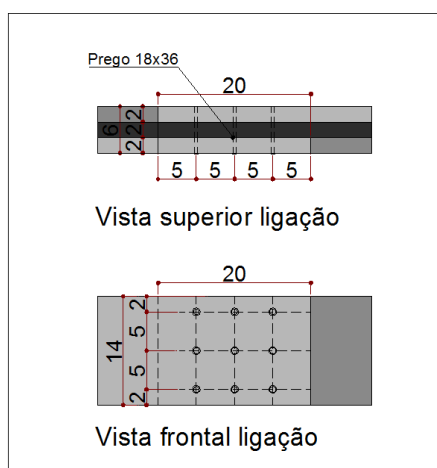


Figura 31 Arranjo da ligação da emenda da MLP a ser estudada.
Fonte: Autora.

Definido o arranjo de ligação das emendas em MLP, passou-se para a determinação dos tipos de pregos a serem ensaiados. Optou-se pelo ensaio com 3 variações: prego liso, prego liso com ponta dobrada e prego do tipo ardox (espiralado), sendo a escolha realizada de acordo com os melhores resultados obtidos nas referências bibliográficas estudadas.

² O termo “palmo de carpinteiro” é utilizado inspirado na proposta do Engenheiro Hélio Olga que em palestra oferecida no XIV EBRAMEM 2014 em Natal, fez um relato sobre a prática em sua empresa: “(...) o palmo de carpinteiro é uma medida prática e facilita na execução dos elementos industriais de laminado colado”.

4.4 Execução dos modelos

Os modelos foram confeccionados com madeira de dimensões estruturais, a fim de aproximar o resultado do experimento aos das estruturas realizadas na prática. Foram utilizados pregos 18x36 de 2 tipos, liso e ardox. Cada modelo apresenta dimensão final de 6cmx14cmx150cm, formado por uma composição de 5 peças de 2 cm de espessura, 14cm de largura e comprimento variado, 65cm e 85cm nas camadas externas e 150cm na camada interna (peça inteira), conforme ilustrado na figura 32. Além dos 9 pregos dispostos entre as emendas espaçadas de 20 cm (palmo do carpinteiro), foram distribuídos 12 pregos de cada lado, totalizando 33 pregos por modelo.

A configuração do modelo foi determinada pelo comprimento necessário para manter as extremidades da ligação entre as emendas e o local da garra do aparato mais resistentes que o trecho central entre as emendas.

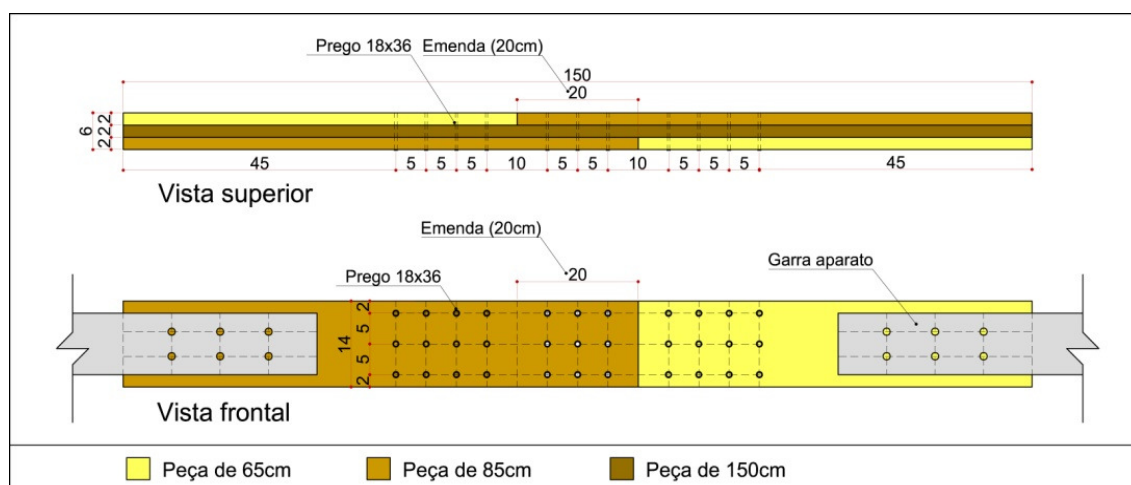


Figura 32 Detalhe do modelo.

Fonte: Autora.

Os 3 grupos de modelos foram nomeados como PA para o prego liso, PB para o prego liso com ponta dobrada e PC para o tipo ardox. Para cada grupo foram designados 7 modelos, sendo 1 gêmeo, ensaiado primeiramente para determinação da carga estimada de cada grupo, conforme recomendações do Anexo B da NBR 7190/97, totalizando 21 modelos.

Após cortadas nos comprimentos necessários para a montagem dos corpos de prova (65cm, 85cm e 150cm), as peças foram organizadas em

grupos com módulos de elasticidade (MOE) similares. Foi realizada a pré-furação de acordo com a norma NBR 7190/97, que especifica para as coníferas broca com diâmetro mínimo de $0,85 d_{ef}$, sendo d_{ef} o diâmetro efetivo medido nos pinos a serem utilizados, em milímetros. Para este procedimento foi elaborado um gabarito de modo a agilizar o processo (figura 33).



Figura 33 Fotos do gabarito, pré-furação e pregação dos modelos.
Fonte: Autora.

4.5 Aparelhos utilizados e instrumentação para o ensaio à tração dos modelos

Para o ensaio da tração dos modelos, foi desenvolvido um aparato, sendo que o principal cuidado foi manter as extremidades mais resistentes de modo a garantir a ruptura no trecho central. No projeto do aparato, levou-se em consideração economia e as condições existentes no laboratório.

Tanto para os conectores metálicos quanto para as garras que fixam o modelo, foram especificadas chapas de 6,35mm. Eles se conectam às peças de madeira (barras inclinadas e modelo) através de parafusos de 12,70mm. Para a rótula nas ligações e conexão das peças metálicas, utilizaram-se pinos de aço com diâmetro de 38,1 mm e, para o deslizamento do apoio na base, utilizaram-se patins com rolamentos (figura 34). O detalhamento elaborado para a execução das peças metálicas do aparato está apresentado no Apêndice A.

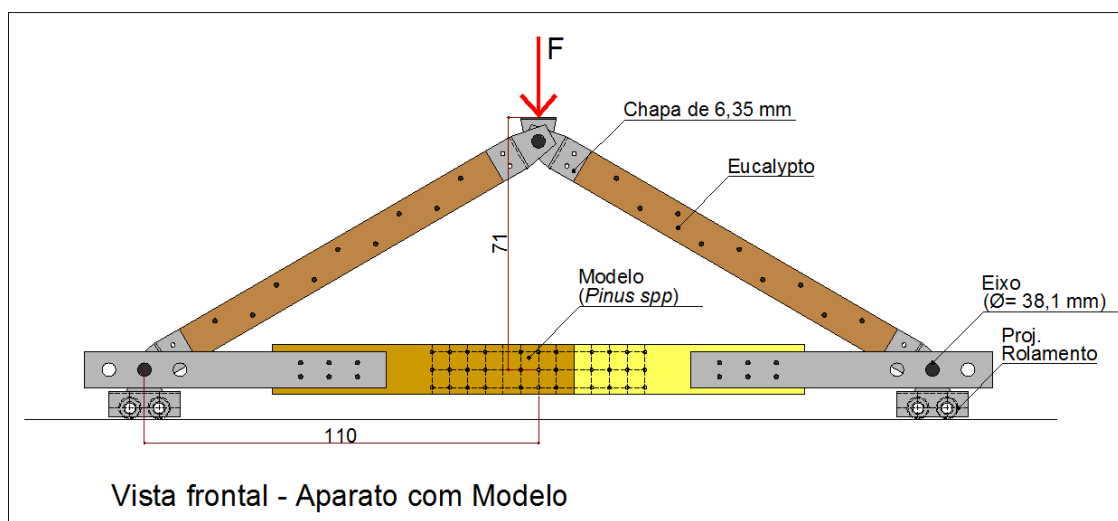
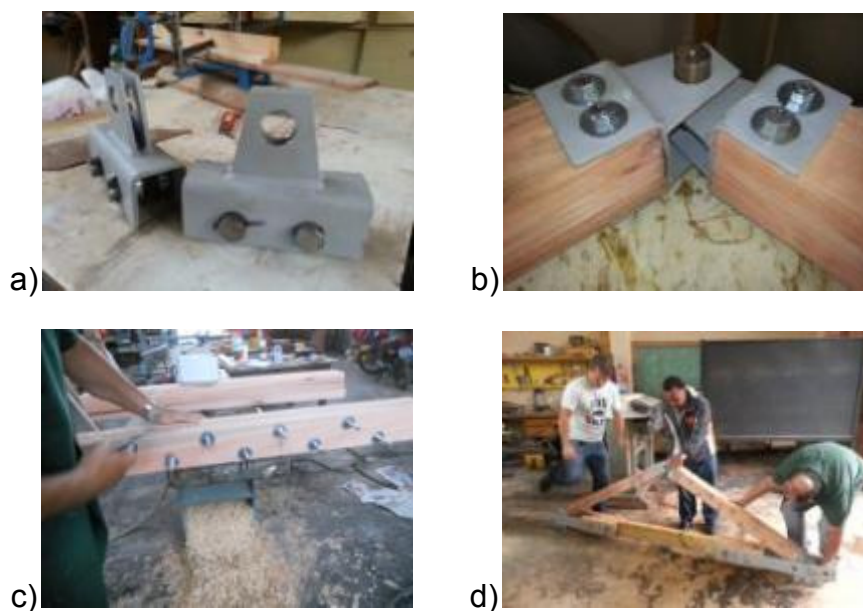


Figura 34 Detalhe do aparato para realização do ensaio de tração paralela às fibras.
Fonte: Autora.

Depois de confeccionadas as peças metálicas, o aparato foi montado no laboratório de modelos da Universidade (figura 35).



- Patins com rolamentos para deslizamento na base;
- Conectores metálicos unidos pelo pino de aço de diâmetro de 38,1mm.
- Confeção das barras inclinadas de eucalipto;
- Transporte do aparato para o local do ensaio.

Figura 35 Fotos das peças e confecção do aparato.
Fonte: Autora.

A aplicação da carga foi feita com auxílio de um pórtico metálico com cilindro de atuação hidráulico. O carregamento foi registrado por célula de carga de 10 t. Na sequência de instalação do aparato, foi regulada a altura da célula de carga, conforme apresentado na figura 36. Utilizou-se para a aquisição de dados, o sistema computacional Lynx.



Figura 36 Foto da célula de carga, pórtico metálico e montagem do aparato.
Fonte: Autora.

4.6 Ensaio de tração das emendas em modelos

O ensaio foi realizado conforme procedimentos do anexo C da NBR 7190/97 que, para a determinação da rigidez, a resistência da madeira deve ser estimada ($ft_{0,est}$) pelo ensaio destrutivo de um modelo gêmeo selecionado da mesma amostra a ser investigada. Conhecida a resistência estimada da amostra ($ft_{0,est}$), o carregamento foi aplicado com dois ciclos de carga e descarga (10% e 50% da $ft_{0,est}$).

Medidores de deslocamento (LVDTs) foram instalados no momento do ensaio, um de cada lado do modelo, para a medição do deslocamento da ligação (figura 37).



Figura 37 Fotos dos LVDTs, vista frontal e superior deles instalados nos modelos.
Fonte: Autora.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO – ENSAIO À TRAÇÃO DOS MODELOS

Neste capítulo, são analisados os resultados dos ensaios destrutivos realizados nos modelos submetidos à tração. Foi realizada uma análise comparativa dos valores obtidos através dos diagramas de força x deformação específica dos modelos de cada variação da ligação da emenda em MLP, bem como foram estudados os parâmetros relevantes para a compreensão do comportamento da ligação.

5.1 Avaliação experimental dos resultados

Foram elaborados diagramas força x deformação específica, sendo encontradas a resistência e rigidez da emenda de cada modelo conforme especificações da NBR 7190/97. Apresenta-se na figura 38 uma curva modelo do comportamento da ligação para este tipo de solicitação, incluindo a reta para determinação da resistência da ligação.

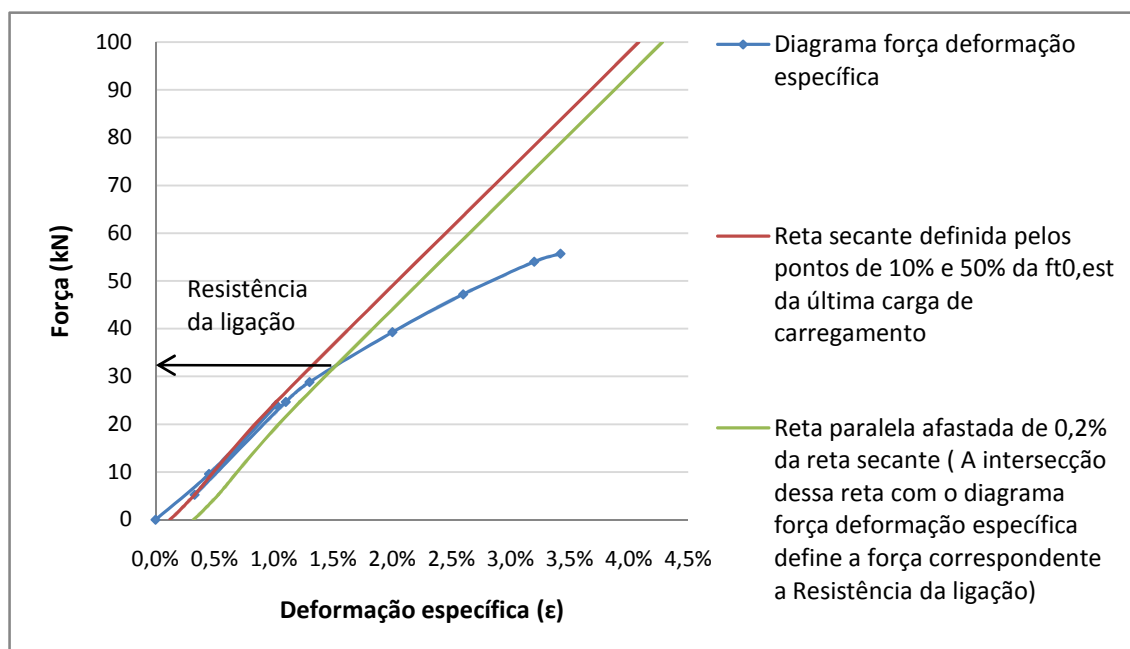


Figura 38 Gráfico modelo do ensaio de tração da ligação
Diagrama força x deformação específica.

Fonte: Autora.

Cabe observar que, na região central do tirante horizontal, no intervalo de 20 cm entre as duas emendas, a transmissão do esforço axial é realizada por duas lâminas, a central e uma externa. Uma parcela de esforço axial é transmitida pela lâmina central, por causa da sua continuidade, e a parcela restante deste esforço pela ligação pregada, que transfere de uma lâmina externa para outra. Sendo assim, por hipótese, assume-se que a ligação pregada nesta emenda em questão possui, em uma seção de corte, uma solicitação igual à metade do esforço normal existente na barra composta, conforme ilustrado na figura 39.

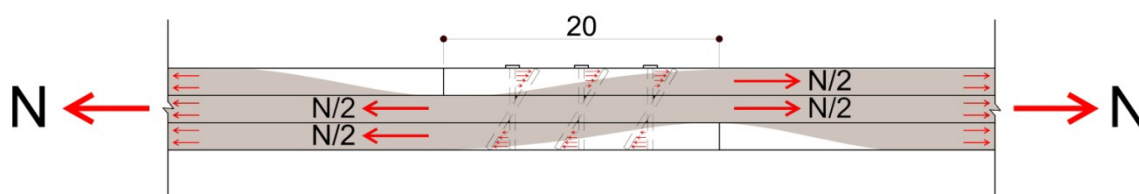


Figura 39 Mecanismo de transferência de esforços na emenda.
Fonte: Autora.

O cálculo com base na Norma NBR 7190/97 determina uma resistência de projeto de 0,35 kN para esta ligação. Os resultados de cada grupo de modelo estão apresentados no quadro 6. A figura 38 também apresenta aspecto típico deste tipo de ensaio, inclusive com a prescrição normativa pertinente. Portanto, observa-se que os valores encontrados para os pregos lisos são bastante compatíveis com a NBR 7190/97.

Os pregos lisos foram os que conduziram a menor capacidade para a ligação. Isto pode ser atribuído ao fato de que os pregos de ponta dobrada e os do tipo ardox, respectivamente, configuram um apoio na ponta dobrada e possuem maior aderência à madeira.

Quanto à rigidez das ligações em regime elástico, observa-se também que os pregos lisos produzem ligações mais deformáveis do que os outros dois tipos de pregos. Apesar disso, todos eles apresentaram ductilidade, característica muito importante para as ligações se tornarem mais previsíveis e seguras. Os pregos de ponta dobrada se comportam como uma viga hiperestática, biarticulada nas suas extremidades e, com o desenvolvimento de grandes deformações, ela passa a contar com a rigidez extensional, além da

rigidez à flexão. Isso fez com que estes pregos de ponta dobrada registrassem um desempenho superior ao do prego tipo ardox, em relação ao quesito rigidez.

Destaca-se também a variabilidade dos resultados. A resistência das ligações se mostrou mais variável do que a rigidez em fase elástica, e os pregos lisos mostraram um desempenho mais variável do que os outros dois tipos de pregos. Nas fases iniciais, os pregos ainda apresentam baixa deformabilidade e, por isso, a rigidez das ligações fica menos dependente da heterogeneidade da madeira. Quanto à carga última, esta variabilidade cresceu para os 3 tipos de pregos, porque ela ocorreu na madeira, pela sua natureza heterogênea, principalmente, quando se trata de madeiras coníferas como o *Pinus spp.*

Quanto aos modos de ruptura, essas ligações apresentaram inicialmente grandes deformações, fletindo os seus pregos e, posteriormente, já com os pregos plastificados, a lâmina de madeira central rompia. Na ruptura, os deslocamentos da ligação correspondiam a deformações, cujos valores variaram entre 4% a 5%, valores extremamente elevados quando comparados aos níveis de deformações correspondentes às resistências de cálculo.

| Prego A | Rigidez da emenda 20 cm (kN/cm) | Resist. por prego por seção de corte (kN) | Prego B | Rigidez da emenda 20 cm (kN/cm) | Resist. por prego por seção de corte (kN) | Prego C | Rigidez da emenda 20 cm (kN/cm) | Resist. por prego por seção de corte (kN) |
|---------|---------------------------------|---|---------|---------------------------------|---|---------|---------------------------------|---|
| PA 1 | 167 | 1,94 | PB 1 | 235 | 2,04 | PC 1 | 153 | 1,94 |
| PA 2 | 169 | 1,89 | PB 2 | 190 | 2,80 | PC 2 | 175 | 2,15 |
| PA 3 | (*) | (*) | PB 3 | 210 | 1,55 | PC 3 | 190 | 1,94 |
| PA 4 | 118 | 0,97 | PB 4 | 195 | 1,29 | PC 4 | 163 | 1,51 |
| PA 5 | 105 | 0,75 | PB 5 | 175 | 1,68 | PC 5 | 157 | 1,29 |
| PA 6 | 101 | 0,97 | PB 6 | 249 | 1,03 | PC 6 | 193 | 2,47 |
| MÉDIA | 132 | 1,30 | MÉDIA | 209 | 1,73 | MÉDIA | 172 | 1,88 |
| DP | 33 | 0,57 | DP | 28 | 0,62 | DP | 17 | 0,43 |
| CV | 25% | 43% | CV | 13% | 36% | CV | 10% | 23% |

(*) Os valores para o modelo PA 3 não foram considerados devido a problemas ocorridos no momento do seu ensaio.

Quadro 6 Resultados de rigidez das emendas e resistência por prego.
Fonte: Autora.

A ruptura ocorreu na emenda, exceto em um dos modelos. A ruptura da lâmina central sempre foi acompanhada pela presença de

deformações excessivas dos pregos e pela rotação dos pregos. Houve um caso de ruptura por cisalhamento longitudinal na madeira, da linha de emenda, e destaca-se o afundamento das cabeças dos pregos na lâmina de madeira, no caso dos pregos de ponta dobrada. (figuras 40 e 41)



Figura 40 Fotos dos modelos rompidos. Grupo PA, PB e PC, respectivamente.
Fonte: Autora.

O caso em que a ligação pregada rompe também por cisalhamento longitudinal da lâmina externa, o espaçamento adotado de aproximadamente 12 diâmetros entre pregos, excedeu o mínimo exigido de 6 diâmetros.



Figura 41 Fotos de modelos rompidos.
Fonte: Autora.

A análise final dos experimentos revelou que o prego liso, em geral, obteve os piores resultados, sendo o melhor desempenho constatado no ensaio da ligação tracionada com o prego ardox, razão pela qual optou-se pela sua utilização nos ensaios dos caibros treliçados em MLP.

6 MATERIAIS E MÉTODOS – EXECUÇÃO E ENSAIO DOS CAIBROS TRELIÇADOS

Definido o arranjo de ligação e o prego a ser utilizado nas emendas das MLPs do caibro treliçado, o prego ardox, foram realizadas a secagem da madeira e posteriormente, a classificação visual e mecânica para a execução dos caibros treliçados, através do método não-destrutivo por ultrassom.

Considerando que a autoconstrução e o mutirão são consideradas alternativas para a produção de habitações de interesse social, optou-se por realizar o ensaio de uma amostra com madeira sem classificar, de modo a abranger mais possibilidades de utilização do sistema estrutural e uma maior disseminação do material.

A Norma brasileira NBR 7190/97 não aborda ensaios de estruturas, apenas de corpos de prova. Desta forma, adotou-se como referência para este estudo as recomendações do anexo B da mesma norma para ensaios com corpos de prova, que estabelece um número mínimo de 6 corpos de prova para ensaios experimentais.

Além das 6 amostras com madeira classificada, foi realizado também o ensaio de um exemplar com madeira não classificada. No total foram ensaiados 7 exemplares de caibros treliçados.

Foi escolhido o prego do tipo ardox por apresentar melhores resultados e menor coeficiente de variação comparado aos demais pregos ensaiados. As ligações do caibro treliçado serão executadas conforme especificado por CADURIN (2013) e a ligação entre as emendas serão conforme especificado no capítulo anterior, distância mínima entre as emendas da MLP de 20 cm, com distribuição de 9 pregos. O projeto da estrutura pode ser visto no apêndice deste trabalho será detalhado neste capítulo.

6.1 Madeira

Para a confecção dos caibros treliçados em MLP, calculou-se para as 06 amostras com madeira classificada um rendimento de aproximadamente 60% de madeira, o mesmo rendimento obtido na confecção dos modelos do ensaio de emendas a tração após descartados os pedaços com defeitos não permissíveis. Para o caibro treliçado com madeira não classificada o rendimento foi de 100%, pois não foi retirado nenhum tipo de defeito.

Foram adquiridos 3 m³ de madeira *Pinus spp*, sendo 2m³ para a confecção das 6 amostras com madeira classificada e 0,2m³ para a amostra com madeira não classificada, com sobra de 0,8m³ para possíveis imprevistos.

Optou-se pela compra da madeira verde para o acompanhamento da secagem na estufa localizada no laboratório de estruturas da Universidade Estadual de Londrina.

Mesmo sendo da mesma floresta e mesmo lote, ainda sem realizar a classificação e medições, era possível observar que as tábuas apresentavam uma grande variação de densidade, devido à grande diferença de peso e quantidade de anéis por polegada medida na linha perpendicular à tangente dos anéis, conforme cita CARREIRA, (2003), (figura 42).



Figura 42 Fotos das tábuas empilhadas no momento da chegada e diferença da quantidade de anéis.

Fonte: Autora.

6.2 Secagem da madeira

A secagem da madeira foi realizada em uma estufa experimental construída no laboratório de estruturas da Universidade Estadual de Londrina, objeto de estudo de projeto de pesquisa. É uma estufa de secagem convencional a baixa temperatura conforme características apresentadas nas figuras 43 e 44.

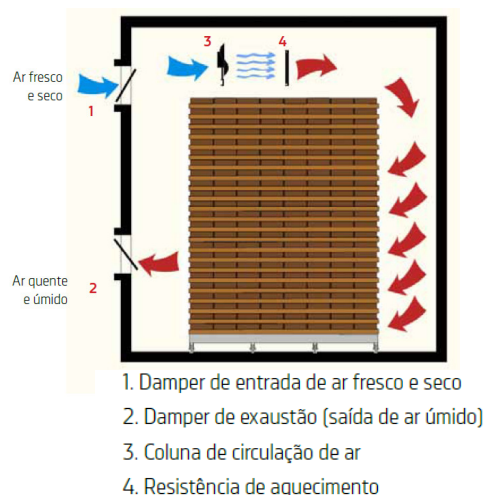


Figura 43 Foto e croqui da Estufa.
Fonte: MOURA *et al.*, (2012).

| CARACTERÍSTICAS DA ESTUFA | |
|--|--|
| MATERIAL | - Paredes e teto: sanduíche de chapas de compensado naval de madeira, espaçadas e estruturadas com pontaletes de Pinus. - Entre as placas: preenchimento com EPS (poliestireno expandido) para isolamento térmico. |
| MEDIDAS | - Dimensões internas: 2,35 m x 4,64 m x 2,50 m (L x P x A). - Altura útil: 1,98 m. |
| CAPACIDADE | - 5 a 7 m ³ de madeira por ciclo. |
| CONTROLADOR | - Digital (marca digisystem) que gerencia a execução de programa de secagem pré-elaborado. |
| CONTROLE | Medidores internos à estufa (termômetro de bulbo seco, termômetro de bulbo úmido) e medidores elétricos de umidade. |
| SISTEMA DE AQUECIMENTO | Resistências elétricas blindadas. |
| SISTEMA DE CIRCULAÇÃO DO AR | Ventilação superior com 12 ventiladores simples, que promovem a circulação do ar entre as peças de madeira na secagem. |
| SISTEMA DE CONTROLE DA UMIDADE RELATIVA (UR) | A umidificação do ar é feita através de um sistema de reservatório d'água com uma resistência elétrica que aquece e vaporiza a água, umedecendo o ambiente. A desumidificação do ar é feita através de um conjunto de dampers ("janelas") que permitem a troca de ar entre o interior do secador e o meio externo. |

Figura 44 Características da Estufa.
Fonte: MOURA *et al.*, (2012).

Para a secagem foram realizados alguns ajustes necessários para o melhor desempenho da estufa com o acompanhamento de profissional especializado. Foram adicionados 6 ventiladores laterais para aumentar a circulação do ar entre as peças de madeira na secagem e adicionados medidores internos com o objetivo de obter maior controle da temperatura.

O sistema microprocessado utilizado para controle da câmara é do fabricante Digisystem Indústria de Sistemas Eletrônicos Ltda., modelo CRG 08 KD/HT. Foi realizado o entabamento de toda a madeira conforme especificação em manual do fabricante e acompanhados os ciclos de secagem de modo a garantir a qualidade da secagem da madeira (quadro 7).

| Espessura da Madeira (mm) | Distância entre os Sarrafos (mm) | Espessura dos Sarrafos (mm) |
|---------------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| 18 a 20 | 300 a 400 | 20 |
| 20 a 35 | 400 a 500 | 25 |
| 40 a 50 | 500 a 600 | 30 |
| 750 a 65 | 700 a 800 | 35 |
| 65 a 80 | 900 | 40 |
| Acima de 80 | 1000 | 45 |

Quadro 7 Tabela com as características dos tabiques para a secagem da madeira de acordo com a sua espessura.

Fonte: Manual Digisystem, 2009.

A madeira apresentou umidade média de 50% e após finalizada a secagem a umidade média foi de 12%. O tempo total de secagem da madeira foi de aproximadamente 10 dias (figura 45).



Figura 45 Foto interna das adaptações da estufa (ventiladores laterais), entabamento, colocação dos medidores de umidade da madeira e medição da umidade.

Fonte: Autora.

6.3 Classificação da madeira

Após a conclusão da secagem, foi realizada a classificação visual e medições de cada peça para cálculo da densidade e MOE.

As tábuas eram retiradas da estufa em grupos de 12 e dispostas sobre cavaletes para a classificação visual e medição das dimensões: comprimento, largura e espessura em 3 secções da peça. Por último foi realizada a pesagem em balança digital modelo C&F (C. Máx. 30 Kg), conforme figura 46 e as tábuas foram empilhadas para posterior transporte ao Laboratório de Maquetes, onde as peças foram cortadas.



Figura 46 Fotos das tábuas sobre cavaletes, classificação visual e pesagem das peças.
Fonte: Autora.

Assim como a madeira utilizada nos modelos, a classificação visual das tábuas para a confecção dos caibros treliçados foi realizada com o Manual de classificação visual de peças estruturais de madeira tipo *Pinus spp* (MOURA et al., 2012).

Para a confecção das tesouras foram tolerados defeitos permissíveis das classes EE e 01, sendo descartados os demais. Outra condicionante considerada na classificação foi o comprimento; peças livres de defeitos, porém, menores que 40cm eram descartadas devido a medida mínima necessária entre as emendas do caibro treliçado.

Para facilitar a classificação visual foi elaborado um gabarito transparente, impresso em acetato, com as medidas dos defeitos de cada classe de acordo com o manual de classificação citado (figura 47).



Figura 47 Fotos do gabarito utilizado na classificação visual.
Fonte: Autora.

As peças eram marcadas com um X nos trechos com defeitos que deveriam ser descartados, enumerados e nomeados quando utilizados, sem defeitos ou com defeitos permissíveis as classe EE e 01, conforme figura 48. Os defeitos permissíveis nas classes EE e 01 podem ser observados na tabela resumida do manual de classificação apresentada no anexo D deste trabalho.

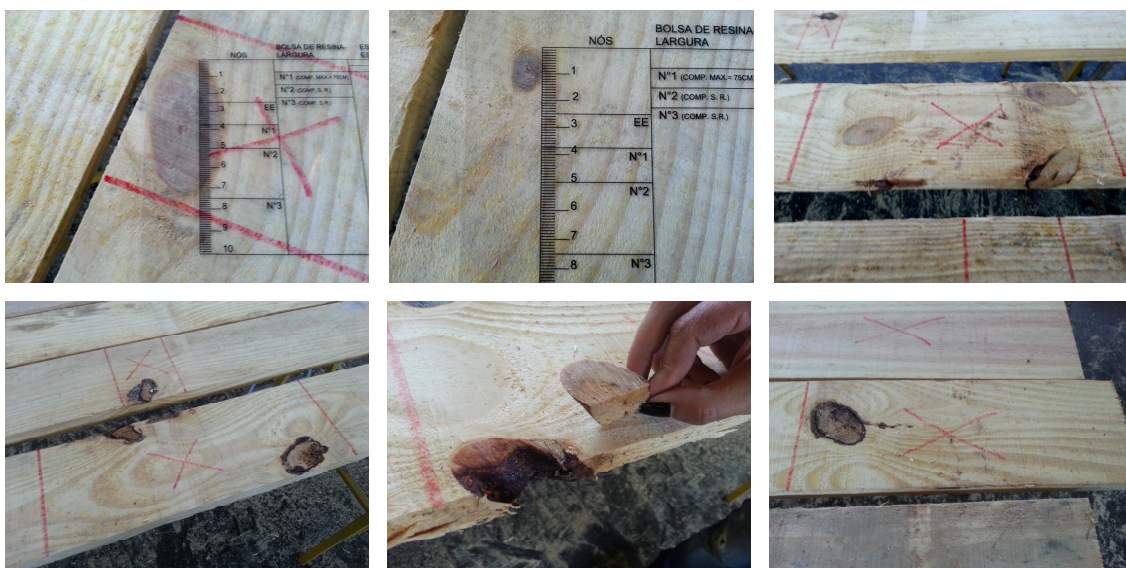


Figura 48 Fotos de defeitos descartados e permitidos de acordo com o manual de classificação.
Fonte: Autora.

De modo a rastrear cada peça de sua origem, as tábuas foram numeradas de 1 a 182 e os pedaços classificados na mesma tábua foram nomeados com letras. Em uma planilha, primeiramente foram anotados os valores das medições realizadas nas tábuas: dimensões, massa e umidade e em uma segunda planilha foram anotados a classe e comprimento de cada trecho a ser utilizado após a classificação visual, conforme apresentado no quadro 8.

| PLANILHA MODELO DAS MEDIÇÕES REALIZADAS NAS TÁBUAS | | | | | | | | | |
|--|-------|------------|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Peças | L (m) | Massa (kg) | Umidade (%) | Seção 1 | | Seção 2 | | Seção 3 | |
| | | | | b1 (cm) | h1 (cm) | b2 (cm) | h2 (cm) | b3 (cm) | h3 (cm) |
| 1 | 3,005 | 7,3 | 13 | 14,7 | 2,5 | 14,7 | 2,2 | 14,9 | 2,4 |
| 2 | 3 | 5,4 | 12 | 15 | 2,3 | 15,1 | 2,4 | 15 | 2,1 |
| 3 | 2,99 | 4,7 | 11 | 14,4 | 2,4 | 14 | 2,5 | 14,4 | 2,5 |
| 4 | 3,004 | 4,9 | 9,3 | 14,2 | 2,2 | 14,2 | 2,5 | 14,3 | 2,3 |

| PLANILHA MODELO DOS TRECHOS APÓS CLASSIFICAÇÃO VISUAL | | | |
|---|----|----|-------|
| Peças | EE | N1 | L (m) |
| 1A | | X | 0,8 |
| 1B | X | | 0,6 |
| 1C | X | | 1 |
| 2A | X | | 0,8 |
| 2B | | X | 0,6 |
| 2C | | X | 1 |
| 3A | X | | 2,33 |
| 4A | | X | 2,2 |

Quadro 8 Planilhas modelo utilizadas para anotação dos dados das tábuas e classificação visual, respectivamente.

Fonte: Autora.

Por fim, as peças ficavam todas demarcadas e cada pedaço recebia a letra ou número conforme sua classificação visual: E para classe estrutural; e 1 para a primeira classe, como por exemplo, 130 AE, 130 B1, etc., apresentado na figura 49.



Figura 49 Peças com as demarcações após a finalização da classificação visual.

Fonte: Autora.

Após transportadas para o Laboratório de maquetes, as peças foram aparelhadas e cortadas de acordo com as marcações da classificação

visual. Foi necessário o aparelhamento uniforme dos dois lados das tábuas para evitar irregularidades e permitir o total contato das peças no momento da montagem da MLP (figura 50).

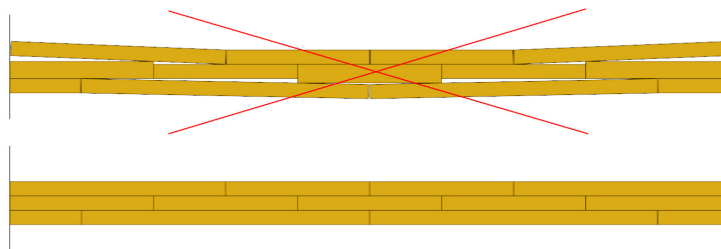


Figura 50 Detalhes do efeito das peças com e sem aparelhamento após a montagem da MLP.

Fonte: Autora.

Após aparelhadas e cortadas, todas as peças foram agrupadas de acordo com comprimentos similares de modo a facilitar a organização para a classificação mecânica por ultrassom.

Foi utilizado para a classificação mecânica o equipamento de ultrassom PUNDIT-6 (Portable Ultrasonic Non Destructive Digital Indicating Test), que mede o tempo decorrido desde a emissão da onda até sua recepção. O tempo gasto no percurso era lido em um mostrador digital do aparelho. Com o tempo de percurso e a distância percorrida pelo pulso (distância entre os transdutores), pôde se obter a velocidade média da onda.

Para a transmissão e recepção do pulso, os transdutores devem estar inteiramente em contato com a superfície, pois a existência de alguma camada de ar introduzirá erro na leitura do tempo, uma vez que o ar transmite apenas uma parcela desprezível de pulso. Para evitar esse problema, foi utilizado gel como acoplante.

O processo de calibração do aparelho foi realizado em uma barra de metal padrão com o tempo de percurso de onda conhecido ($25,7 \mu\text{s}$), como é recomendado pelo fabricante, cada vez que o aparelho era ligado, como apresentado na figura 51.



Figura 51 Processo de calibração do aparelho Pundit 6.
Fonte: Autora.

No momento da medição pelo ultrassom as peças de madeira foram colocadas sobre uma placa de isopor para isolamento da superfície e os transdutores de 5 cm de diâmetro foram dispostos na superfície pelo método indireto, na duas extremidades da peça (figura 52). Neste momento também foi realizada a contagem dos anéis de crescimento de cada peça.



Figura 52 Fotos das peças agrupadas conforme comprimentos e medição pelo ultrassom.
Fonte: Autora.

Os valores da velocidade das ondas eram anotados em planilha e com o comprimento e densidade de cada peça, foi possível calcular o módulo de elasticidade MOE, conforme quadro 9.

| Peças | L (m) | μs | s | V (m/s) | ρ (kg/m ³) | MOE (MPa) |
|-------|-------|---------|----------|---------|-----------------------------|-----------|
| 1A | 0,8 | 188 | 0,000188 | 4255,32 | 741,33 | 13423,82 |
| 1B | 0,6 | 160 | 0,000160 | 3750,00 | 741,33 | 10424,96 |
| 1C | 1 | 238 | 0,000238 | 4201,68 | 741,33 | 13087,54 |
| 2A | 0,8 | 186 | 0,000186 | 4301,08 | 754,89 | 13964,81 |
| 2B | 0,6 | 138 | 0,000138 | 4347,83 | 754,89 | 14270,05 |
| 2C | 1 | 310 | 0,000310 | 3225,81 | 754,89 | 7855,21 |
| 3A | 2,33 | 692 | 0,000692 | 3367,05 | 693,54 | 7862,73 |
| 4A | 2,2 | 532 | 0,000532 | 4135,34 | 795,44 | 13602,88 |

Quadro 9 Planilha modelo utilizada para o cálculo do módulo de elasticidade (MOE).
Fonte: Autora.

6.4 Critério de escolha das peças que compõem o Caibro Treliçado

Com os comprimentos resultantes da classificação visual e valores do MOE dinâmico determinados pela classificação não destrutiva pelo método de ultrassom, elaborou-se uma planilha para distribuição das peças nos caibros treliçados. Foi necessário fazer uma distribuição de tal modo que todos os caibros treliçados tivessem características similares, com as emendas das camadas externas nos mesmos locais e com uniformidade de MOE da madeira. Na camada interna não há emendas, apenas tábuas inteiras para compor os elementos da peça, como apresentado na figura 53.

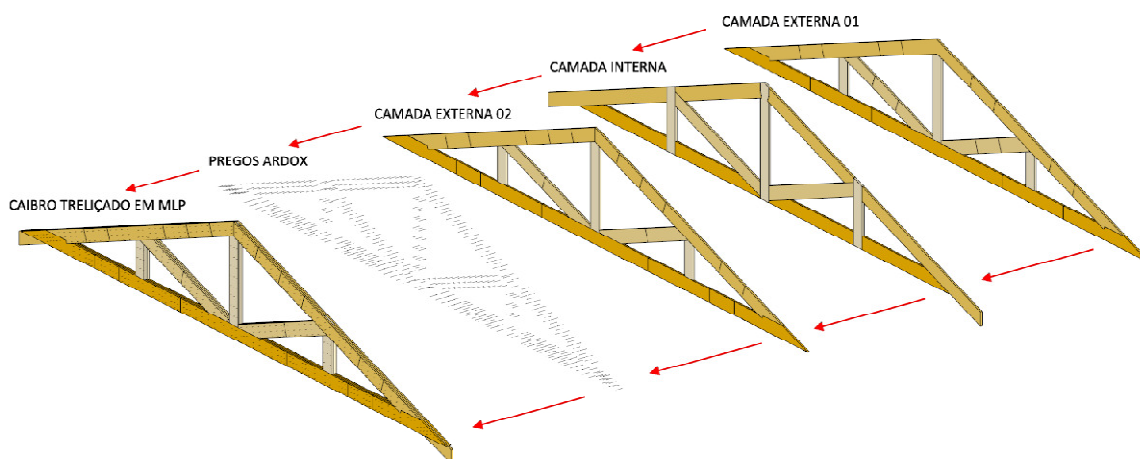


Figura 53 Croqui da composição do Caibro treliçado em MLP.
Fonte: Autora.

As peças apresentaram grande variabilidade de densidade e MOE, o que dificultou a distribuição uniforme nos caibros treliçados. O agrupamento e distribuição foram realizados em etapas:

- 1) Foram distribuídas as peças e emendas de acordo com os comprimentos originados da classificação visual. A maioria das peças apresentaram pequenos comprimentos, como, 40cm, 50cm, 60cm e 70 cm, e desta forma, foi necessário fazer um grande número de emendas, como apresentado na figura 54.

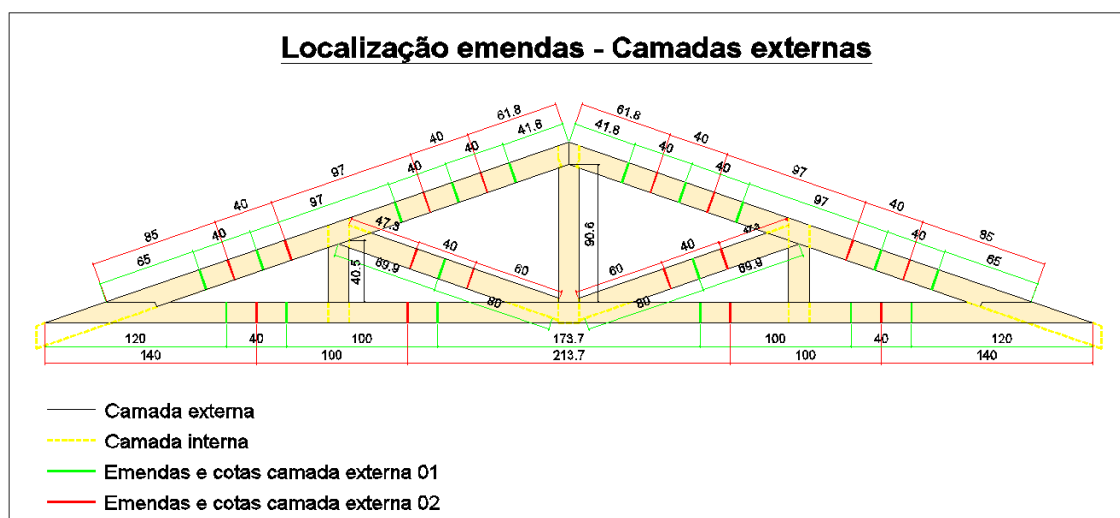


Figura 54 Croqui com a localização das emendas nas camadas externas.
Fonte: Autora.

- 2) Após determinados os comprimentos das peças e localizadas as emendas das três camadas do caibro treliçado, foram separadas as peças do banzo inferior, local de maior esforço a tração, com o objetivo de agrupar peças com menor variação do MOE. Após distribuição em planilha, o MOE das peças do banzo inferior apresentou uma variação de 8000 MPa a 14000 MPa e as peças foram distribuídas com a mesma média de variação e mesmo desvio padrão entre os 6 exemplares de caibros treliçados.
- 3) As peças dos banzos superiores, montantes e diagonais, apresentaram alta variação de MOE, porém, com média, desvio padrão e coeficiente de variação, similares. Foram distribuídas de acordo com os comprimentos necessários, conforme quadro 10.

| BANZO INFERIOR | | | | | | |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| PEÇAS (COMP.) | MOE (Mpa) | | | | | |
| | AMOSTRA 01 | AMOSTRA 02 | AMOSTRA 03 | AMOSTRA 04 | AMOSTRA 05 | AMOSTRA 06 |
| PEÇA (2,137 m) | 9001,7 | 13634,4 | 10756,5 | 13363,8 | 12784,9 | 13112,7 |
| PEÇA (1,737 m) | 12101,0 | 10121,4 | 13673,6 | 9605,4 | 12179,9 | 14162,0 |
| PEÇA (1,443 m) | 9408,6 | 9430,9 | 8408,6 | 8770,5 | 8408,6 | 8476,3 |
| | 14046,3 | 13916,0 | 13571,3 | 13295,3 | 12434,3 | 11281,7 |
| PEÇA (1,40 m) | 8093,6 | 8093,6 | 8604,2 | 8604,2 | 11069,3 | 10505,6 |
| | 12275,0 | 12275,0 | 11708,7 | 11708,7 | 11069,3 | 10505,6 |
| PEÇA (1,385 m) | 8374,8 | 9256,4 | 9256,4 | 8878,3 | 8374,8 | 9603,5 |
| | 9603,5 | 12151,0 | 12151,0 | 13671,7 | 14309,2 | 14309,2 |
| PEÇA (1,20 m) | 11905,4 | 10627,3 | 9176,1 | 8631,3 | 11767,8 | 8002,5 |
| | 14864,4 | 14790,1 | 13436,3 | 12422,2 | 12114,2 | 12047,9 |
| PEÇA (1m) | 9193,4 | 9092,4 | 8377,2 | 8317,6 | 8094,4 | 8728,6 |
| | 11420,6 | 10071,0 | 10120,6 | 10928,0 | 8088,8 | 10960,3 |
| | 13782,8 | 13646,5 | 13202,9 | 13189,8 | 12813,5 | 11854,7 |
| | 14481,8 | 14601,7 | 14780,4 | 14796,1 | 14887,6 | 14937,8 |
| MÉDIA | 11663,0 | 11389,2 | 11232,6 | 11318,3 | 11941,0 | 11121,0 |
| DV | 2377,991 | 2284,625 | 2261,01 | 2309,713 | 2269,742 | 2224,703 |
| CV | 20,38916 | 20,05962 | 20,12903 | 20,4068 | 19,00798 | 20,00453 |

Quadro 10 Planilha modelo da distribuição das peças de acordo com o MOE.
Fonte: Autora.

A idéia subjacente desta distribuição de peças era a de fazer com que os exemplares tivessem propriedades mecânicas tão próximas quanto possíveis, portanto, com comportamento estrutural semelhante e conseqüentemente, comparáveis.

6.5 Etapas de montagem dos Caibros treliçados

A montagem foi realizada no Laboratório de Maquetes pelo técnico carpinteiro da Universidade. O primeiro caibro treliçado montado foi com madeira não classificada, pois caso houvesse algum imprevisto, as madeiras não eram classificadas e poderiam ser facilmente repostas. Esta primeira amostra serviu como protótipo e gabarito para a montagem dos demais caibros treliçados.

Foi impresso em papel o desenho da peça na escala real para auxiliar na montagem da primeira amostra e corte das peças com topo em ângulo (figura 55).



Figura 55 Fotos da montagem do primeiro Caibro treliçado em MLP.
Fonte: Autora.

Na execução do primeiro caibro treliçado houve um grande cuidado com o destopo angular das peças, pois elas serviram de molde para o corte das demais amostras e todas deveriam apresentar encaixe bem ajustado (figura 56). Com relação às peças retangulares, era importante o corte ortogonal ao eixo da peça para que as superfícies a serem emendadas se tocassem em sua totalidade.



Figura 56 Fotos do momento do encaixe das peças do Caibro treliçado.
Fonte: Autora.

Finalizada a montagem da primeira amostra e as peças todas encaixadas, procedeu-se ao corte das demais utilizando estas peças como gabarito. As laminas foram destopadas e enumeradas de 1 a 6 de acordo com o MOE pré estabelecido. Desta forma, todas as peças estavam prontas e rastreadas para a montagem e posterior pregação das demais amostras (figura 57).



Figura 57 Fotos das peças organizadas já cortadas no formato final para montagem.
Fonte: Autora.

De modo a auxiliar na pregação das MPLs, foram elaborados gabaritos em MDF dos diferentes arranjos das ligações, conforme apresentado na figura 58.



Figura 58 Fotos da elaboração e utilização do gabarito.
Fonte: Autora.

Para as ligações da estrutura foram utilizados os arranjos determinados através de dimensionamento por CADURIN, com referência na EUROCODE 5 (figura 59).

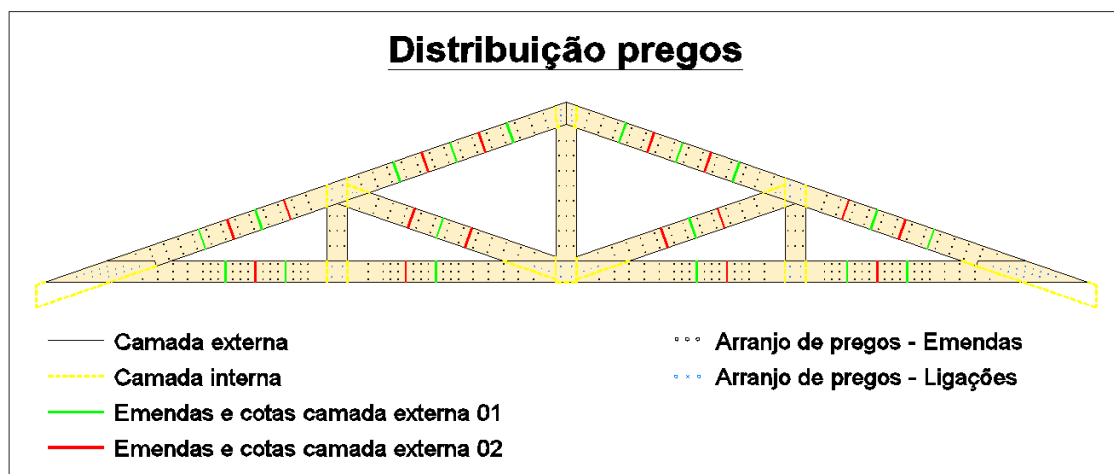


Figura 59 Croqui da distribuição de pregos do Caibro treçado.
 Fonte: Autora.

Para as ligações entre as emendas distanciadas a cada 20 cm os pregos foram dispostos em 2 arranjos:

- Para o banzo inferior da MLP o arranjo foi o mesmo utilizado no ensaio em modelos, anteriormente descrito: 9 pregos distribuídos em 3 linhas e 3 colunas distanciados a cada 5cm;
- Para as emendas localizadas nos banzos superiores, montantes e diagonais, o dimensionamento conforme NBR 7190/97 apontou 1 prego a cada 4,4 cm. Desta forma, foi retirada uma coluna de pregos que foram distribuídos em 3 linhas e 2 colunas distanciados a cada 5 cm entre as linhas e 10 cm entre as colunas, como representado na figura 60.

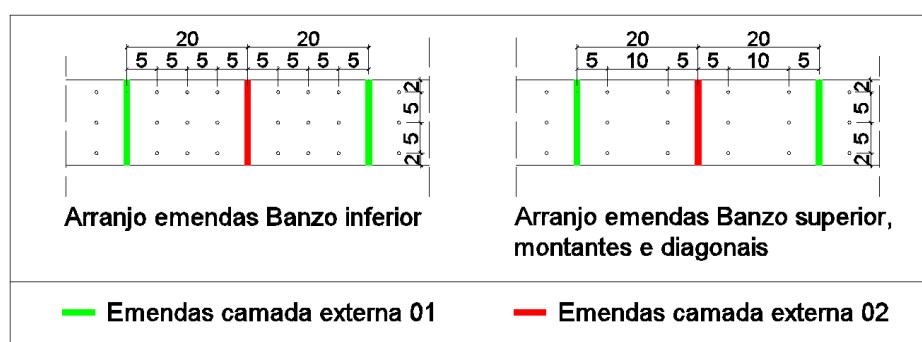


Figura 60 Croqui dos 2 arranjos de pregos das emendas.
 Fonte: Autora.

Foi realizada a pré-furação de acordo com a norma NBR 7190/97 (diâmetro mínimo de $0,85 d_{ef}$, sendo d_{ef} o diâmetro efetivo em milímetros), conforme apresentado na figura 61.



Figura 61 Fotos da utilização do gabarito, montagem/pré-furação das peças e MLP após pregação.
Fonte: Autora.

O primeiro Caibro treliçado serviu para a execução de um gabarito para montagem dos demais seis exemplares. O gabarito foi executado sobre bancada em madeira com o formato exato do Caibro treliçado (figura 62).



Figura 62 Fotos do gabarito executado para a execução das 6 amostras.
Fonte: Autora.

Após concluída a execução, as amostras foram transpostas ao Laboratório de Estruturas para a realização do ensaio destrutivo. Cada exemplar pesava aproximadamente 75 Kg e para o seu transporte foi executado um carrinho em madeira com 4 rodízios, conforme figura 63.



Figura 63 Fotos dos Caibros treliçados nos laboratórios e carrinho para transporte.
Fonte: Autora.

6.6 Aparelhos utilizados e instrumentação para o ensaio estrutural do sistema Caibro treliçado

O ensaio destrutivo dos caibros treliçados foi realizado em um pórtico metálico no laboratório de estruturas da Universidade, devido a sua capacidade para suportar as cargas previstas, possibilidade de fixação do caibro treliçado, dos equipamentos de aplicação de carga e dos travamentos laterais necessários para garantir o contraventamento da amostra.

O caibro treliçado era içado, erguido pela talha e apoiado nas extremidades em barras horizontais do pórtico metálico, com travamentos laterais em madeira, de modo a impedir o seu deslocamento. (figura 64)

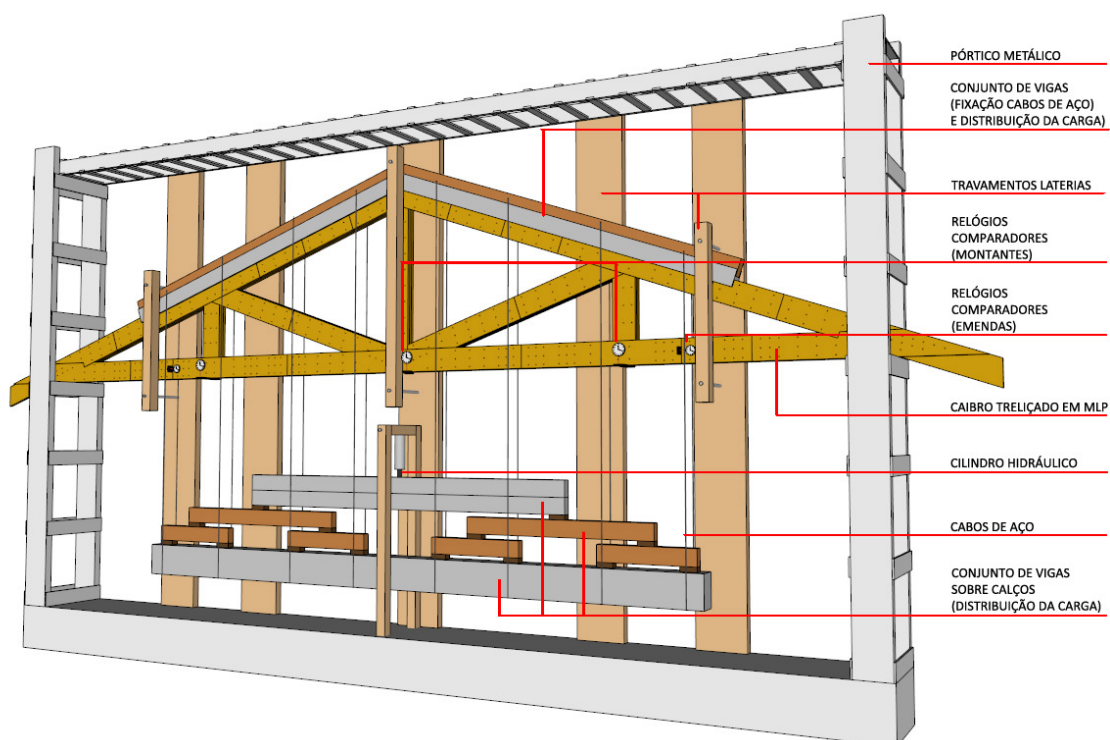


Figura 64 Croqui com as especificações dos instrumentos e equipamentos utilizados no ensaio destrutivo do Caibro treçado em MLP.
 Fonte: Autora.

A Norma determina que os apoios devem ser articulados móveis. Para o ensaio foi apoiada uma barra metálica sobre perfil circular metálico de modo a permitir o deslocamento e rotação da amostra no momento da aplicação da carga, conforme figura 65.



Figura 65 Croqui e foto do apoio dos caibros treçados no ensaio.
 Fonte: Autora

Para garantir que as cargas nos cabos de aço fossem igualmente distribuídas, foi elaborado um sistema de aplicação de cargas composto por um conjunto de vigas de madeira e vigas metálicas apoiadas sobre calços de pequenas proporções em 8 pontos sobre a viga metálica de maior

comprimento envolvida pelos cabos de aço. Apoiada sobre o banzo superior uma viga metálica era responsável pela distribuição da carga e sobre ela, uma viga de madeira fixava os cabos de aço, conforme figura 66.

Antes de serem penduradas, foram pesadas todas as vigas metálicas e de madeira com auxílio de uma balança com precisão de 0,1 kg. O conjunto de vigas utilizado para a aplicação da carga apresentou massa total de 216 Kg, conforme indicado na figura 66. Essa massa total foi somada na carga de ruptura das amostras e a medição dos deslocamentos ao longo do ensaio foi realizada a partir dessa carga.

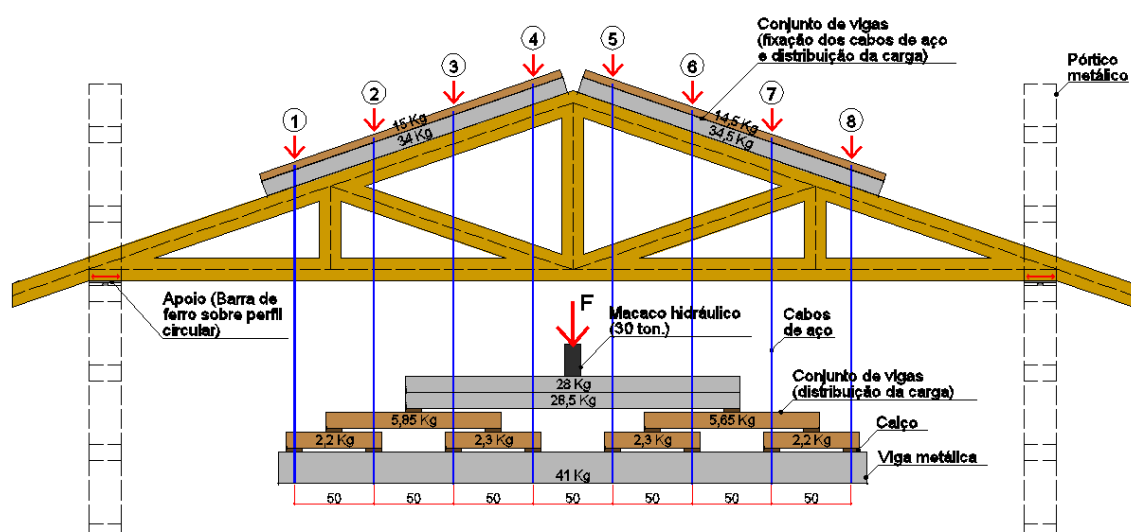


Figura 66 Indicação dos 8 pontos de aplicação da carga, dos pesos do conjunto de vigas e modo de aplicação da carga para o ensaio de ruptura do Sistema Caibro treliçado em MLP.

Fonte: Autora

Foi executado um pórtico em madeira para a fixação do sistema de aplicação da carga, o cilindro hidráulico da marca Enerpac, modelo RCH306 com capacidade de 30 toneladas (figura 67).

Para a verificação dos deslocamentos foram instalados relógios comparadores. No ensaio das duas primeiras amostras foram colocados 3 relógios comparadores para a medição da flecha, um embaixo do montante central e dois embaixo dos montantes laterais. Tendo sido observado que nos dois primeiros ensaios a ruptura ocorreu na mesma ligação entre as emendas, a

partir da terceira tesoura foram colocados 2 relógios comparadores nas emendas, um em cada lado do caibro treliçado (figura 67 e 68).



Figura 67 Foto do Caibro treliçado instrumentalizado para o ensaio. Em destaque a localização dos 5 relógios comparadores.
Fonte: Autora.

Os relógios comparadores sob os montantes foram instalados no sentido vertical e são da marca Mitutoyo, código 3058S-19, capacidade 0-50mm e resolução 0,01mm. Os relógios comparadores utilizados para medir os deslocamentos das emendas foram instalados no sentido horizontal e são da marca Mitutoyo, código 2046S, capacidade de 0-10mm e resolução 0,01mm.



Figura 68 Fotos dos relógios comparadores instalados.
Fonte: Autora.

A aplicação da carga pela bomba hidráulica foi medida por um manômetro analógico da marca MAKIL, com capacidade 0-200 kgf/cm², aproximadamente 9,3 toneladas (figura 69).



Figura 69 Fotos do local do ensaio, cilindro hidráulico, bomba hidráulica e manômetro.
Fonte: Autora.

Antes de iniciar os ensaios foi realizada a aferição do manômetro. O valor obtido na leitura do manômetro era multiplicado por $46,6\text{cm}^2$, área efetiva do cilindro atuador hidráulico, como pode ser observado na figura 70.

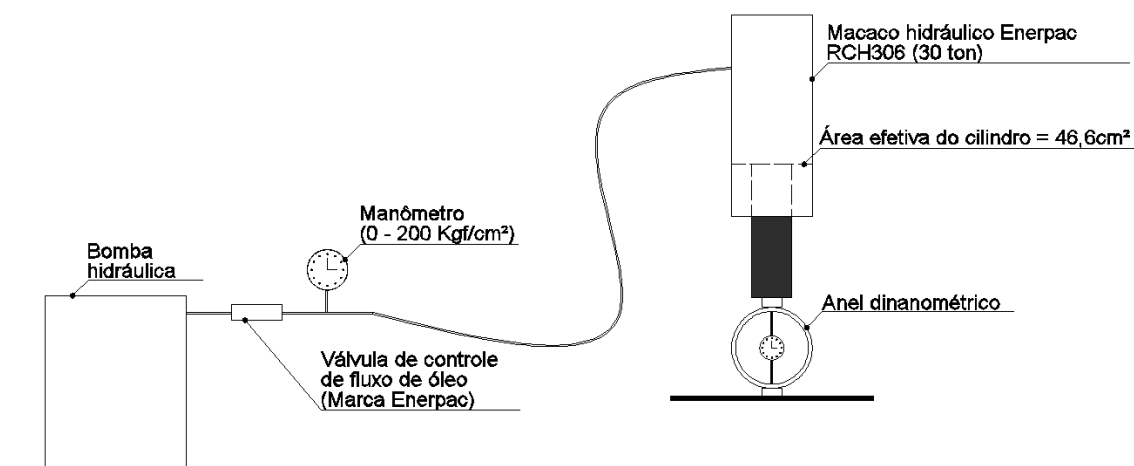


Figura 70 Esquema de aplicação de carga para aferição do manômetro.
Fonte: Autora.

Após várias leituras da deformação do anel dinamométrico, foi elaborado o gráfico apresentado na figura 71. Pelo gráfico pode-se perceber a excelente correlação entre a leitura do manômetro e a carga registrada no anel. A leitura do manômetro foi equivalente a 0,9696 leitura do anel dinamométrico. A equação (3) de ajuste da leitura do manômetro foi:

$$F_{man} = 0,9696F_{anel} \quad (\text{eq. 3})$$

Sendo :

F_{man} é a leitura do manômetro

F_{anel} é a carga registrada no anel

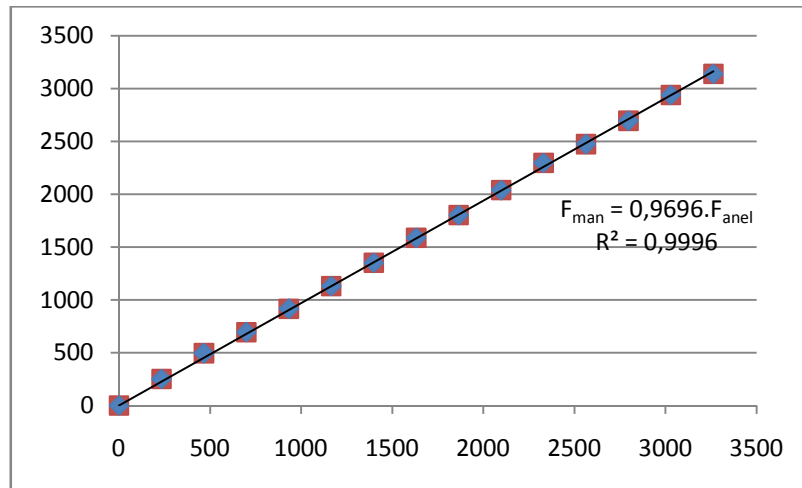


Figura 71 Gráfico com valores da aferição do manômetro.
Fonte: Autora.

6.7 Carga estimada

No caso deste trabalho, supôs-se que a maior fragilidade ocorreria na ligação entre as emendas dos seus banzos inferiores e para estimar a carga de ruptura das 7 amostras foi considerado os resultados obtidos no ensaio a tração da ligação entre as emendas realizado em modelos na primeira fase da investigação.

A média do esforço nas emendas dos modelos com prego ardox foi de aproximadamente 43 kN. Foram realizadas algumas simulações numéricas através do software Ftool de modo a encontrar a carga aplicada para obter o esforço aproximado de 43 kN na barra tracionada, e a carga encontrada foi de aproximadamente 30 kN, conforme diagrama da figura 72.

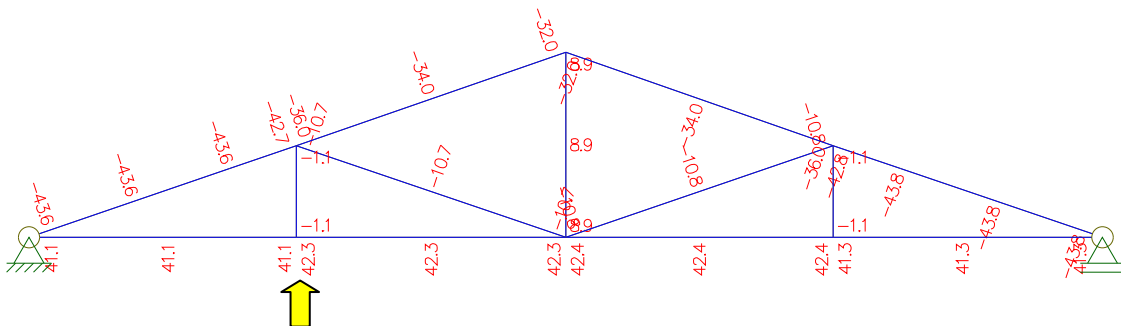


Figura 72 Diagrama de esforços normais (em KNm) com aplicação de 30 kN.
Fonte: Autora.

Não obstante no ensaio da primeira amostra, a ruptura ocorreu com carregamento de 56,38 kN. Desta forma, para o ensaio das demais amostras foi feita a correção da carga estimada para 50 kN.

Os fenômenos ocorridos no ensaio estrutural do sistema proposto são de natureza complexa inserindo variáveis ainda desconhecidas para uma aproximação mais precisa através da simulação numérica. Desta forma, tornou-se necessário a confirmação da carga de ruptura através do ensaio experimental da primeira amostra.

6.8 Carregamento no ensaio

A norma brasileira não aborda ensaio de estruturas, desta forma, foram considerados no ensaio, os procedimentos adotados para corpos de prova, conforme anexo B da NBR 7190/97.

Conhecida a resistência estimada da amostra $f_{t0,est}$, igual a 50kN, o carregamento foi aplicado com dois ciclos de carga e descarga, 10 e 50%. O último ciclo levou a peça à ruptura, como pode ser observado na figura 73. O carregamento foi monotônico crescente com uma taxa aproximada de 6 MPa por minuto, menor do que o estabelecido pela norma (10 MPa por minuto).

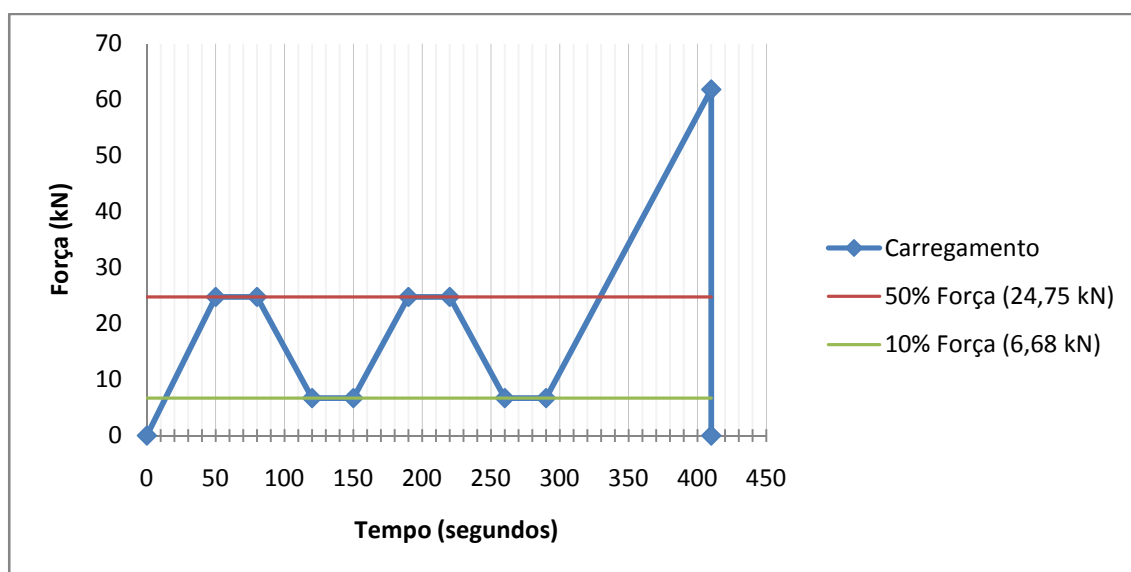


Figura 73 Gráfico do carregamento padrão realizado no ensaio dos caibros treliçados.
Fonte: Autora.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO - ENSAIO DOS CAIBROS TRELICADOS

A figura 74 mostra a evolução da carga com o tempo de ensaio das amostras 02 e 06 respectivamente após um nível de carregamento acima de 47,35 kN. Pode-se perceber um nível acentuado de plastificação com pequenas quedas da carga registrada. Após estes eventos ainda se observa um aumento gradual da carga até a ruptura final. Este comportamento foi comum a todas as amostras e demonstra rupturas parciais ocorridas na peça até a sua ruptura final.

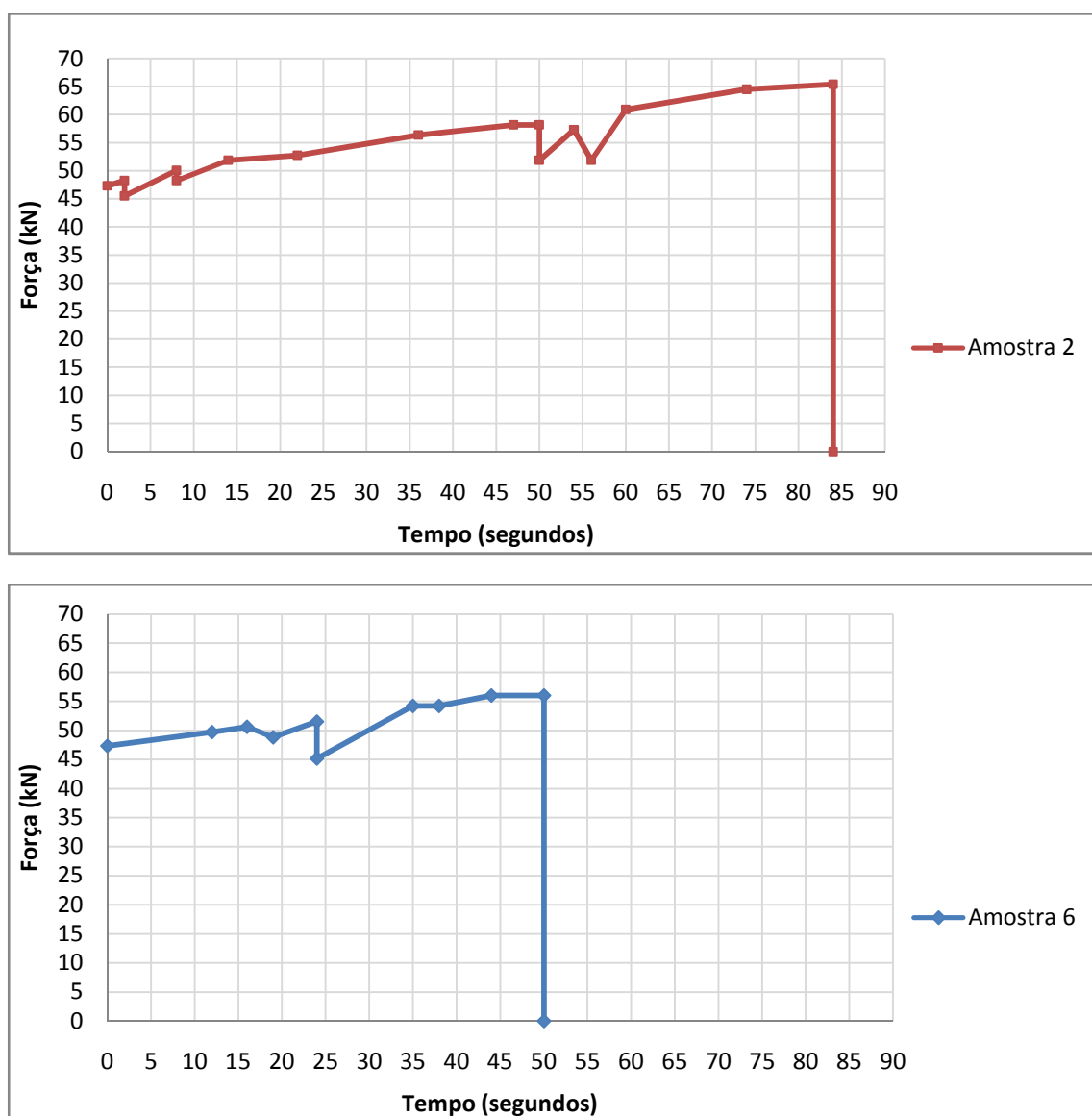


Figura 74 Evolução da carga no final do terceiro ciclo (após carregamento de 47,35 kN) das amostras 2 e 6.

Fonte: Autora.

Os resultados de carga de ruptura podem ser vistos no quadro 11. É possível observar os altos valores da carga de ruptura com média de 60 kN e a baixa variabilidade dos resultados, com coeficiente de variação de 7,5%.

| ENSAIO DE RUPTURA | | | | | | | | | | |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| Amostras | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | S/C | MÉDIA | DP | CV |
| Carga ruptura (kN) | 56,38 | 65,41 | 51,86 | 63,15 | 60,89 | 58,18 | 61,80 | 60,89 | 4,56 | 7,5% |

Quadro 11 Carrega de ruptura apresentada no ensaio destrutivo das amostras.
Fonte: Autora.

Em todas as amostras a ruptura ocorreu na ligação entre as emendas das lâminas de composição do banzo inferior, na barra tracionada, e após sua ruptura rompia-se a barra do banzo superior, conforme indicação na figura 75. Como esperado as peças se aproximavam na barra do banzo superior devido ao esforço de compressão e no banzo inferior as peças se afastavam devido ao esforço de tração.

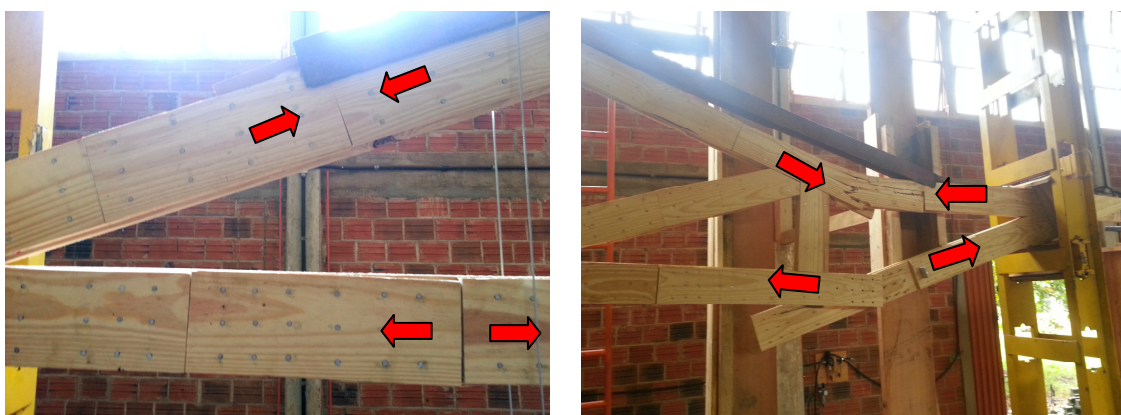


Figura 75 Fotos do deslocamento das emendas durante o ensaio e após a ruptura.
Fonte: Autora.

Ao analisar o local da ruptura das amostras indicado na figura 76, observa-se que a ruptura ocorreu na emenda mais próxima aos montantes laterais.

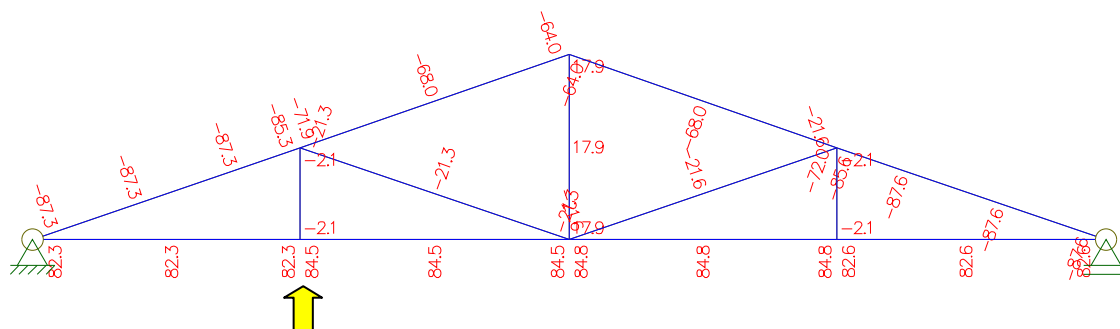


Figura 78 Diagrama de esforços normais (em KNm) com aplicação de 60 kN.
Fonte: Autora

Quanto aos modos de ruptura, verificou-se que, após excessiva deformação dos pregos, a ruptura acontecia de duas maneiras: 1) pelo esmagamento da matriz de madeira em torno dos pregos com afundamento das cabeças e desprendimento das camadas da MLP; 2) pelo cisalhamento longitudinal da camada externa e/ou camada central. Cada tipo de ruptura está apresentado e indicado no quadro 12.

| MODOS DE RUPTURA DAS AMOSTRAS | | |
|-------------------------------|---------------------------|---|
| AMOSTRA 1 | FOTOS DO LOCAL DA RUPTURA |  |
| | MODO DE RUPTURA | Afundamento das cabeças dos pregos com desprendimento das camadas da MLP |
| AMOSTRA 2 | FOTOS DO LOCAL DA RUPTURA |  |
| | MODO DE RUPTURA | Afundamento das cabeças dos pregos com desprendimento das camadas da MLP e cisalhamento longitudinal da camada externa. |
| AMOSTRA 3 | FOTOS DO LOCAL DA RUPTURA |  |
| | MODO DE RUPTURA | Afundamento de parte das cabeças dos pregos com desprendimento das camadas da MLP e cisalhamento longitudinal da camada externa e camada central. |

| | | |
|----------------|---------------------------|---|
| AMOSTRA 4 | FOTOS DO LOCAL DA RUPTURA |  |
| | MODO DE RUPTURA | Afundamento das cabeças dos pregos com desprendimento das camadas da MLP e cisalhamento longitudinal da camada externa. |
| AMOSTRA 5 | FOTOS DO LOCAL DA RUPTURA |  |
| | MODO DE RUPTURA | Afundamento das cabeças dos pregos com desprendimento das camadas da MLP e cisalhamento longitudinal da camada externa. |
| AMOSTRA 6 | FOTOS DO LOCAL DA RUPTURA |  |
| | MODO DE RUPTURA | Cisalhamento longitudinal da camada externa e camada central. |
| AMOSTRA S/C | FOTOS DO LOCAL DA RUPTURA |  |
| | MODO DE RUPTURA | Cisalhamento longitudinal da camada externa. |

Quadro 12 Fotos do local da ruptura e descrição do modo de ruptura de cada amostra.
Fonte: Autora.

Algumas mudanças no arranjo da ligação entre as emendas poderiam ser realizadas de modo a evitar ou diminuir o afundamento da cabeça dos pregos e conseqüente cisalhamento longitudinal das camadas, tais como a distribuição alternada dos pregos ou a realização da cravação dos pregos de forma intercalada, metade de cada lado.

Foi elaborado o gráfico comparativo das curvas carga x deslocamento no centro do vão das 7 amostras até a aplicação de carga de 47,35 kN, momento da retirada dos relógios comparadores. Todas apresentaram o mesmo comportamento de deformação, com redução de deslocamento após o

1º ciclo de acomodação da estrutura, aproximadamente 25 kN, 50% da carga de ruptura estimada (figura 79).

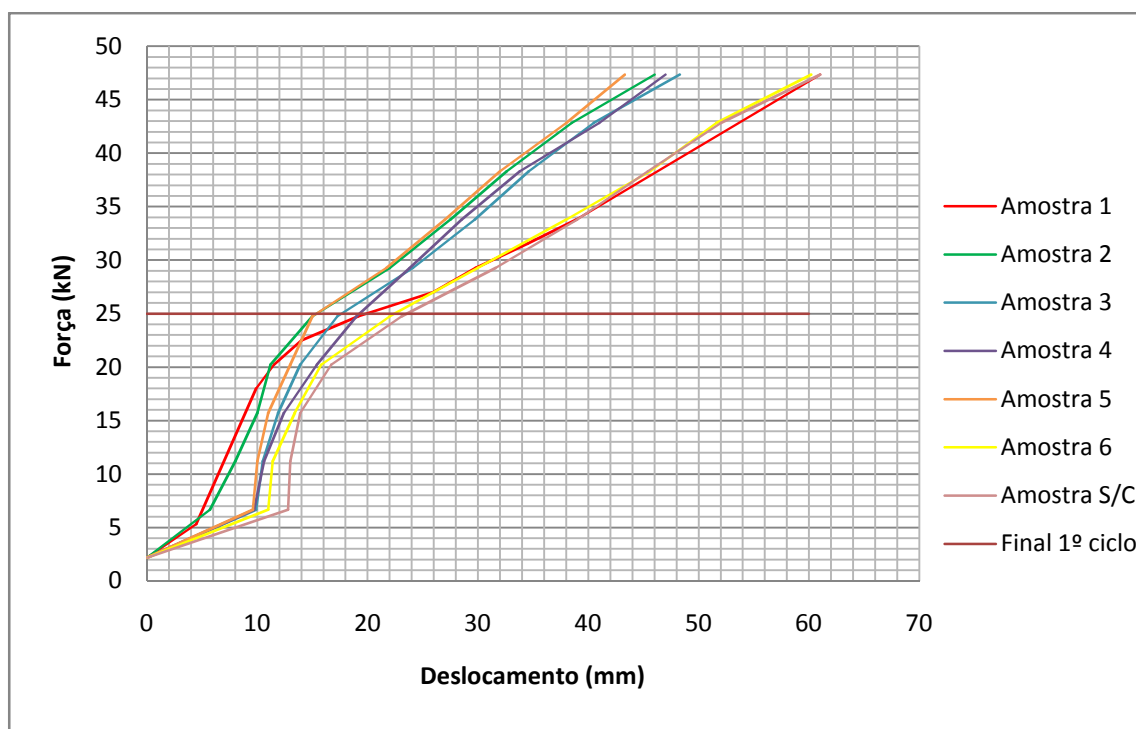


Figura 79 Curva Carga X Deslocamento no centro do vão (até carregamento de 47,35 kN).
Fonte: Autora.

Através da figura 79 é possível se obter o coeficiente de rigidez (K) na fase elástica de deformação, conforme equação (4):

$$K = \Delta P / \Delta \delta \quad (\text{eq. 4})$$

Sendo:

ΔP = Variação da força aplicada;

$\Delta \delta$ = Variação do deslocamento ocorrido.

Há uma similaridade no comportamento das curvas, todas apresentam uma bilinearidade, conforme ilustrado na figura 80. Em regime elástico, até aproximadamente 25 kN (50% da Carga efetiva), a inclinação da curva se diferencia do segundo ciclo que vai até a ruptura. Essa diferença de inclinação indica que há maior rigidez no primeiro ciclo quando comparada ao segundo ciclo, após a acomodação das amostras.

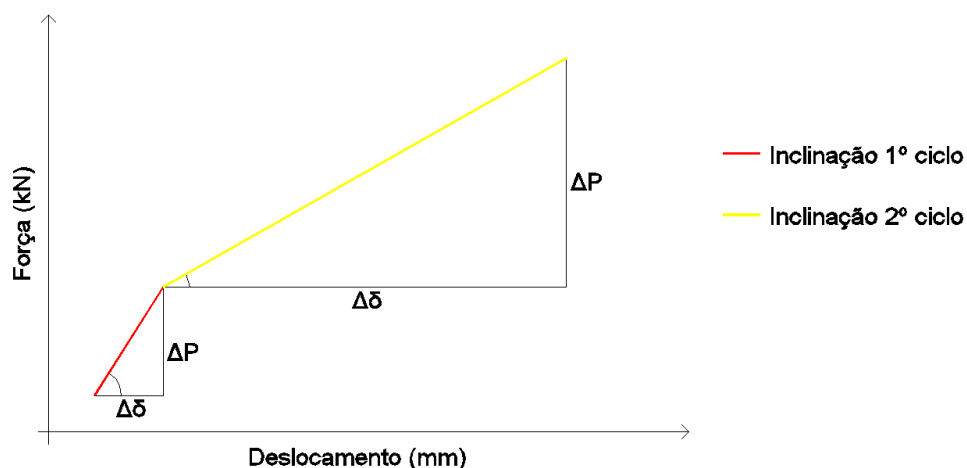


Figura 80 Esquema representativo do comportamento das curvas dos resultados obtidos no ensaio dos caibros treliçados em regime elástico até 47,35 kN.

Fonte: Autora.

Os valores de K (coeficiente de rigidez) de cada amostra para os dois ciclos estão apresentados no quadro 13. Eles demonstram que em geral as amostras apresentaram maior rigidez no primeiro ciclo.

Todas as amostras apresentaram valores de K próximos, com baixo coeficiente de variação. Cabe observar que a amostra com madeira sem classificar apresentou o menor valor de K no primeiro ciclo, próximo a amostra 6. Já no segundo ciclo, a amostra 1 apresentou o menor valor e a amostra com madeira sem classificar se assemelhou a amostra 6 mantendo-se entre os valores mais baixos e demonstrando assim menor rigidez.

| VALORES DE K DAS AMOSTRAS | | | | | | | |
|---------------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|--------------|-------------|-------------|
| | ΔP 1 (kN) | $\Delta \delta$ 1 (m) | ΔP 2 (kN) | $\Delta \delta$ 2 (m) | K1 (kN/m) | K2 (kN/m) | |
| Amostra 1 | 23 | 0,019 | 24 | 0,042 | 1211 | 571 | |
| Amostra 2 | 23 | 0,015 | 24 | 0,031 | 1533 | 774 | |
| Amostra 3 | 23 | 0,017 | 24 | 0,031 | 1353 | 774 | |
| Amostra 4 | 23 | 0,019 | 24 | 0,028 | 1211 | 857 | |
| Amostra 5 | 23 | 0,015 | 24 | 0,028 | 1533 | 857 | |
| Amostra 6 | 23 | 0,022 | 24 | 0,038 | 1045 | 632 | |
| Amostra s/c | 23 | 0,023 | 24 | 0,038 | 1000 | 632 | |
| | | | | | Média | 1269 | 728 |
| | | | | | DP | 214 | 116 |
| | | | | | CV | 5,91 | 6,27 |

Quadro 13 Valores de coeficiente de rigidez (K) das amostras para os dois ciclos de carregamento.

Fonte: Autora.

Para representar o comportamento global da estrutura, as curvas de deslocamentos foram obtidas de acordo com as medidas sob os montantes laterais e central do vão do banzo inferior no momento da aplicação da carga de serviço, de aproximadamente 6 kN. A NBR 7190/97 determina que a flecha de serviço deve ser menor que $L/200$ e na revisão da Norma, propõe-se que deva ser menor que $L/300$. Considerando que o vão da estrutura é de aproximadamente 6000 mm, a flecha limite com a aplicação da carga de serviço deve ser menor ou igual a 30 mm para a Norma em vigor e 20 mm no texto em revisão. Na figura 81 é possível observar que as flechas de todas as amostras não ultrapassaram 1,4cm.

A amostra 1 apresentou os menores deslocamentos, fato ocorrido possivelmente por ter sido a primeira peça a ser ensaiada com cargas aplicadas nos primeiros ciclos, inferiores as das demais amostras. Obteve-se igualmente que a amostra com madeira sem classificar mostrou maiores deslocamentos.

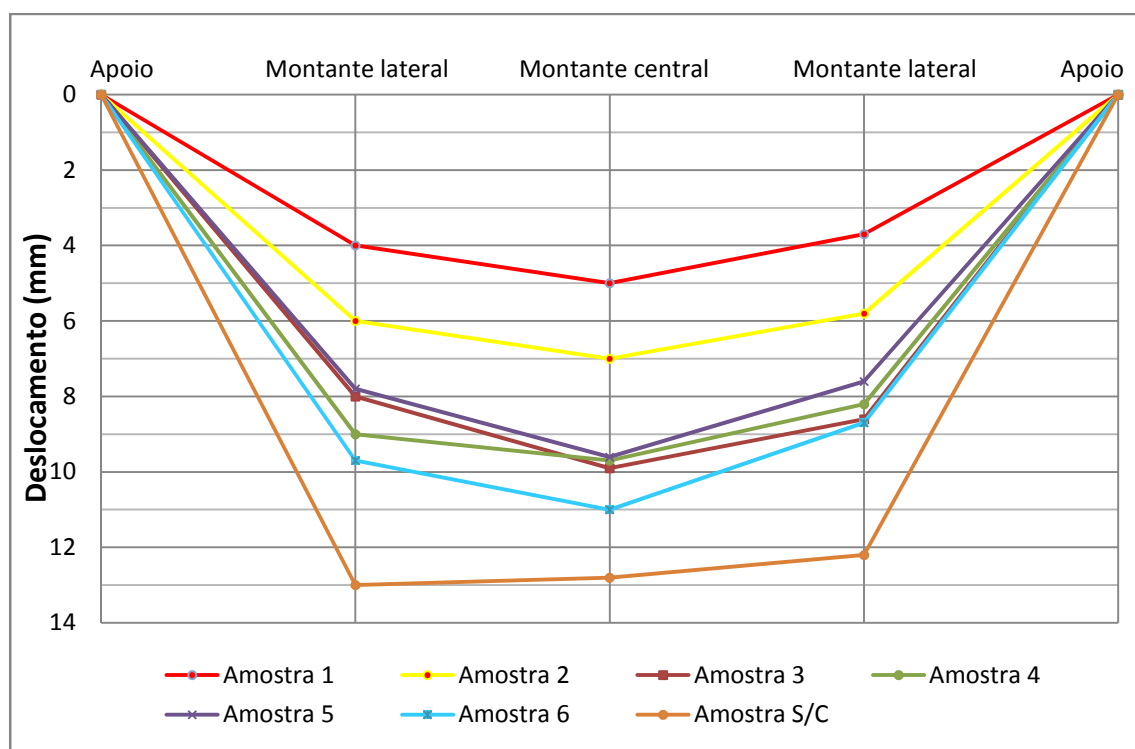


Figura 81 Curva de deslocamento das 7 amostras - Carga de serviço (6 kN).
Fonte: Autora.

Em todos os casos o estado último de serviço ocorreu pelo limite da flecha. A figura 82 apresenta a carga em que cada amostra obteve a flecha limite de 30 mm (L/200) e 20 mm (L/300), restrições das Normas em vigor e em revisão, respectivamente. Para a flecha de 30 mm a carga ficou entre 29 e 35 kN; e para a flecha de 20 mm a carga ficou entre 22,50 e 27 kN.

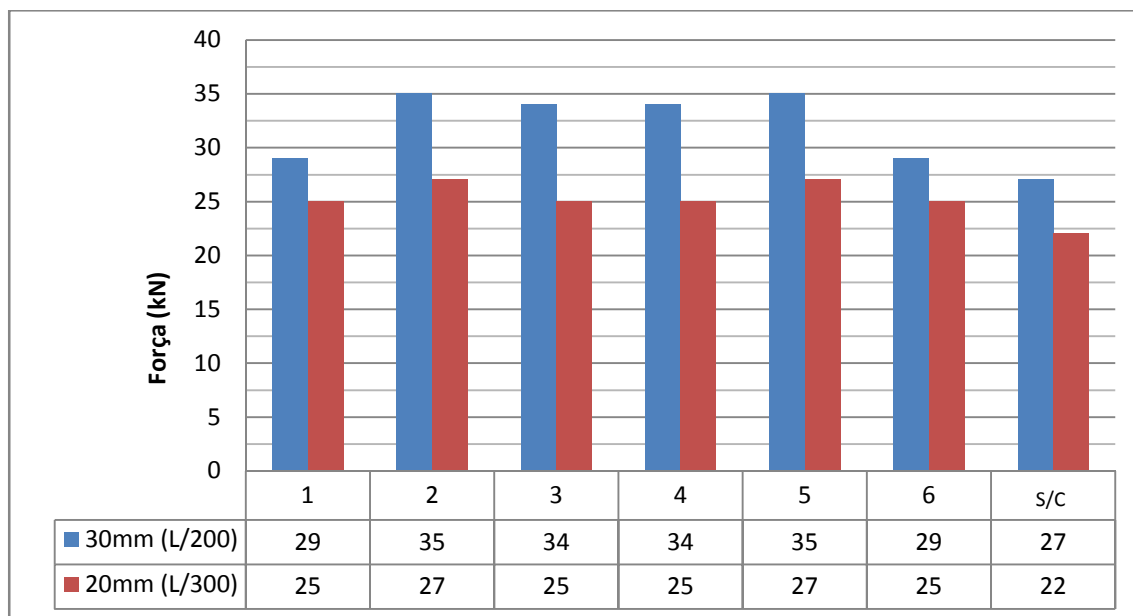


Figura 82 Força (kN) quando atingido o estado limite de utilização - (L/200 e L/300).
Fonte: Autora.

Conforme capítulo materiais e métodos, os relógios comparadores para verificação dos deslocamentos das emendas foram instalados a partir do ensaio da terceira amostra. As medições foram possíveis até a aplicação de carga em torno de 47,35 kN. Neste nível de carregamento, o ensaio era paralisado e os relógios retirados devido ao risco de danos aos equipamentos no momento da ruptura. A figura 83 mostra o deslocamento das emendas na aplicação das cargas de 6,70 kN; 15,70 kN; 24,75 kN; 33,80 kN e 47,35 kN (próximo do momento da ruptura).

Na figura 83 é possível observar que a amostra sem classificação apresentou no ciclo de carga de 6,70 kN um deslocamento muito superior às demais amostras. Nas demais treliças o aumento do deslocamento foi gradual e maior após a aplicação da última carga de 47,35 kN.

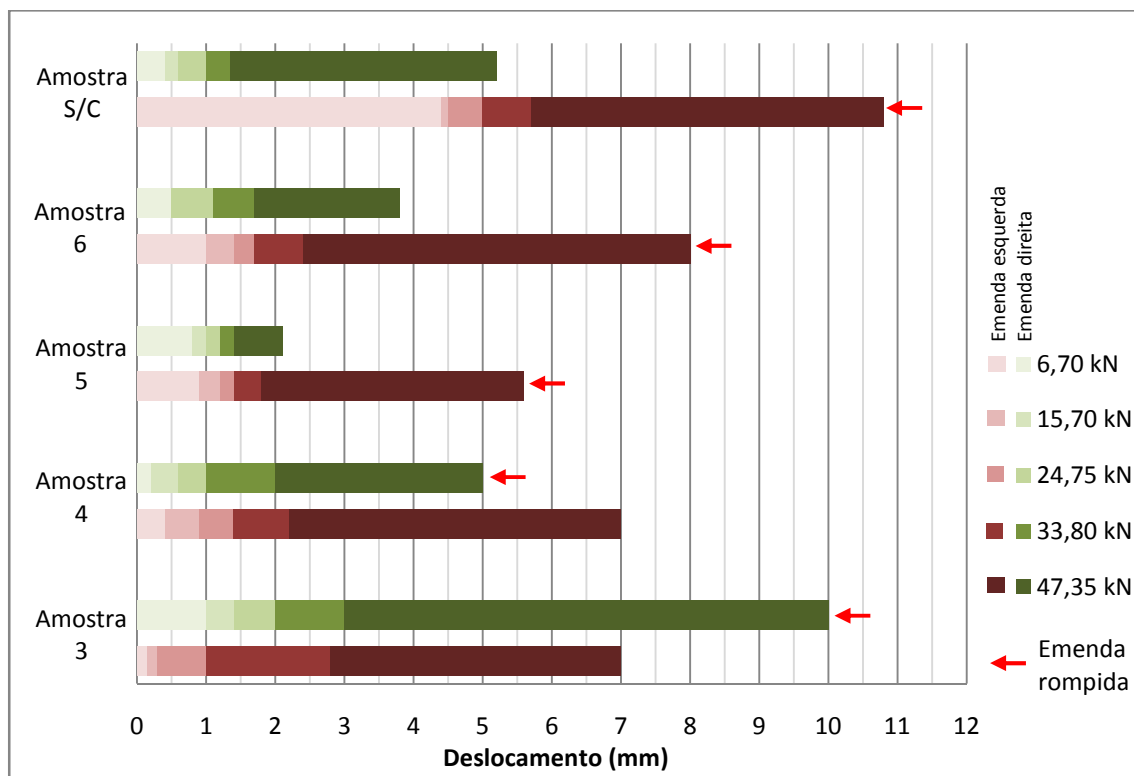


Figura 83 Deslocamento das emendas com aumento do carregamento.
Fonte: Autora.

Após a análise dos resultados obtidos é possível observar que o gargalo da estrutura ensaiada encontra-se na ligação e não na madeira do ponto de vista da carga da ruptura, já que todas foram bem elevadas e sem grande variabilidade. Porém, do ponto de vista da rigidez, as amostras com madeira classificada apresentaram melhor desempenho. A amostra com madeira sem classificar apresentou maiores deslocamentos tanto da estrutura quanto das emendas, demonstrando a importância da classificação.

Com relação às 02 primeiras propostas do caibro treliçado ensaiadas, de (JAOUICHE, 2012) e (CADURIN, 2013), é possível observar melhorias do desempenho estrutural do sistema, conforme apresentado no quadro 14. Apesar de a ruptura ter ocorrido no mesmo local que na Proposta 2, ou seja, na ligação entre as emendas da barra tracionada, é possível observar que as alterações realizadas, como tipo de prego e arranjo da ligação entre as emendas, possibilitaram o incremento na carga de ruptura em mais de 4 vezes e diminuição dos deslocamentos.

| | Proposta 1 (JAOUICHE, 2012) | Proposta 2 (CANDURIN, 2013) | Proposta 3 (RECCO, 2015) |
|--|---|---|---|
| Tipo de sistema | Caibro treliçado em MLP | Caibro treliçado em MLP | Caibro treliçado em MLP |
| Madeira | <i>Pinus spp</i> | <i>Pinus spp</i> | <i>Pinus spp</i> |
| Dimensões ripas (cm) | 5 x 7,5 | 5 x 7,5 | 5 x 7,5 |
| Seção das MLPs (cm) | 7,5 x 9,7 | 6 x 14 | 6 x 14 |
| Tipo de prego | Prego 19x39 - liso dobrado | Prego 20x30 –liso sem dobrar | Prego 18x30 - Ardox |
| Local da ruptura (gargalo da estrutura) | Ligação entre banzo superior e inferior (perna e linha) | Ligação entre as emendas da barra tracionada localizada no banzo inferior | Ligação entre as emendas da barra tracionada localizada no banzo inferior |
| Amostras ensaiadas | 1 (madeira classificada) | 1 (madeira classificada) | 7 (6 com madeira classificada e 1 sem classificar) |
| Carga ruptura (kN) | 7,07 | 13,6 | 60,89 (Média das 7 amostras) |
| Flecha no centro do vão na ruptura (mm) | 87,8 | 59 | Não realizada leitura. |

Quadro 14 Comparativo das duas primeiras propostas com os resultados obtidos no ensaio dos caibros treliçados.
Fonte: Autora.

O quadro 15 apresenta os valores das flechas da Proposta 3 com carregamento aproximado de 7,07 kN e 13,6kN, cargas de ruptura da proposta 1 e 2 respectivamente. Em ambas, o deslocamento no centro do vão da Proposta 3 foi muito inferior, demonstrando o melhor desempenho da proposta.

| | Proposta 01 (JAOUICHE, 2012) | Proposta 02 (CANDURIN, 2013) | Proposta 03 (RECCO, 2015) |
|---|---|---|--------------------------------------|
| Flecha com carregamento aproximado de 7,07 kN (carga de ruptura da Proposta 1) | 87,8 mm | 21 mm | 9,7 mm |
| Flecha com carregamento aproximado de 13,6 kN (carga de ruptura da Proposta 2) | - | 59 mm | 11,8 mm |

Quadro 15 Comparativo das duas primeiras propostas com os resultados obtidos no ensaio dos caibros treliçados.
Fonte: Autora.

O deslocamento da emenda que ocorreu a ruptura na Proposta 2, foi de 32mm. Na proposta 3, com o mesmo carregamento, a média de deslocamento da emenda foi muito inferior, aproximadamente 1,46mm, demonstrando a melhoria na rigidez da estrutura (figura 84). Mesmo com carga

próximo a ruptura (47,35 kN), a média do deslocamento das emendas na proposta 3, ainda permaneceu muito inferior com aproximadamente 8mm.



**Figura 84 Fotos da emenda no ensaio de RECCO, 2015 e CADURIN, 2013, respectivamente.
Fonte: Autora.**

8 COMENTÁRIOS FINAIS

8.1 Conclusões

Os caibros treliçados são amplamente utilizados como estruturas de cobertura nos EUA, Canadá e alguns países europeus, ou seja, sua eficiência já é comprovada. A construção dessas estruturas com madeira laminada pregada demonstrou ser uma opção viável diante da madeira de Pinus produzida no Brasil, a qual apresenta grande quantidade de defeitos naturais.

Para o desenvolvimento do sistema foi necessário, antes do ensaio da estrutura, a avaliação experimental das emendas em MLP das barras tracionadas para verificação do seu comportamento e determinação do tipo de prego a ser utilizado.

Os resultados obtidos no ensaio de tração da emenda demonstram que nas vigas laminadas pregadas revela-se necessário garantir um espaçamento mínimo entre as emendas consecutivas de duas lâminas componentes, determinado a partir do nível de tensões aplicadas. Os resultados experimentais demonstraram que os 3 tipos de ligação pregadas são diferentes entre si e, por isso, exigem, para o correto dimensionamento destas ligações pregadas, modelos matemáticos específicos, da Norma Projeto de Estruturas de Madeira – NBR 7190/97, ao contrário do seu modelo único.

As ligações com prego liso apresentaram a pior performance, tanto de resistência quanto de rigidez. As ligações com pregos com ponta dobrada mostraram os melhores resultados de rigidez, enquanto que as ligações com prego ardox atingiram os melhores resultados com relação à resistência. Esses dois últimos tipos de ligação apresentaram desempenhos próximos entre si e superiores ao das ligações com pregos lisos.

As ligações estudadas apresentaram a necessária ductilidade e para o ensaio do caibro treliçado em MLP foi adotado o prego ardox por apresentar maior resistência e menores coeficientes de variação.

Para o ensaio da estrutura foram consideradas 7 amostras,

sendo 6 com madeira classificada e uma com madeira não classificada. Todas as amostras apresentaram o mesmo comportamento ao longo do ensaio e a ruptura ocorreu sempre na emenda da barra tracionada mais próxima ao montante lateral. Os resultados obtidos para a carga de ruptura foram bastante elevados, apresentando média de 60 kN e baixo coeficiente de variação.

Com a aplicação da carga de serviço (6 kN) os deslocamentos verticais foram abaixo de 1,4cm, inferiores ao exigido tanto pela Norma em vigor quanto pela revisão da Norma, 30 mm e 20 mm, respectivamente. O estado limite de utilização ocorreu com a carga entre 29 e 35 kN para a flecha de 30 mm e entre 22,50 e 27 kN para flecha de 20 mm.

Os deslocamentos verticais e das emendas foram maiores no ensaio da amostra em madeira não classificada, demonstrando que a classificação traz benefícios ao desempenho da estrutura, porém, neste caso não inviabilizou a estrutura já que os valores da carga, quando atingido o estado limite de utilização, foram acima do esperado e necessário para o bom funcionamento do sistema proposto.

Após a análise dos resultados obtidos foi possível observar que do ponto de vista da carga de ruptura, o gargalo da estrutura encontra-se na ligação. Com relação à rigidez, a qualidade da madeira teve maior influência, já que a amostra sem classificar apresentou maiores deslocamentos.

Com efeito, os resultados experimentais das emendas na escala estrutural indicaram melhorias no sistema de ligação das emendas de vigas em MLP e, conseqüentemente, do desempenho de rigidez e de resistência do sistema caibro treliçado.

Os resultados deste estudo demonstraram que houve grande melhoria de desempenho mecânico em relação aos protótipos de Jaouiche (2012) e Cadurin (2013), através da correção do problema da ligação entre as emendas, aumentando em mais de 4 vezes sua resistência.

Os resultados puderam comprovar que a disposição de quantidade adequada de pregos é capaz de transmitir de maneira eficaz os esforços e aumentar significativamente o desempenho da estrutura.

Para este sistema em caibro treliçado, o desempenho obtido foi acima do necessário (10 vezes a carga de serviço), permitindo o redimensionamento das peças com conseqüente economia de madeira e pregos.

O modelo de estrutura desenvolvido pode ser aplicado em habitações de interesse social e devido aos excelentes valores obtidos é possível também sua replicação em situações similares na construção civil. .

8.2 Sugestões para trabalhos futuros

Mais estudos podem ser realizados como:

- Ensaio experimental do sistema com a madeira tratada, tendo em vista sua importância na durabilidade das peças;
- Avaliação da estrutura com o uso da contraflecha;
- Avaliação do comportamento do sistema global;
- Avaliação da estrutura em estado de fluência;
- Simulação numérica mais precisa incluindo as variáveis dos fenômenos de natureza complexa ocorridos no ensaio estrutural do sistema proposto.

Acredita-se na possibilidade de utilização desse sistema e dessa forma poderiam ser realizadas pesquisas à nível de mercado, como também de viabilização da sua execução pela autoconstrução através de manuais de montagem da estrutura.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF. **Anuário estatístico ABRAF 2013: ano base 2012**. Brasília: ABRAF, 2013. p. 74

ALMEIDA, P. A. O. **Estruturas de madeira de grande porte**. 1990. 293 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS – ASTM. **ASTM D 245**: Standard Test Methods for Mechanical Properties of Lumber and Wood-Base Structural Material, Philadelphia, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **CB - 205** - Madeira serrada de coníferas provenientes de reflorestamento para uso geral: classificação. Rio de Janeiro, 1991. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NB - 1381** - Madeira serrada de coníferas provenientes de reflorestamento, para uso geral - Medição e quantificação de defeitos. Rio de Janeiro, 1991. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **PB-1560** - Madeira serrada de coníferas provenientes de reflorestamento, para uso geral: dimensões e lotes: padronização. Rio de Janeiro, 1991. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT, **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT, **NBR 11700**: Madeira serrada de coníferas proveniente de reflorestamento para uso geral, Rio de Janeiro, 1990, 6 p.

BARADIT, E. ; FUENTEALBA, C. (2000). “**Determinacion de las Constantes Elásticas del Pinus radiata por Ultrasonido**”. VII Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira, São Carlos, SP.

BONO, C, T. **Madeira laminada colada na arquitetura: sistematização de obras executadas no Brasil**. Departamento de arquitetura-EESC/USP, 1996. 365p. (Dissertação de mestrado).

BRASIL. **Déficit habitacional no Brasil**. Brasília: Ministério das Cidades/SNH: Fundação João Pinheiro, 2009. 129p.

BRITO, K. D.; MACCAGNAN, C. L.; PLETZ, E. **Análise comparativa entre o Sistema Construtivo Convencional e o Sistema Caibro Treliçado**. 2010.

Apresentação de Trabalho no III Congresso Internacional de Arquitetura & Urbanismo e Engenharia Civil, Água e Habitação. 2010.

CADURIN, L. D. P. **Análise experimental de um caibro treliçado composto de vigas laminadas pregadas de *Pinus spp* para coberturas de habitações de interesse social**. 2013. 130 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2013.

CALIL JR., C.; ROCCO LAHR, F. A.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. 1 ed. Barueri: Editora Manole Ltda, 2003. 152 p.

CARREIRA, M. R. (2003). “**Crítérios para classificação de peças estruturais de *Pinus sp***”. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP.

CARREIRA, M. R.; DIAS, A. A. **Classificação visual de coníferas: análise da aplicação do método norte-americano às espécies de *Pinus spp*. plantadas no Brasil**. *Scientia Forestalis*, n.67, p.78-87, 2005.

DAMIANO, A. R. G.; SALES, A. **Racionalização de estruturas de cobertura para habitação de interesse social utilizando madeiras de reflorestamento**. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRAS, 2004, Cuiabá, MT. Anais... Cuiabá, MT, 2004.

DUARTE, R. S.: **Avaliação do Comportamento de Ligações com Parafusos Auto-Atarraxantes em Vigas de MLC C**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 248p, 2004. Orientador Prof. Dr. Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco.

DIGISYSTEM INDÚSTRIA DE SISTEMAS ELETRÔNICOS LTDA, **Manual de sistema microprocessado para controle de estufas crg 08 kd/ht**. Revisão: V01, Curitiba, PR, 2009.

EN 1995-1-1:2004. Eurocode 5: **Design of Timber Structures – Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings**. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, (E).

FAGUNDES, H. A. V. **Diagnóstico da produção de madeira serrada e geração de resíduos do processamento de madeira de florestas plantadas no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Escola de Engenharia, UFRGS, 2003. 173 p. Dissertação (Mestrado).

FIORELLI, J. **Sistema de cobertura modular em madeira de reflorestamento, chapa de partículas e telha reciclada à base de embalagens longa vida para aplicação em construções rurais**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 2009. 181 p. Relatório final de Pós Doutorado.

FIORELLI, J.; DIAS, A. A.; COIADO, B. **Propriedades mecânicas de peças com dimensões estruturais de Pinus spp**: Correlação entre resistência à tração e classificação visual. Viçosa, MG: UFV, Sociedade de Investigações Florestais, Revista Árvore, 2009. v. 33, n. 4, p. 741-750.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood Handbook: wood as an engineering material. General Technical Report (FPL-GTR-113)**. 1999, 463 p. Madison.

FREITAS, R. R. **Classificação de peças estruturais de pinus spp. pela MSR (Machine StressRate)**. 2004. 146p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2004.

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

GÓES, J. L. N.; DIAS, A. A. **Análise de vigas de madeira pregadas com seção composta I**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 2005. Cadernos de Engenharia de Estruturas, v. 7, n. 29, p. 57-77.

HALLER, P. **Progress in timber joint development and modeling**. Proceedings of the 5th World Conference on Timber Engineering, Montreux, Switzerland, Aug. 17-20, 1998, vol. 1, p. 337-344.

JAOUICHE, S. T. **Estruturas leves de madeira laminada pregada de Pinus spp para telhados de habitações de interesse social**. Londrina: Universidade estadual de Londrina, 2012. 80 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil).

LARA PALMA, H.A.; BALLARIN A.W. **Propriedades de contração na madeira juvenil e adulta de Pinus taeda L**. Scientia Forestalis, Piracicaba, SP, n. 64, p. 13-22, 2003.

MARTIN P., 2006, **“Etude du comportement des poutres lamellées clouées boulonnées en flexion”**, These de doctorat, ENGREF (AgroParisTech).

MINDHAM, C. N. **Roof Construction and loft conversion**. 4. Ed. Blackwell Publishing, 2006. 259 p.

MOLITERNO, Antonio. **Caderno de projetos de telhados em estruturas de madeira**. São Paulo, 2003.

MOURA, J. D. M.; PLETZ, E; RECCO, E. G. **Qualidade e processo produtivo da madeira para utilização em mobiliário**. Londrina, 2012.

MOURA, J. D. M.; PLETZ, E.; SAVINO, M. G., RECCO, E. G. **Elaboração de manual de classificação visual estrutural para a madeira de Pinus spp**, XIII Ebramem, Vitória /ES, 2012.

MOURA, J.D.M.; PLETZ, E.; STRASS, M. C. **Panorama Geral e Perspectivas Preliminares de Continuidade dos Trabalhos em Relação às Visitas Técnicas Realizadas a Indústria do Setor Madeireiro do Parque Industrial de Telêmaco Borba a Convite da Secretaria Municipal do Trabalho e Industria Convencional**. 2012, Universidade Estadual de Londrina, Relatório Interno.

OLIVEIRA, M. A. M. **Ligações com pinos metálicos em estruturas de madeira**. 2001. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

PARISI, M. A.; PIAZZA, M. **Seismic behavior and retrofitting of joints in traditional timber roof structures**. ELSEVIER, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 22, 2002. p. 1183-1191.

ROSS, R. J. ; PELLERIN, R. F. ; VOLNY, N. ; SALSIG, W. W. ; FALK, R. H. (1999). **“Inspection of Timber Bridges Using Stress Wave Timing Nondestructive Evaluation Tools”**. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-114 USDA, Department of Agriculture, Forest Service, Madison, WI.17 p.

SMITH, I.; FOLIENTE, G. **Load and Resistance Factor Design of Timber Joints: International Practice and Future Direction**. Journal of Structural Engineering, Jan. 2002.

SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994). **“Standard Grading Rules for Southern Pine Lumber”**. Pensacola, Fla.

STAMATO, G. C. et al. **Cuidados com a utilização de coníferas nas estruturas de madeira**. In: **Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estrutura de Madeira, 10., 2006**. São Pedro, SP. Anais São Pedro, SP: EBRAMEM, 2006. 1 CD-ROM.

VALLE, I. M. R. **A pré-fabricação de dois sistemas de cobertura com madeira de florestas plantadas**: Estudos de casos: os assentamentos rurais Pirituba II e Sepé Tiaraju. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 2011. 352 p. Tese (Doutorado).

WOLF SYSTEMS LIMITED SHILTON INDUSTRIAL ESTATE. **Trussed rafter technical manual**. 2004, 32 p. Coventry. Disponível em: <http://www.fforest.co.uk/PDFs/wolf_systems_trussed_rafter_technical_manual.pdf> Acesso em: 30 abr. 2014.

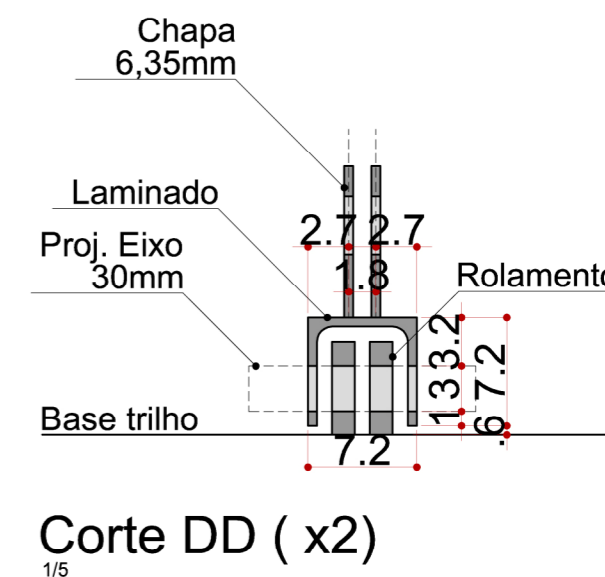
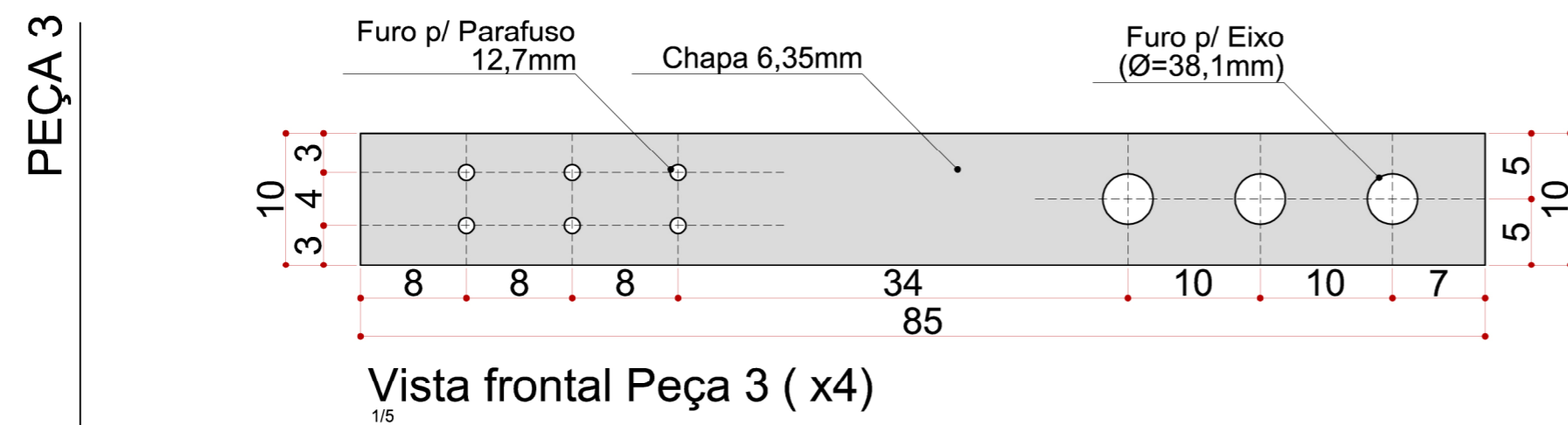
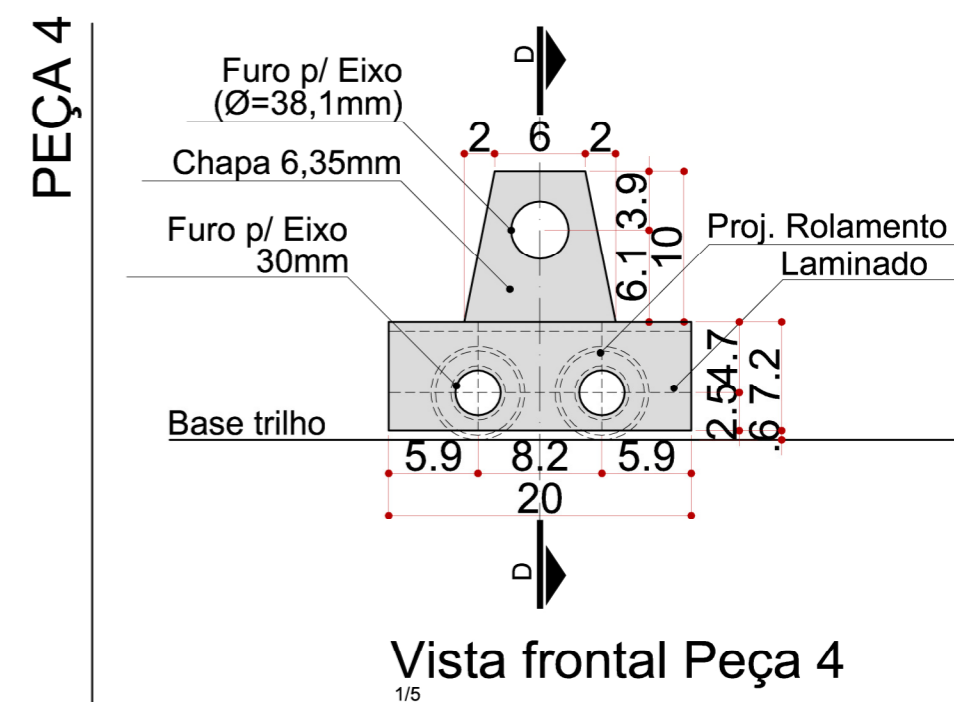
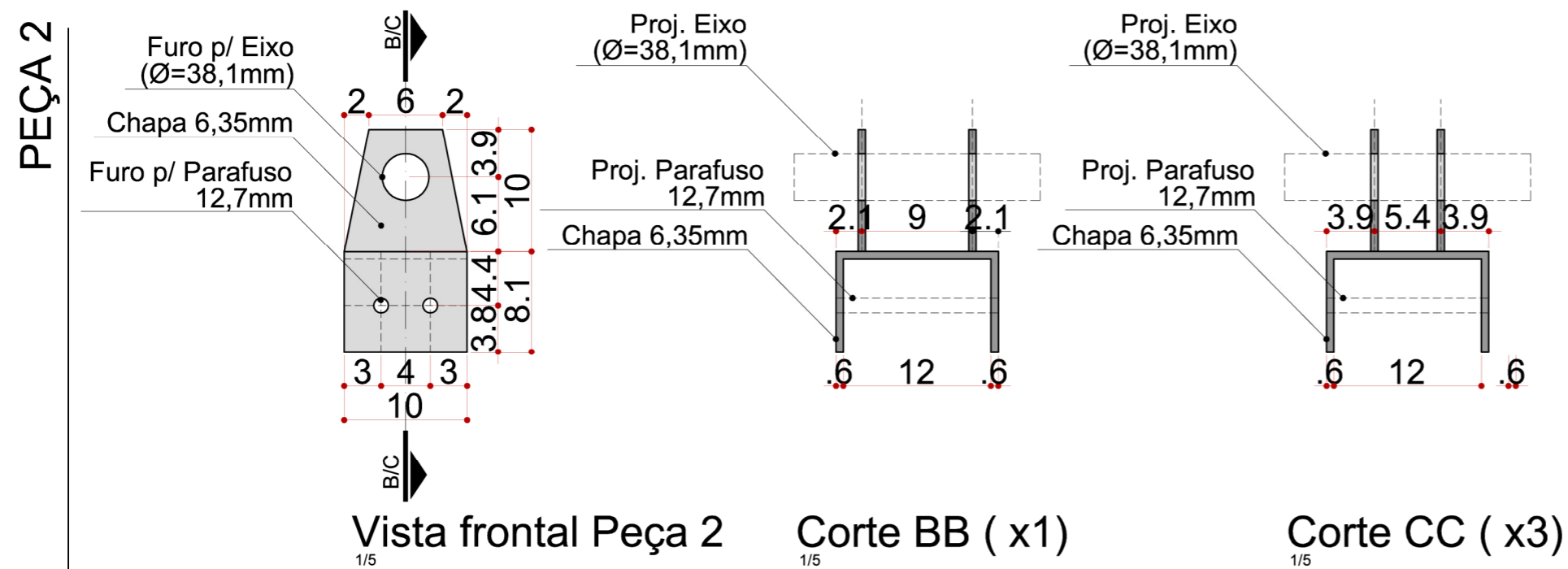
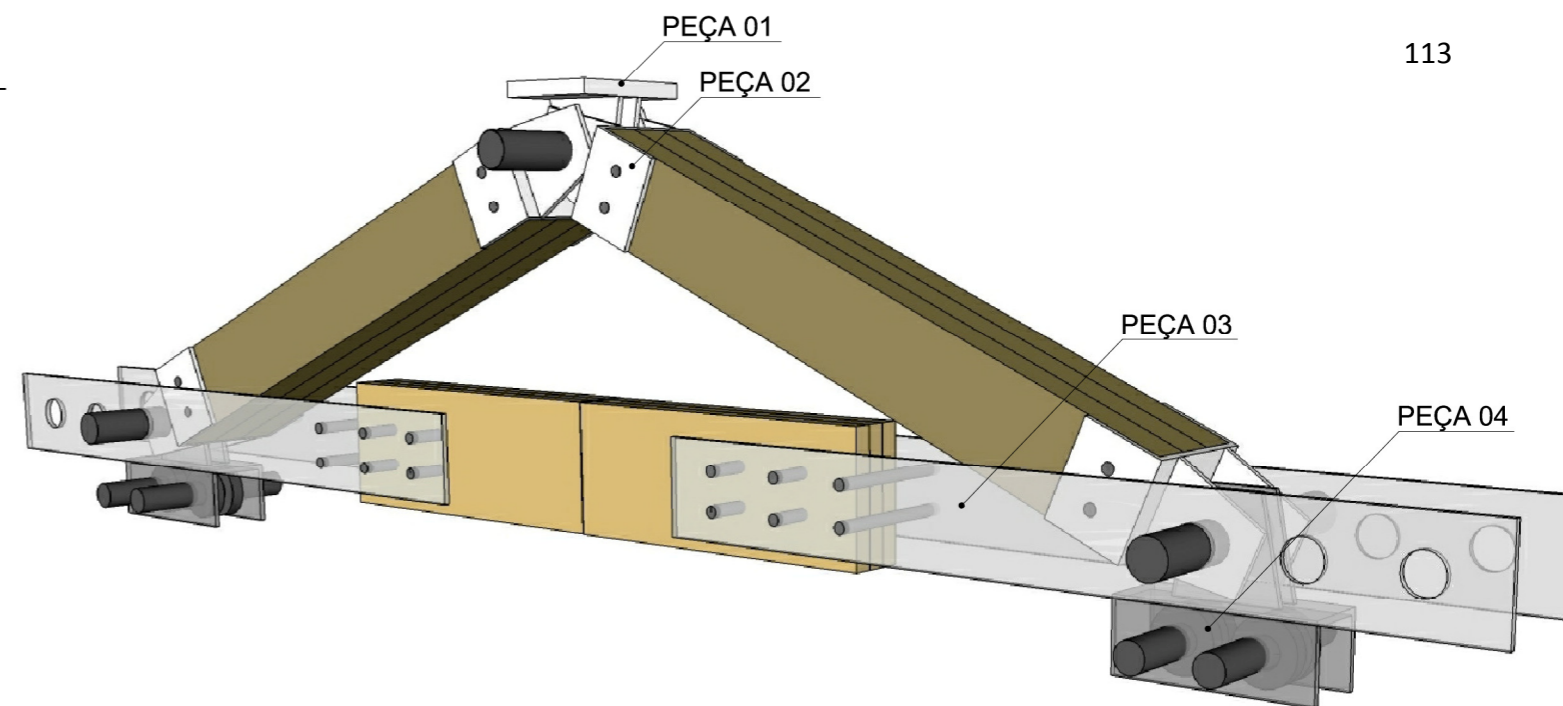
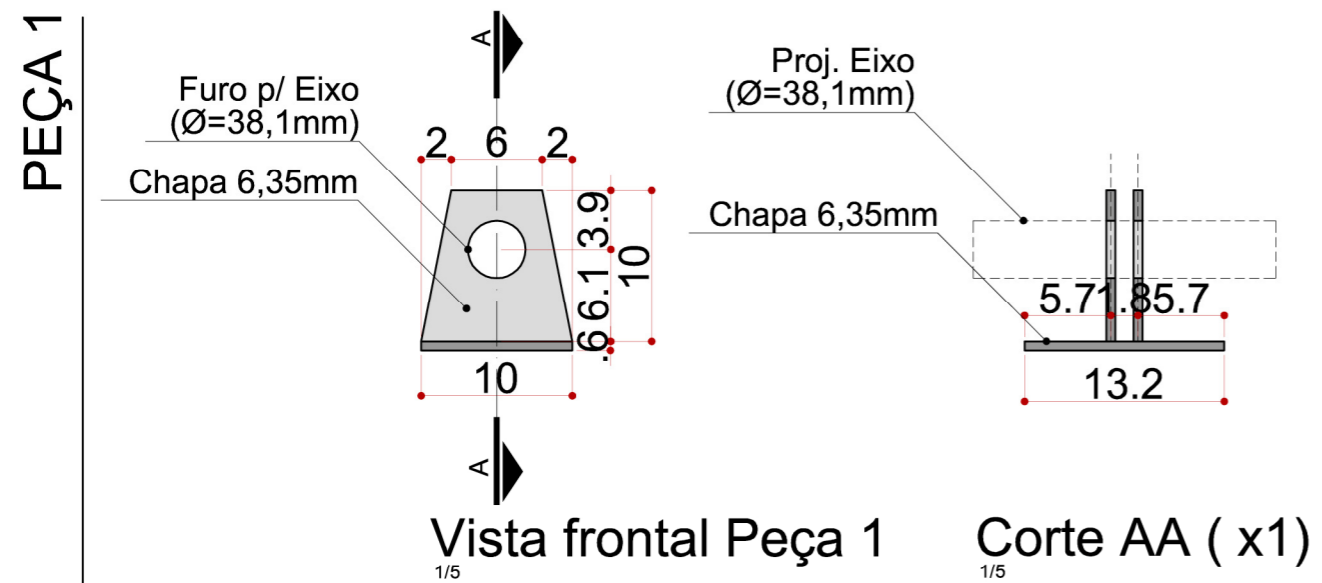
WOLFE, R. W. ; LABISSONIERE, T. **Structural performance of light-frame roof assemblies}II. Conventional truss assemblies.** Research Paper, FPL-RP-499, USDA FS, Forest Products Laboratory, Madison, WI, USA, 1991.

< <http://trussform.co.uk/gallery.php> > Acesso em: 10 jun. 2014.

APÉNDICES

APÊNDICE A

DETALHAMENTO PEÇAS METÁLICAS APARATO



APÊNDICE B

ANEXOS

ANEXO A - ESFORÇOS SOLICITANTES NA TESOURA ANALISADA POR CADURIN (2013)

Para cálculo das solicitações na tesoura, foi considerado o uso de telha cerâmica de um fornecedor específico conforme figura 85. Além disso, tanto para a madeira das ripas, quanto dos caibros treliçados, foi adotada madeira de *Pinus spp* classe C30.

| Ficha Técnica - TELHAS DE CERÂMICA | |
|------------------------------------|----------------------|
| Modelo Euro10 Americana | |
| Comprimento Médio | 470mm |
| Largura Média | 290mm |
| Altura Média | 76,4mm |
| Telhas por m ² | 10,5pçs |
| Peso médio por telha | 3,6Kg |
| Distância entre ripas | 40,5cm* |
| Absorção de água | <13% |
| Resistência | >250kgf |
| Embalagem | 359pçs |
| Pallet por Viagem | 13un ou 3.952 telhas |
| Peso por Viagem | 14.230Kg |
| M ² por Viagem | 376 |
| Medida do Pallet | 0,95x1,18m |

Figura 85 Telha cerâmica adotada.
Fonte: CADURIN, 2013

CÁLCULO DO CARREGAMENTO DA ESTRUTURA

Ações permanentes:

$$Y_{telhas} = 3,6 * 10,5 = 37,8 \text{ kg/m}^2$$

$$G_{k, telhas} = e * L' * Y_{telhas}$$

$$G_{k, telhas} = 0,39 * 1,20 * 37,8 = 17,69 \text{ kgf} = 0,177 \text{ kN}$$

$$G_{k, ripas} = b_{ripas} * h_{ripas} * L' * \rho_{ripas}$$

$$G_{k, ripas} = 0,05 * 0,075 * 1,20 * 600 = 2,700 \text{ kgf} = 0,027 \text{ kN}$$

Ação variável:

$$Q_{k, SC} = e * L' * SC$$

$$Q_{k, SC} = 0,39 * 1,20 * 25 = 11,7 \text{ kgf} = 0,117 \text{ kN}$$

Carga concentrada na tesoura (na posição de cada ripa) devido ao peso próprio de telhas e ripas e a sobrecarga (figura 86):

$$F_{d,conc} = \gamma_g * G_k + \gamma_q * Q_k$$

$$F_{d,conc} = 1,3 * (0,177 + 0,027) + 1,5 * 0,117 = 0,44 \text{ kN}$$

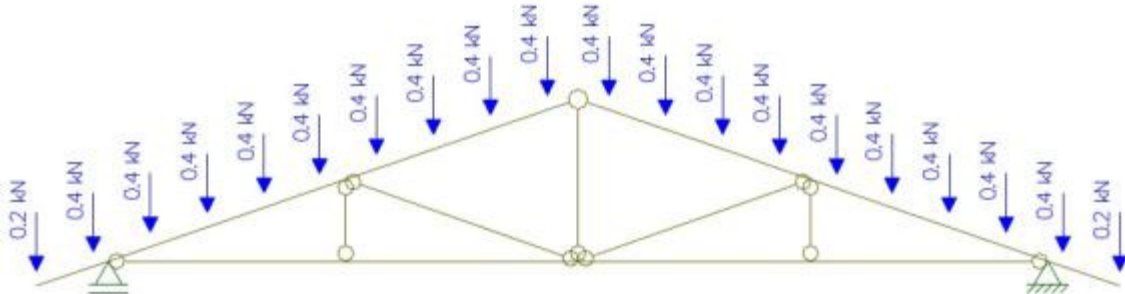


Figura 86 Carga aplicada na posição das ripas sobre a tesoura.
Fonte: CADURIN, 2013

Carga distribuída nas barras da tesoura devido ao peso próprio da mesma (figura 87):

$$F_{d,dist} = \gamma_g * \frac{(b_{tesoura} * h_{tesoura} * \rho_{tesoura})}{100}$$

$$F_{d,dist} = 1,3 * \frac{(0,06 * 0,14 * 600)}{100} = 0,065 \text{ kN/m}$$

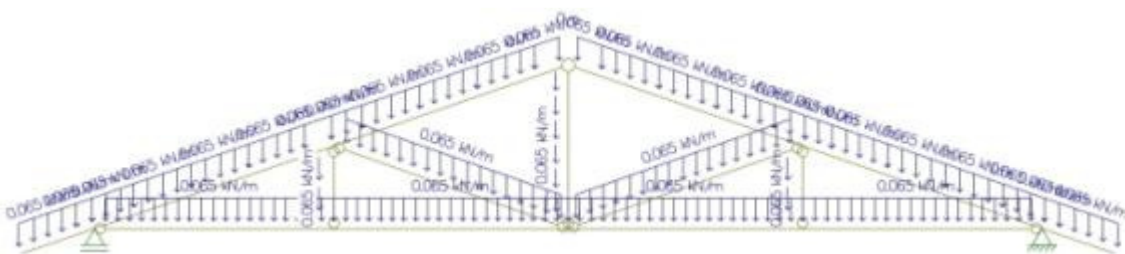


Figura 87 Carga distribuída nas barras da tesoura.
Fonte: CADURIN, 2013

ANEXO B – ANÁLISE NO FTOOL REALIZADA POR CADURIN (2013)

Análise numérica no software Ftool foi realizada para verificação dos esforços solicitantes. Foram verificados esforços cisalhantes, momentos fletores, reações de apoio e a linha deformada da estrutura, conforme figura 88.

Linha deformada da estrutura e reações de apoio (em kN).

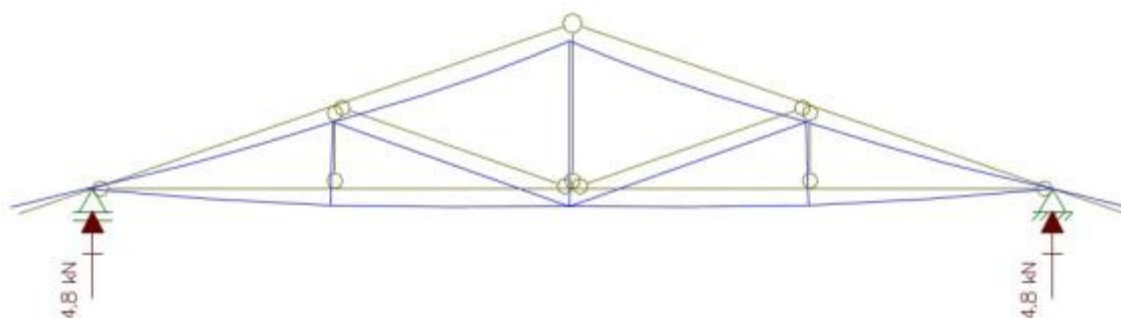


Diagrama de esforços normais (em kN).

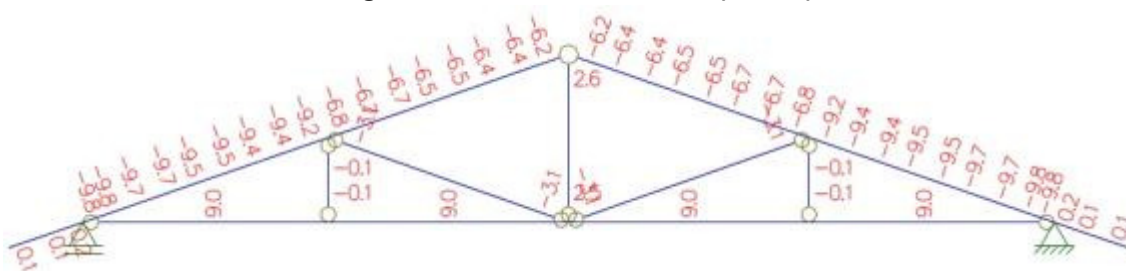


Diagrama de momentos fletores (em kN.m).

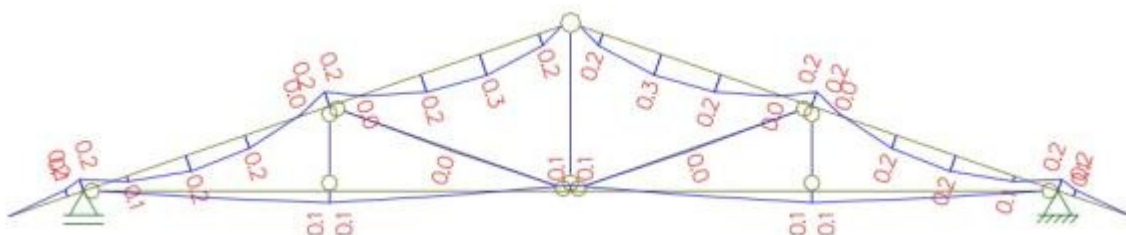


Diagrama de cortantes (em kN).

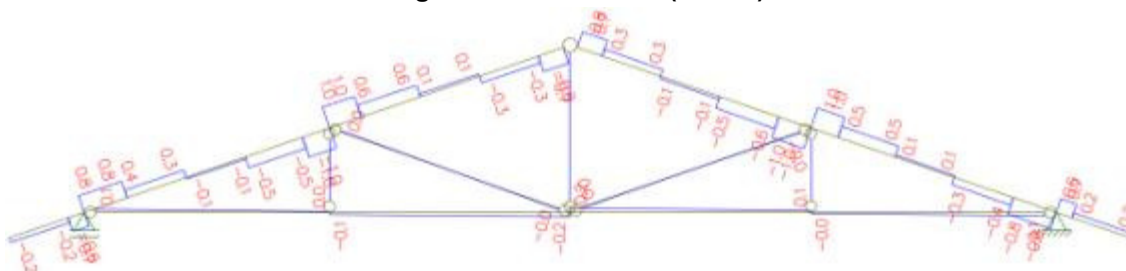


Figura 88 Diagramas
Fonte: CADURIN, 2013

ANEXO C – DIMENSIONAMENTO DAS LIGAÇÕES DO CAIBRO TRELIÇADO EM MLP REALIZADO POR CADURIN (2013)

Todas as ligações do caibro treliçado foram dimensionadas pela NBR 7190/97 e pelo Eurocode5 (2004).

Para o dimensionamento foi considerada madeira de Pinus C20 e corte duplo. Como não foi feito dimensionamento da VLP, considerou-se classe 20 para garantir maior segurança à estrutura, embora a madeira utilizada possua propriedades superiores à C20. O esquema de esforços, ângulos e nós da tesoura pode ser visto na figura 89.

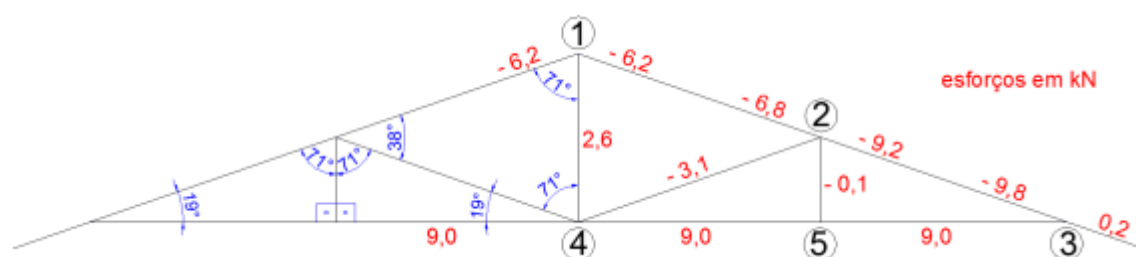


Figura 89 Esquema da tesoura para dimensionamento das ligações.
Fonte: CADURIN, 2013

DIMENSIONAMENTO DAS LIGAÇÕES CONFORME NBR 7190/97

Madeira Pinus C20:

$$f_{c0,k} = 20 \text{ MPa}$$

$$f_{v0,k} = 4 \text{ MPa}$$

$$E_{c0,m} = 3500 \text{ MPa}$$

$$\rho_{\text{aparente}} = 500 \text{ kg/m}^3$$

Coefficientes de modificação:

$$K_{\text{mod}1} = 0,70 \text{ (carregamento permanente)}$$

$$K_{\text{mod}2} = 1,00 \text{ (classe 1 de umidade)}$$

$$K_{\text{mod}3} = 0,80 \text{ (classe S1 – D / classificação visual e mecânica)}$$

$$K_{\text{mod}} = K_{\text{mod}1} * K_{\text{mod}2} * K_{\text{mod}3} = 0,7 * 1,0 * 0,8 = 0,56$$

Coefficientes de minoração da resistência para estados limites últimos:

$$\gamma_{wc} = 1,4$$

$$\gamma_{wt} = 1,8$$

Estimativa da rigidez:

$$E_{c0,ef} = K_{mod} * E_{c0,m} = 0,56 * 3500 = 1960 \text{ MPa}$$

Resistências de projeto:

$$f_{c0,d} = K_{mod} * f_{c0,k} / \gamma_{wc} = 0,48 * 20 / 1,4 = 6,86 \text{ MPa}$$

$$f_{t0,d} = K_{mod} * f_{t0,k} / \gamma_{wt} = 0,48 * (20/0,77) / 1,8 = 6,92 \text{ MPa}$$

$$f_{e0,d} = f_{c0,d} = 6,86 \text{ MPa}$$

$$f_{e90,d} = 0,25 * f_{c0,d} * \alpha_e = 0,25 * 6,86 * 1,10 = 1,89 \text{ MPa}$$

Pregos 20x30:

diâmetro = 4,4 mm

comprimento = 69 mm

$\alpha_e = 1,10$

Resistência dos pregos:

$$f_{y,d} = f_{y,k} / \gamma_s = 600 / 1,1 = 546 \text{ MPa}$$

Outros:

$t = 2,0 \text{ cm}$

$$\beta = t/d = 20/4,4 = 4,54$$

Ligação 1

Montante central: $N_d = 2,6 \text{ kN}$ (tração) ; $\theta = 71^\circ$

$$f_{e71,d} = \frac{f_{e0,d} * f_{e90,d}}{f_{e0,d} * \sin^2 71^\circ + f_{e90,d} * \cos^2 71^\circ}$$

$$f_{e71,d} = \frac{6,86 * 1,89}{6,86 * \sin^2 71^\circ + 1,89 * \cos^2 71^\circ} = 2,05 \text{ MPa}$$

$$\beta_{lim} = 1,25 * \sqrt{f_{y,d} / f_{e71,d}} = 1,25 * \sqrt{546 / 2,05} = 20,40$$

Como $\beta_{lim} > \beta$, tem-se o embutimento da madeira

$$R_{vd,1} = 0,50 * t * d * f_{e71,d} = \frac{0,50 * 2,0 * 4,4 * (2,05 * 10^3)}{10^2 * 10^3} = 0,0902 \text{ kN}$$

Para corte duplo: $R_{vd,1} = 0,0902 * 2 = 0,1804 \text{ kN}$

$$N_{pregos} = N_d / R_{vd,1} = 2,6 / 0,1804 = 14,41 \approx 15 \text{ pregos} = 8 \text{ pregos/face}$$

Ligação 2**Montante lateral:** Nd = 0,1kN (compressão) ; $\theta = 71^\circ$

$$f_{e71,d} = 2,05 \text{ MPa}$$

$$\beta_{lim} = 20,40$$

Como $\beta_{lim} > \beta$, tem-se o embutimento da madeira

$$R_{vd,1} = 0,0902 \text{ kN}$$

Para corte duplo: $R_{vd,1} = 0,1804 \text{ kN}$

$$N_{pregos} = 0,1 / 0,1804 = 0,55 \approx 2 \text{ pregos} = 1 \text{ prego/face}$$

Diagonal: Nd = 3,1 kN (compressão) ; $\theta = 38^\circ$

$$f_{e38,d} = \frac{6,86 * 1,89}{6,86 * \sin^2 38^\circ + 1,89 * \cos^2 38^\circ} = 3,44 \text{ MPa}$$

$$\beta_{lim} = 1,25 * \sqrt{546 / 3,44} = 15,75$$

Como $\beta_{lim} > \beta$, tem-se o embutimento da madeira

$$R_{vd,1} = \frac{0,50 * 2,0 * 4,4 * (3,44 * 10^3)}{10^2 * 10^3} = 0,1514 \text{ kN}$$

Para corte duplo: $R_{vd,1} = 0,1514 * 2 = 0,3028 \text{ kN}$

$$N_{pregos} = 3,1 / 0,3028 = 10,24 \approx 11 \text{ pregos} = 6 \text{ pregos/face}$$

Ligação 3**Banzo superior:** Nd = 9,8kN (compressão) ; $\theta = 19^\circ$

$$f_{e19,d} = \frac{6,86 * 1,89}{6,86 * \sin^2 19^\circ + 1,89 * \cos^2 19^\circ} = 5,36 \text{ MPa}$$

$$\beta_{lim} = 1,25 * \sqrt{546 / 5,36} = 12,62$$

Como $\beta_{lim} > \beta$, tem-se o embutimento da madeira

$$R_{vd,1} = \frac{0,50 * 2,0 * 4,4 * (5,36 * 10^3)}{10^2 * 10^3} = 0,2358 \text{ kN}$$

Para corte duplo: $R_{vd,1} = 0,2358 * 2 = 0,4716 \text{ kN}$

$$N_{pregos} = 9,8 / 0,4716 = 20,78 \approx 21 \text{ pregos} = 11 \text{ pregos/face}$$

Ligação 4

Diagonais: $N_d = 3,1 \text{ kN}$ (compressão) ; $\theta = 19^\circ$

$$f_{e19,d} = 5,36 \text{ MPa}$$

$$\beta_{lim} = 12,62$$

Como $\beta_{lim} > \beta$, tem-se o embutimento da madeira

$$R_{vd,1} = 0,2358 \text{ kN}$$

Para corte duplo: $R_{vd,1} = 0,2358 * 2 = 0,4716 \text{ kN}$

$$N_{pregos} = \frac{3,1}{0,4716} = 6,57 \approx 7 \text{ pregos} = 4 \text{ pregos/face}$$

Montante central: $N_d = 2,6 \text{ kN}$ (tração) ; $\theta = 90^\circ$

$$f_{e90,d} = 1,89 \text{ MPa}$$

$$\beta_{lim} = 1,25 * \sqrt{\frac{546}{1,89}} = 21,25$$

Como $\beta_{lim} > \beta$, tem-se o embutimento da madeira

$$R_{vd,1} = \frac{0,50 * 2,0 * 4,4 * (1,89 * 10^3)}{10^2 * 10^3} = 0,0832 \text{ kN}$$

Para corte duplo: $R_{vd,1} = 0,0832 * 2 = 0,1664 \text{ kN}$

$$N_{pregos} = \frac{2,6}{0,1664} = 15,63 \approx 16 \text{ pregos} = 8 \text{ pregos/face}$$

DIMENSIONAMENTO DAS LIGAÇÕES CONFORME EUROCODE5 (2004)

Propriedades gerais da madeira:

$$f_{c,k} = 20 \text{ MPa}$$

$$\rho_k = 500 \text{ kg/m}^3$$

$$t_1 = 2,0 \text{ cm} = 20 \text{ mm}$$

$$K_{90} = 1,35 + 0,015 * d \text{ (para madeiras moles)}$$

$$K_{90} = 1,35 + 0,015 * 4,4 = 1,416$$

Pregos 20x30:

$$f_{u,k} = 600 \text{ MPa}$$

$$d = 4,4 \text{ mm (prego liso)}$$

$$M_{y,k} = \frac{180}{600} * f_{u,k} * d^{2,6} \text{ (pregos de seção circular)}$$

$$M_{y,k} = \frac{180}{600} * 600 * 4,4^{2,6} = 8477,142 \text{ N.mm}$$

$$f_{h,0,k} = 0,082 * (1 - 0,01 * d) * \rho_k \text{ (com pré furação)}$$

$$f_{h,1,k} = f_{h,2,k} = 0,082 * (1 - 0,01 * 4,4) * 500 = 39,196 \text{ N/mm}^2$$

Outros:

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} = 1$$

$$f_{\alpha,k} = 20 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2 = 20 \cdot 10^{-6} \cdot 500^2 = 5 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{\text{head},k} = 70 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2 = 20 \cdot 10^{-6} \cdot 500^2 = 17,5 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{h,\alpha,k} = f_{h,0,k} \cdot \frac{1}{K_{90} \cdot \sin^2\alpha + \cos^2\alpha}$$

$$R_{\alpha,k} = f_{\alpha,k} \cdot d \cdot t_{\text{pen}} \text{ (ondet}_{\text{pen}} = 20 \text{ mm)}$$

$$T = \frac{R_{\alpha,k}}{4} \text{ (para pregos lisos o valor adotado é 15\% de T)}$$

Obs: $R_{\alpha,k}$, $f_{h,\alpha,k}$ e T são dependentes do ângulo α

Resistências para seções de corte duplo:

$$R_{v,k,g} = f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d$$

$$R_{v,k,h} = 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d$$

$$R_{v,k,j} = 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,k}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + T$$

$$R_{v,k,k} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + T$$

Ligação 1

Montante central: Nd = 2,6 kN (tração) ; $\theta = 71^\circ$

$$f_{h,71,k} = 39,196 \cdot \frac{1}{1,416 \cdot \sin^2 71^\circ + \cos^2 71^\circ} = 28,57 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{71x,k} = 5 \cdot \frac{1}{1,416 \cdot \sin^2 71^\circ + \cos^2 71^\circ} = 3,64 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{71x,k} = 3,64 \cdot 4,4 \cdot 20 = 320,32 \text{ N}$$

$$T = \frac{320,32}{4} = 80,08 \text{ N} \cdot 0,15 = 12,01 \text{ N}$$

$$R_{v,k,g} = 28,57 \cdot 20 \cdot 4,4 = 2514,16 \text{ N}$$

$$R_{v,k,h} = 0,5 \cdot 28,57 \cdot 20 \cdot 4,4 = 1257,08 \text{ N}$$

$$R_{v,k,j} = 1,05 \cdot \frac{28,57 \cdot 20 \cdot 4,4}{2 + 1} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot 1 \cdot (1 + 1) + \frac{4 \cdot 1 \cdot (2 + 1) \cdot 8477,14}{28,57 \cdot 4,4 \cdot 20^2}} - 1 \right] + 12,01$$

$$R_{v,k,j} = 1291,63 \text{ N}$$

$$R_{v,k,k} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1}{1 + 1}} \cdot \sqrt{2 \cdot 8477,14 \cdot 28,57 \cdot 4,4} + 12,01 = 1690,89 \text{ N}$$

Adota-se o menor dos valores obtidos: 1,257 kN

$$N_{\text{pregos}} = \frac{2,6}{1,257} = 2,07 \approx 3 \text{ pregos}$$

Ligação 2**Montante lateral:** Nd = 0,1kN (compressão) ; $\theta = 71^\circ$

$$f_{h,71,k} = 28,57 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{71x,k} = 3,64 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{71x,k} = 320,32 \text{ N}$$

$$T = 12,01 \text{ N}$$

$$R_{v,k,g} = 2514,16 \text{ N}$$

$$R_{v,k,h} = 1257,08 \text{ N}$$

$$R_{v,k,j} = 1291,63 \text{ N}$$

$$R_{v,k,k} = 1690,89 \text{ N}$$

Adota-se o menor dos valores obtidos: 1,257 kN

$$N_{\text{pregos}} = \frac{0,1}{1,257} = 0,08 \approx 2 \text{ pregos}$$

Diagonal: Nd = 3,1 kN (compressão) ; $\theta = 38^\circ$

$$f_{h,38,k} = 39,196 * \frac{1}{1,416 * \text{sen}^2 38^\circ + \text{cos}^2 38^\circ} = 33,86 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{38x,k} = 5 * \frac{1}{1,416 * \text{sen}^2 38^\circ + \text{cos}^2 38^\circ} = 4,32 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{38x,k} = 4,32 * 4,4 * 20 = 380,16 \text{ N}$$

$$T = \frac{380,16}{4} = 95,04 \text{ N} * 0,15 = 14,26 \text{ N}$$

$$R_{v,k,g} = 33,86 * 20 * 4,4 = 2979,68 \text{ N}$$

$$R_{v,k,h} = 0,5 * 33,86 * 20 * 4,4 = 1489,84 \text{ N}$$

$$R_{v,k,j} = 1,05 * \frac{33,86 * 20 * 4,4}{2 + 1} * \left[\sqrt{2 * 1 * (1 + 1) + \frac{4 * 1 * (2 + 1) * 8477,14}{33,86 * 4,4 * 20^2} - 1} \right] + 14,26$$

$$R_{v,k,j} = 1462,76 \text{ N}$$

$$R_{v,k,k} = 1,15 * \sqrt{\frac{2 * 1}{1 + 1}} * \sqrt{2 * 8477,14 * 33,86 * 4,4} + 14,26 = 1841,97 \text{ N}$$

Adota-se o menor dos valores obtidos: 1,463 kN

$$N_{\text{pregos}} = \frac{3,1}{1,463} = 2,12 \approx 3 \text{ pregos}$$

Ligação 3**Banzo superior:** Nd = 9,8kN (compressão) ; $\theta = 19^\circ$

$$f_{h,19,k} = 39,196 * \frac{1}{1,416 * \text{sen}^2 19^\circ + \text{cos}^2 19^\circ} = 37,54 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{19x,k} = 5 * \frac{1}{1,416 * \text{sen}^2 19^\circ + \text{cos}^2 19^\circ} = 4,79 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{19x,k} = 4,79 * 4,4 * 20 = 421,52 \text{ N}$$

$$T = \frac{421,52}{4} = 105,38 \text{ N} * 0,15 = 15,81 \text{ N}$$

$$R_{v,k,g} = 37,54 * 20 * 4,4 = 3303,52 \text{ N}$$

$$R_{v,k,h} = 0,5 * 37,54 * 20 * 4,4 = 1651,76 \text{ N}$$

$$R_{v,k,j} = 1,05 * \frac{37,54 * 20 * 4,4}{2 + 1} * \left[\sqrt{2 * 1 * (1 + 1) + \frac{4 * 1 * (2 + 1) * 8477,14}{37,54 * 4,4 * 20^2}} - 1 \right] + 15,81$$

$$R_{v,k,j} = 1580,94 \text{ N}$$

$$R_{v,k,k} = 1,15 * \sqrt{\frac{2 * 1}{1 + 1}} * \sqrt{2 * 8477,14 * 37,54 * 4,4} + 15,81 = 1940,28 \text{ N}$$

Adota-se o menor dos valores obtidos: 1,581kN

$$N_{\text{pregos}} = \frac{9,8}{1,581} = 6,20 \approx 7 \text{ pregos}$$

Ligação 4**Diagonais:** Nd = 3,1kN (compressão) ; $\theta = 19^\circ$

$$f_{h,19,k} = 37,54 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{19x,k} = 4,79 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{19x,k} = 421,52 \text{ N}$$

$$T = 15,81 \text{ N}$$

$$R_{v,k,g} = 3303,52 \text{ N}$$

$$R_{v,k,h} = 1651,76 \text{ N}$$

$$R_{v,k,j} = 1580,94 \text{ N}$$

$$R_{v,k,k} = 1940,28 \text{ N}$$

Adota-se o menor dos valores obtidos: 1,581 kN

$$N_{\text{pregos}} = \frac{3,1}{1,581} = 1,96 \approx 2 \text{ pregos}$$

Montante central: Nd = 2,6 kN (tração) ; $\theta = 90^\circ$

$$f_{h,90,k} = 39,196 * \frac{1}{1,416 * \text{sen}^2 90^\circ + \text{cos}^2 90^\circ} = 27,68 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{90x,k} = 5 * \frac{1}{1,416 * \text{sen}^2 90^\circ + \text{cos}^2 90^\circ} = 3,53 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{90x,k} = 3,53 * 4,4 * 20 = 310,64 \text{ N}$$

$$T = \frac{310,64}{4} = 77,66 \text{ N} * 0,15 = 11,65 \text{ N}$$

$$R_{v,k,g} = 27,68 * 20 * 4,4 = 2435,84 \text{ N}$$

$$R_{v,k,h} = 0,5 * 27,68 * 20 * 4,4 = 1217,92 \text{ N}$$

$$R_{v,k,j} = 1,05 * \frac{27,68 * 20 * 4,4}{2 + 1} * \left[\sqrt{2 * 1 * (1 + 1) + \frac{4 * 1 * (2 + 1) * 8477,14}{27,68 * 4,4 * 20^2} - 1} \right] + 11,65$$

$$R_{v,k,j} = 1262,68 \text{ N}$$

$$R_{v,k,k} = 1,15 * \sqrt{\frac{2 * 1}{1 + 1}} * \sqrt{2 * 8477,14 * 27,68 * 4,4} + 11,65 = 1664,17 \text{ N}$$

Adota-se o menor dos valores obtidos: 1,218 kN

$$N_{\text{pregos}} = \frac{2,6}{1,218} = 2,13 \approx 3 \text{ pregos}$$

ANEXO D – TABELA RESUMIDA DOS DEFEITOS ADMISSÍVEIS EM CADA CLASSE (MOURA *et al.*, 2012.)

| CONDIÇÕES PARA CLASSIFICAÇÃO VISUAL DE PEÇAS ESTRUTURAIS DE MADEIRA TIPO PINUS | | | | | |
|--|---------|---------------------------------|---|--|--|
| DEFEITOS | CLASSES | EE | Nº 1 | Nº 2 | Nº 3 |
| Encurvamento (Bow) | | × | Até 1% do comprimento da peça | Até 1,5% do comprimento da peça | Até 2% do comprimento da peça |
| Encurvamento Complexo (Complex Bow) | | × | × | × | × |
| Torcimento (Twist) | | × | × | × | × |
| Arqueamento (Spring) | | × | Até 10% da espessura da peça | Até 10% da espessura da peça | Até 20% da espessura da peça |
| Encanoamento (Cup) | | × | Para largura > 8,9 cm: admissível 1% da largura da peça (*) | Para largura > 8,9 cm: admissível 1,5% da largura da peça (*) | Para largura > 6,4 cm: admissível 2,5% da largura da peça (*) |
| Esmoado (wane) | | 15%, 3%, 20% (*) | 15%, 5%, 20% (*) | 30%, 10%, 30% (*) | 30%, 20%, 40% (*) |
| Rachaduras (Split) | | 60 cm mesma largura da peça (*) | 60 cm: mesma largura da peça (*) | 90 cm ou 1/4 do comprimento da peça: mesma largura da peça (*) | 1/6 do comprimento da peça: sem limitações se atravessar a largura da peça (*) |
| Bolsa de Resina (Resin Pocket) | | × | 5%, 25% (*) | 10%, sem restrições (*) | 15%, sem restrições (*) |
| Medula (Pith) | | × | 1/4 da espessura da peça | Sem restrições | Sem restrições |
| Furo de Insetos (Insect Holes) | | × | × | × | × |
| Galeria (Grub Hole) | | × | × | × | × |
| Grã Entrecruzada (Interlocked Grain) | | 8% (*) | 10% (*) | 12,5% (*) | 25% (*) |
| Madeira Ardida (Incipient Decay) | | × | × | × | × |
| Mancha Azul / Química (Blue / Chemical Stain) | | × | 10% (*) | 25% (*) | 50% (*) |
| Nó Cariado (Unsound Knot) | | × | × | 1/3 (*) | 1/2 (*) |
| Nó Gravata (Spike Knot) | | × | × | 1/3 (*) | 1/2 (*) |
| Nó de Quina (Corner Knot) | | × | 1/4 (*) | 1/3 (*) | 1/2 (*) |
| Nó Firme (Tight Knot) | | 1/6 (*) | 1/4 (*) | 1/3 (*) | 1/2 (*) |
| Nó Solto (Loose Knot) | | × | × | 1/3 (*) | 1/2 (*) |
| Nó Vazado (Knot Hole) | | × | × | 1/3 (*) | 1/2 (*) |
| Nó Espora (Pin Knot) | | 1/6 (*) | 1/4 (*) | 1/3 (*) | 1/2 (*) |

× Não admissíveis

(*) Não admissível em peças com largura até 8,9 cm nas classes 1 e 2, e 6,4 cm na classe 3.

(**) Limites de percentual do esmoado em relação à espessura, largura e comprimento da peça, respectivamente.

(*) Limites das rachas em relação ao comprimento e largura da peça, respectivamente.

(*) Limites máximos permitidos da bolsa de resina em relação à largura e comprimento da peça, respectivamente.

(*) Percentual máximo permitido para a inclinação da grã.

(*) Percentual máximo permitido da área da peça com mancha azul ou química.

(*) Limites para os diâmetros dos nós na largura da seção transversal, conforme figura ao lado.

*Obs.: O limite do diâmetro dos nós é calculado através do soma dos nós presentes a cada 15 cm de comprimento considerando-os como um grupo de nós.

Nota: Não é permitida nas Classes nº. 1 e nº. 2, qualquer peça que contenha mais que seis e sete tipos de defeitos descritos, respectivamente. Mesmo que estes ocorram dentro dos limites estabelecidos.

