

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

LEONARDO BOLIVAR PEDROSO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA RIGIDEZ DE LIGAÇÃO EM  
ESTRUTURAS TRELIÇADAS DE MADEIRA COM CHAPA DE  
DENTES ESTAMPADOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO  
2017

LEONARDO BOLIVAR PEDROSO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA RIGIDEZ DE LIGAÇÃO EM  
ESTRUTURAS TRELIÇADAS DE MADEIRA COM CHAPA DE  
DENTES ESTAMPADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado à Disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior em Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes

CAMPO MOURÃO  
2017



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Câmpus Campo Mourão  
Diretoria de Graduação e Educação Profissional  
Departamento Acadêmico de Construção Civil  
Coordenação de Engenharia Civil



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA RIGIDEZ DE LIGAÇÃO EM ESTRUTURAS TRELIÇADAS  
DE MADEIRA COM CHAPA DE DENTES ESTAMPADOS**

por

**Leonardo Bolivar Pedroso**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 8h00min do dia 26 de junho de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

**Prof. Dr. Marcelo Rodrigo Carreira**  
( UTFPR )

**Prof. Dr. Ronaldo Rigobello**  
( UTFPR )

**Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes**  
(UTFPR)  
**Orientador**

Responsável pelo TCC: **Prof. Me. Valdomiro Lubachevski Kurta**

Coordenador do Curso de Engenharia Civil:

**Prof. Dr. Ronaldo Rigobello**

*A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.*

Dedico este trabalho à minha Família.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Deus pela vida e o rumo que ela tem tomado, assim como as decisões que tem me ajudado a tomar, dentre elas a escolha do curso que estou prestes a finalizar, Engenharia Civil, não podendo ser outro que melhor me representa.

Aos meus pais, Osmar e Meri, que sempre me ajudaram para que eu pudesse vencer nesta etapa de suma importância na minha vida, nunca deixando faltar nada que eu precisasse, mesmo com suas respectivas dificuldades. Agradeço a eles pela educação, a transmissão de seus valores e todas os outros ensinamentos que levarei para o resto de minha vida.

Agradeço a todos os meus amigos, em geral, aqueles que sempre estiveram presentes em minha vida, compartilhando diversos momentos juntos, desde os bons aos nem tanto, e todas as emoções e experiências vividas junto a eles.

Ao PET Civil UTFPR – CM por todas as experiências que me proporcionou, cursos, viagens, pessoas que conheci e todo o conhecimento adquirido no período. Além de tudo às amizades que fiz no programa e todos os churrascos que fizemos juntos.

Sou grato ao Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes, tutor do PET, professor, orientador e amigo. Sou grato por sua paciência, seus conselhos e pelo seu voto de confiança, investindo e tentando sempre extrair ao máximo do potencial de cada aluno.

Ao professor MSc. Angelo Giovanni Bonfim Corelhano por se disponibilizar a ajudar na modelagem numérica, assim como o Engenheiro Civil Raí Kazuo Nagaoka por ter disponibilizado seus arquivos para a continuação de sua pesquisa. Ao técnico do Laboratório de Estruturas, Maiko Cristian Sedoski por auxiliar na realiza dos ensaios.

A Gang-Nail do Brasil por doar as chapas de dentes estampados utilizadas neste trabalho.

A todos os professores do curso de Engenharia Civil pelo conhecimento transmitido ao longo desses anos.

## RESUMO

PEDROSO, Leonardo B. (2017). **Análise da influência da rigidez de ligação em estruturas treliçadas de madeira com chapa de dentes estampados**. Campo Mourão, 2017. 52p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Campo Mourão.

Estruturas treliçadas de madeira são utilizadas com grande frequência na construção civil devido a sua eficiência. A industrialização deste tipo de estrutura em modelo pré-fabricado é recente. O que tornou possível este processo foi uma nova tecnologia desenvolvida para ligação das barras da treliça, a ligação por chapa de dentes estampados (CDE). Apesar de ser um método eficiente para ligação, treliças são geralmente calculadas com a suposição de que são rotuladas ou rígidas. No entanto, a ligação por CDE apresenta uma característica de ligação semi-rígida, de forma a influenciar os deslocamentos e esforços da estrutura e, portanto, deve ser considerado este tipo de articulação em seus cálculos. O foco deste trabalho é evidenciar a influência que este tipo de ligação gera na estrutura por meio de simulações numéricas variando os modelos de vinculações entre as barras e o ensaio de uma treliça ligada por CDE em escala real, comparando os resultados no final.

**Palavras-chave:** Treliças, chapa de dentes estampados, CDE, ligação semi-rígida.

## ABSTRACT

PEDROSO, Leonardo B. (2017). **Analysis of the joint stiffness influence on wood truss structures with metal plate connectors**. Campo Mourão, 2017. 52p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Campo Mourão.

Wood truss structures are often used in civil construction due to their efficiency. The industrialization of this type of structure in prefabricated model is recent. This process is possible due to a new technology developed for connecting the trusses elements, the connection by metal plate connectors. Despite being an efficient method for connection, the trusses are designed with an assumption that they are pinned or rigid. However, a MPC joint has a semi-rigid joint feature and this influences the displacements and internal forces of the structure. Therefore, this kind of joint must be considered in the structural analysis. The focus of this work is illustrates the influence of the type of connection in a truss by numerical simulations, varying the models of how the elements are connected, and the experimental analysis of a truss linked by MPC in real scale, comparing the results at the end.

**Palavras-chave:** Truss, metal plate connectors, MPC, semi-rigid joint.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Característica geométrica da CDE.....	15
Figura 2 - Componentes estruturais de cobertura.....	17
Figura 3 - Sistema estrutural de treliças convencional.....	19
Figura 4 - Sistema estrutural de treliças industrializadas.....	20
Figura 5 - Esquema de ensaio para ligação com conector dentado metálico.....	23
Figura 6 - Regressão linear para o gráfico P x f de cada conector.....	24
Figura 7 - Comportamento característico da ligação rotacional.....	26
Figura 8 - Detalhe do modelo proposto.....	27
Figura 9 - Modelo de barra com molas axiais.....	27
Figura 10 - Esquema da ligação tracionada com CDE.....	31
Figura 11 - Equilíbrio de momentos no ponto A de uma chapa.....	31
Figura 12 - Corpo de prova padrão, ensaio de tração da chapa.....	33
Figura 13 - Corpo de prova para o ensaio de cisalhamento da chapa.....	34
Figura 14 - Corpo de prova para o ensaio de arrancamento da chapa normal às fibras da madeira.....	34
Figura 15 - Ensaio de caracterização mecânica.....	36
Figura 16 - Pesagem dos corpos de prova.....	36
Figura 17 - Embutimento da CDE na madeira.....	37
Figura 18 - Ensaio de rigidez da ligação.....	37
Figura 19 - Figura esquemática do ensaio de rigidez da ligação.....	38
Figura 20 – Treliça conectada por CDE.....	38
Figura 21 – Figura esquemática de ensaio.....	39
Figura 22 - Treliça e aparato de ensaio.....	39
Figura 23 - Modelagem numérica no Robot.....	40
Figura 24 - Detalhamento de vínculo rígido.....	41
Figura 25 - Modelos numéricos.....	42
Figura 26 - Deslocamentos das análises numéricas e experimental.....	45
Figura 27 – Flecha máxima para cada modelo.....	45
Figura 28 - Diagrama Força x Deslocamento do ensaio da treliça.....	46
Figura 29 - Modelo de ruptura da ligação no banzo inferior da treliça.....	47
Figura 30 – Imagem superior do rompimento por arrancamento dos dentes do banzo inferior da treliça.....	47



Figura 31 - Diagrama de esforços normais para o Modelo 1 .....	53
Figura 32 - Diagrama de esforços normais para o Modelo 2 .....	53
Figura 33 - Diagrama de esforços normais para o Modelo 3 .....	53
Figura 34 - Diagrama de esforços normais para o Modelo 4 .....	54
Figura 35 - Diagrama de esforços normais para o Modelo 5a .....	54
Figura 36 - Diagrama de esforços normais para o Modelo 5b .....	54
Figura 37 - Ensaio de rigidez da ligação - CP1 .....	55
Figura 38 - Ensaio de rigidez da ligação - CP2 .....	55
Figura 39 - Ensaio de rigidez da ligação - CP 3 .....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de CEP para alguns modelos de CDE .....	25
Tabela 2 - Ensaio de caracterização física do Cedrinho .....	43
Tabela 3 - Ensaio de caracterização mecânica do Cedrinho .....	44
Tabela 4 - Ensaio de Rigidez .....	44
Tabela 5 - Deslocamentos (mm) .....	44
Tabela 6 - Comparação entre modelos de vinculação .....	48

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>13</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	13
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
<b>3 JUSTIFICATIVAS</b> .....	<b>14</b>
<b>4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>15</b>
4.1 CHAPA DE DENTES ESTAMPADOS (CDE) .....	15
4.2 SISTEMAS DE ESTRUTURAS DE MADEIRA PARA COBERTURA .....	17
4.2.1 Estrutura convencional.....	18
4.2.2 Estrutura pré-fabricada.....	19
4.3 RESISTÊNCIA E RIGIDEZ DE LIGAÇÕES UTILIZANDO CDE .....	20
4.4 LIGAÇÕES SEMI-RÍGIDAS.....	22
4.5 ANÁLISE ESTRUTURAL POR ELEMENTOS FINITOS .....	28
4.6 DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES EM CDE .....	30
4.7 ENSAIOS NORMATIZADOS .....	33
4.7.1 Ensaio de tração .....	33
4.7.2 Ensaio de cisalhamento da chapa de aço .....	33
4.7.3 Ensaio de arrancamento .....	34
<b>5 METODOLOGIA</b> .....	<b>35</b>
5.1 ANÁLISE EXPERIMENTAL .....	35
5.1.1 Ensaios de caracterização da madeira .....	35
5.1.2 Ensaio de rigidez da ligação .....	36
5.1.3 Confeção e ensaio da treliça ligada por CDE .....	38
5.2 MODELAGEM NUMÉRICA .....	40
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>43</b>
6.1 CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA E LIGAÇÃO POR CDE .....	43
<b>7 CONCLUSÕES</b> .....	<b>50</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>51</b>
<b>APÊNDICE</b> .....	Erro! Indicador não definido.

## 1 INTRODUÇÃO

Na construção civil, a madeira é um material que possui propriedades que a destaca frente a outros materiais, como baixo consumo de energia, alta resistência, baixo peso específico e trabalhabilidade. Considerando que o Brasil possui uma vasta produção de madeira, se torna pertinente o estudo e investimento em novas tecnologias para o seu uso na construção civil, pesquisando, entre outros, novos métodos de ligação estrutural (CALIL JR e DIAS, 1997).

A madeira foi muito utilizada na Europa, no período pós-guerra, devido à necessidade da reconstrução de suas cidades, a qual acelerou o desenvolvimento da indústria de estruturas de madeira, possibilitando tal reconstrução de forma rápida e econômica. Esse desenvolvimento propiciou o surgimento de um novo conector nos Estados Unidos, a Chapa com Dente Estampado, doravante denominada CDE. Neste contexto as CDE foram fundamentais para a produção de treliças pré-fabricadas em escala industrial, mostrando ser eficiente e com grandes vantagens em relação ao custo e tempo de execução (MARTINS, 2007).

Contudo, no Brasil, a madeira, em comparação com o concreto e o aço, é geralmente considerada um material de qualidade inferior. Essa concepção formou-se por ser costumeiramente utilizada de forma predatória e desordenada, em estruturas sem o devido dimensionamento, além do emprego de mão de obra não qualificada para a elaboração e execução desse tipo de projeto. A falta de pesquisa e divulgação de técnicas construtivas de estruturas utilizando a madeira como material, colaboram com a concepção da madeira ter qualidade inferior aos materiais mencionados, já que estes têm constantes pesquisas e divulgações dessas informações no mercado (BARALDI, 1996).

Na utilização da CDE, como agente de ligação, é de suma importância o conhecimento de suas características mecânicas e seu comportamento estrutural para garantir que o cálculo seja o mais preciso. Assim se torna importante levar em consideração a rigidez de ligação com chapas de dentes estampados no cálculo estrutural de tais elementos (CHEUNG, 2003).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Analisar a influência da rigidez das ligações por CDE de estruturas treliçadas de madeira a partir de modelagem numérica e avaliação experimental em treliça em escala real.

### **2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar a rigidez da ligação feita com chapa de dente estampado por meio de ensaio à tração da ligação;
- Realizar o ensaio de uma treliça em escala real utilizando CDE como elemento de ligação;
- Realizar simulações numéricas para treliças utilizando diferentes vinculações;
- Comparar os resultados das simulações numéricas com resultados em laboratório.

### 3 JUSTIFICATIVAS

Diversas formas de estruturas treliçadas podem ser executadas pelo sistema de ligações por CDE, facilitando a construção de diferentes modelos de estruturas de telhados. Devido as suas características que possibilitam uma montagem fácil e mais rápida do que o sistema convencional, tem sido verificado aumento significativo de sua utilização na construção civil.

No dimensionamento de estruturas, geralmente as ligações entre peças são admitidas como sendo rígidas ou articuladas. Para o caso de estruturas treliçadas, a determinação dos esforços e deslocamentos são realizados, convencionalmente, supondo que as ligações são rotuladas, não transmitindo momento fletor e não havendo deformação relativa entre as peças ligadas.

Estudos tem mostrado que as ligações por CDE são semi-rígidas, intermediária a uma rótula perfeita e um engaste perfeito, além de haver deformação da ligação ao incremento de esforços, fazendo com que seu comportamento seja consideravelmente diferente ao da idealização convencional.

As ligações entre as peças da madeira são os pontos críticos de um projeto estrutural, levando em consideração que a função é unir elementos distintos e transmitir os esforços solicitantes entre as peças. Desta maneira, o cálculo deve ser realizado com maior grau de precisão possível.

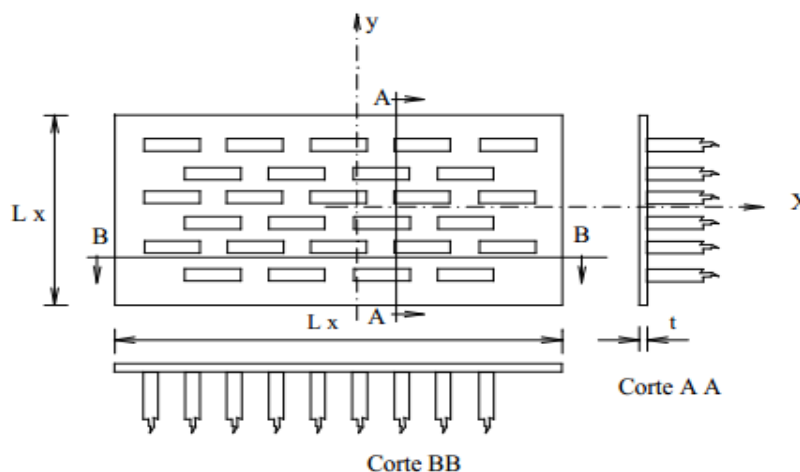
Levando em consideração a importância do dimensionamento correto de projeto, de maneira a se considerar todos os fatores que interferem no comportamento estrutural, este trabalho tem por objetivo avaliar a influência gerada pela rigidez de ligação por chapa de dentes estampados no comportamento estrutural de treliças de madeira.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 CHAPA DE DENTES ESTAMPADOS (CDE)

Os irmãos Carl e William Juriet, em 1954, nos Estados Unidos, fundaram a Automated Building Components Inc (ABC). Após muitas pesquisas, desenvolveram a “chapa de aço dentada”, que em 1997 foi normatizada no Brasil com o nome de Chapas com Dentes Estampados (CDE). Esse novo conector propiciou a fabricação de treliças em escala industrial. As chapas foram desenvolvidas com o propósito de substituir o processo de unir estruturas de madeira que envolviam encaixes, cavilhas, chapuzes e guias para a fixação lateral de pregos por um único elemento de ligação, a própria CDE (CALIL JR; DIAS, 1997).

A fabricação do conector CDE consiste basicamente em desenrolar uma fita de aço de largura e espessura constantes. Em seguida é feita a estampagem por uma prensa, e então, destacam-se os dentes para o plano normal a fita de aço, simultaneamente é cortada no comprimento pré-determinado pelo fabricante. A figura 1 apresenta as características geométricas da CDE.



**Figura 1- Característica geométrica da CDE**  
Fonte: ABNT NBR 7190:1997.

A principal fabricante mundial das CDE é a GANG-NAIL. A seguir são fornecidas algumas especificações da chapa de aço galvanizado a quente de primeira qualidade, modelo GNA-80:

- Atendimento aos requisitos da ASTM A446-72 Grau A;
- Tensão admissível à tração de 140 MPa;
- Cisalhamento admissível de 98 MPa;
- Limite de escoamento de 232 MPa;
- Limite de resistência à tração de 316,4 MPa;
- Número de dentes de 1,5 dentes/cm<sup>2</sup>;
- Espessura de 1,23 mm (chegando até 1,38 mm);
- Comprimento dos dentes de 7,8 mm;
- Quantidade efetiva de aço que resiste às solicitações longitudinais: 32,7%;
- Quantidade efetiva de aço que resiste às solicitações transversais: 70,2%;
- Peso específico de um CDE: 1,05g/cm<sup>2</sup>.

A ligação em estruturas de madeira realizada com as CDE não necessita de acessórios, como por exemplo, os parafusos, que em suas ligações necessitam de arruelas para garantir a fixação das barras de madeira (BARALDI, 1996). Segundo Baraldi (1996), as principais características de coberturas utilizando CDE são:

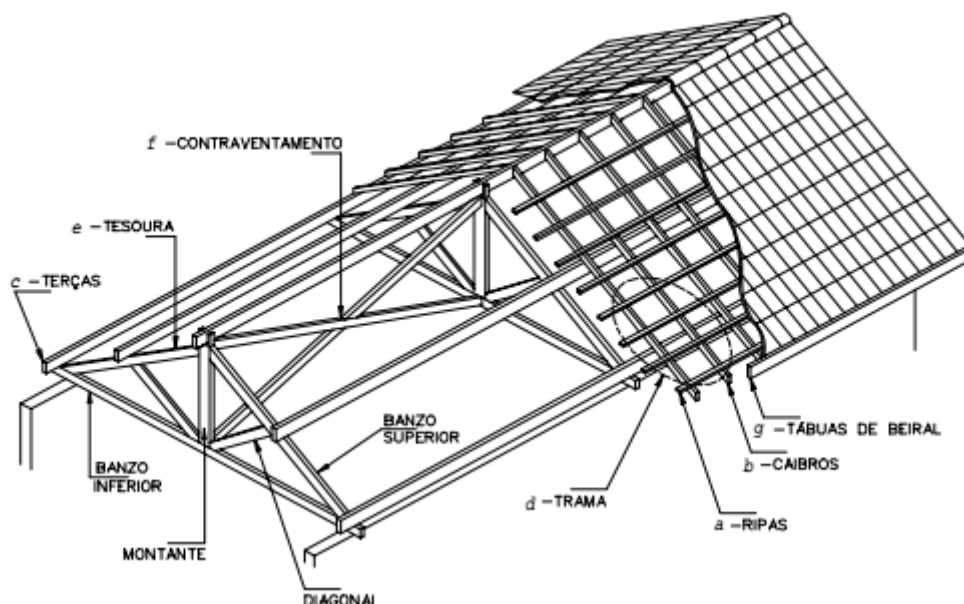
- A resistência necessária é obtida pela escolha adequada da dimensão da chapa, sendo sempre usada aos pares na ligação;
- Redução do peso da estrutura em até 40%, comparado ao sistema tradicional sem a elaboração de projeto por um profissional da engenharia;
- Alívio das cargas concentradas nas treliças, devido ao menor espaçamento entre as mesmas, e nas fundações, com a diminuição do próprio peso pelo menor consumo de madeira;
- Melhor aproveitamento do material;
- Qualidade técnica dos projetos;
- Industrialização;
- Controle de qualidade;
- O sistema apresenta um bom comportamento estrutural para vãos de até 20 metros;
- São utilizadas seções transversais mais esbeltas na ligação por CDE.

A variação da umidade das peças de madeira, no momento da prensagem, influencia significativamente na resistência e na rigidez das ligações, e de maneira diferenciada de acordo com a espécie de madeira (MARTINS, 2007).



## 4.2 SISTEMAS DE ESTRUTURAS DE MADEIRA PARA COBERTURA

A figura 2 apresenta os componentes de uma estrutura de cobertura:



**Figura 2 - Componentes estruturais de cobertura**  
Fonte: Partel (2000, p. 8).

Definições segundo Partel (2000):

a - RIPAS - Peças apoiadas sobre os caibros para a sustentação das telhas;

b - CAIBROS - Peças apoiadas sobre as terças para sustentação das ripas;

c - TERÇAS - Vigas apoiadas sobre as tesouras para a sustentação dos caibros;

d - TRAMA - É o conjunto de ripas, caibros e terças que serve de base para as telhas;

e - TESOURA – Elemento estrutural trapezoidal. Os elementos da treliça têm a seguinte denominação:

- **BANZO SUPERIOR** - Também chamado de asna, perna, empena ou membrura superior;
- **BANZO INFERIOR** - Também chamado de linha, rochante, tirante, tensor, ou membrura inferior;

- DIAGONAL - Também chamado de escora;
- MONTANTE - Também chamado de pontalete, suspensório ou pendural;

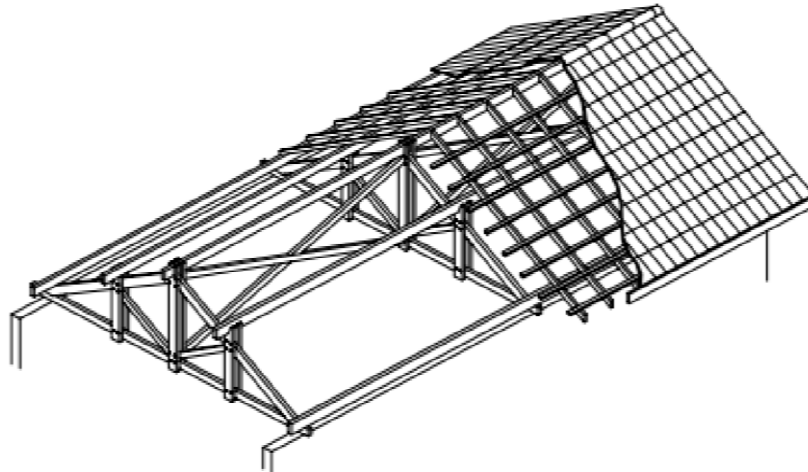
f - CONTRAVENTAMENTO - Estrutura formada por barras cruzadas dispostas de maneira a servir de sustentação para a ação das forças que atuam na estrutura, travando as tesouras e impedindo sua rotação e deslocamento, principalmente contra a ação do vento. Serve também como elemento de vinculação de peças comprimidas contra a flambagem lateral;

g - TÁBUAS DE BEIRAL - Também chamado de testeira, tabeira ou aba.

#### 4.2.1 Estrutura convencional

No sistema convencional, as estruturas são montadas no próprio canteiro de obras, utilizando geralmente os pregos e parafusos como elementos de ligação. Considerando coberturas com telhas de concreto ou cerâmicas, seus componentes básicos são: tesouras, terças, caibros, ripas e contraventamentos.

Entre outras características, este sistema utiliza barras diagonais (em treliças tipo Pratt) ou montantes (em treliças tipo Howe). Os espaçamentos entre tesouras no sistema convencional variam de 2,0 a 3,0 metros para coberturas com telhas cerâmicas, e de 3,0 a 4,5 metros para coberturas com telhas onduladas de fibrocimento, metálicas, entre outras (PARTEL, 2000). A figura 3 apresenta um modelo de estrutura convencional.

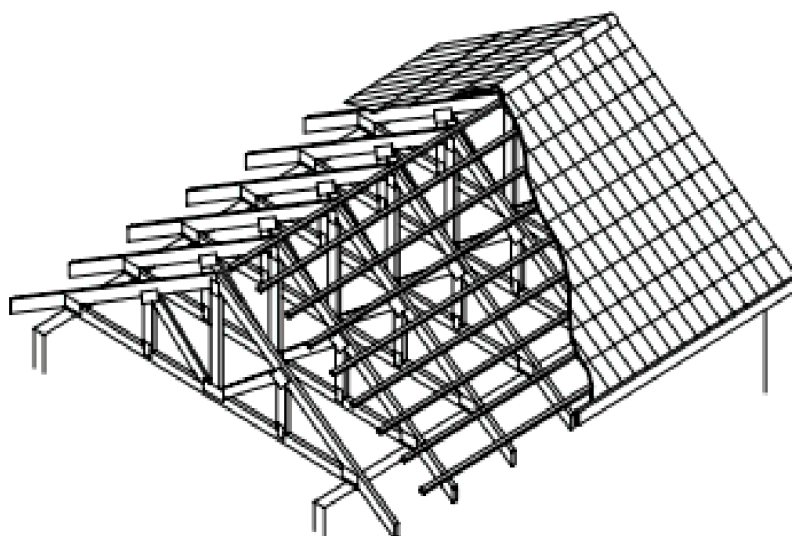


**Figura 3 - Sistema estrutural de treliças convencional**  
**Fonte: Partel (2000, p. 10).**

#### 4.2.2 Estrutura pré-fabricada

A principal característica do sistema de estrutura pré-fabricada é a utilização das CDE como conector. A tesoura utilizada é a pré-fabricada, posicionadas com vãos menores entre elas, substituindo tanto as tesouras convencionais quanto peças secundárias, como terças e caibros.

Os vãos entre tesouras para a estrutura pré-fabricada é de 0,8 a 1,0 metro para os casos com telhas cerâmicas, e para 1,5 a 2,0 metros para as demais. A CDE possibilita a diminuição da seção transversal das barras de madeira, conseqüentemente diminuindo o volume de madeira e o peso da cobertura, gerando uma economia em relação a estrutura de base e a própria cobertura (PARTEL, 2000). A figura 4 apresenta um modelo de cobertura de estrutura pré-fabricada.



**Figura 4 - Sistema estrutural de treliças industrializadas**  
**Fonte: Partel (2000, p. 11).**

Calil e Dias (1997) apresentam uma divisão do processo de fabricação em quatro etapas:

1. Usinagem das peças de madeira nas dimensões específicas;
2. Posicionamento das peças sobre uma mesa gabarito para a montagem das treliças;
3. Prensagem dos conectores através de prensas ou rolagem;
4. Armazenamento das treliças montadas na própria indústria ou no canteiro de obras, em local e maneira apropriados.

#### 4.3 RESISTÊNCIA E RIGIDEZ DE LIGAÇÕES UTILIZANDO CDE

Baraldi (1996) propôs um método de ensaio para a determinação da resistência e rigidez de estruturas de madeira ligadas por CDE, que foi incorporado à ABNT NBR 7190:1997. Nesta pesquisa, foram verificados os modos básicos de ruptura, que são: tração da chapa, cisalhamento da chapa e arrancamento da chapa, variando a direção da chapa em relação à força aplicada. Pela necessidade de adequar o conector às madeiras brasileiras, nos ensaios realizados foram utilizadas cinco espécies contidas em quatro classes de resistência, sendo duas de reflorestamento e três nativas.

Martins (2007) estudou a ligação por chapa de dentes estampados em três espécies de madeira, sendo das classes C20, C30 e C40. Para cada espécie foram determinadas a resistência e rigidez da ligação a partir dos seguintes modos de ruptura: arrancamento dos dentes da chapa paralelo e normal às fibras da madeira, cisalhamento da chapa e tração da chapa. Observou com os resultados que a densidade da madeira influi no comportamento da resistência e rigidez da ligação, assim como a umidade. Para madeiras mais densas, quando saturadas, a prensagem dos dentes ocorre com maior eficiência e conseqüentemente os valores de resistência e rigidez são maiores, contrário às madeiras de baixa densidade.

Nos ensaios de Moraes Junior et al. (2012), verificou-se três tipos de ruptura: ruptura na CDE, ruptura por arrancamento da CDE e ruptura na madeira. A maior ocorrência foi de ruptura na CDE. A resistência à tração paralela às fibras foi maior que perpendicular às fibras. Também foi observado que se ocorrer a ruptura por arrancamento, dever ser analisado se a ancoragem foi feita de forma correta e se a espécie da madeira é adequada para o uso da ligação por CDE.

Com o objetivo de fornecer os subsídios tecnológicos necessários aos profissionais ligados ao projeto e à construção de estruturas de madeira, Carvalho (2002) formulou um modelo matemático para determinar a força de ruptura da ligação pelo arrancamento dos dentes da chapa na madeira. Esse modelo se mostrou satisfatório para ligações tracionadas em ângulos de  $0^\circ$  e  $90^\circ$  em relação às fibras da madeira.

Partel (2000) destaca as configurações estruturais de treliças mais pertinentes para a industrialização e as principais características do sistema pré-fabricado para estruturas de cobertura. Em sua pesquisa, desenvolveu um software para projeto e dimensionamento de estruturas treliçadas em madeira para telhados.

Cheung (2003) em sua pesquisa sobre tabuleiro ortótropo treliçado protendido transversalmente para aplicação em pontes de madeira, estudou o comportamento teórico e experimental de treliças utilizando as CDE. Verificou que levando em consideração a rigidez da estrutura, há um desvio considerável no comportamento estrutural das treliças.

Gupta e Gebremedhin (1990) exibem um aparato para teste controlado por computador e o utilizam para estudar as ligações de treliças de madeira feitas com as CDE. O aparato proporciona a análise do comportamento dessas estruturas da forma mais próxima possível dos esforços reais. Nesta pesquisa, os autores verificam os modos de ruptura por arrancamento da chapa, rompimento da chapa e rompimento da madeira.

Gupta (1992) simulou três modelos de ligações de treliças tipo Fink (articulado, rígido e semi-rígido) por CDE em um programa estrutural de análise matricial. Foram representados por distribuição log-normal 400 dados de carregamento e de falha simulados para cada modelo de ligação. A partir dos dados das simulações, foi determinando um índice de confiabilidade e probabilidade de falha dos modelos de ligação das treliças. As treliças modeladas com ligações semi-rígidas apresentaram comportamento mais compatível com o real.

No trabalho de Calil e Dias (1997) apresenta-se algumas recomendações para o uso da madeira em estruturas de construções rurais, especificamente para coberturas e pontes. São expostas as vantagens da madeira relacionando resistência-densidade e a comparando com outros materiais também muito utilizados na engenharia civil, o concreto e o aço, neste mesmo aspecto.

#### 4.4 LIGAÇÕES SEMI-RÍGIDAS

A ligação de uma barra é denominada engastada, quando, em seu apoio, o giro é totalmente impedido. Em contrapartida, uma barra com ligação articulada não oferece resistência ao giro. Na prática, grande parte das conexões entre barras e nós apresentam um comportamento intermediário a engastada e articulada, denominado engastamento parcial (BARTHOLOMEU, 1995).

Santana (2002) afirma que na realidade nenhuma ligação é perfeitamente rígida ou perfeitamente articulada; sua classificação depende da relação entre momento fletor aplicado e giro relativo entre as peças ligadas. No entanto em muitos casos a ligação deve ser considerada como semi-rígida. Assim, se uma ligação for considerada semi-rígida, deve-se usar um método de cálculo que inclua suas deformações. Santana (2002) salienta que as normas técnicas não apresentam

métodos de cálculo para estruturas com ligações semi-rígidas, sendo restritas apenas aos cálculos das propriedades das ligações.

Através de análise teórica-experimental, por medidas de flechas de barras em balanço ligadas com chapas de dentes estampados, Bartholomeu (1995) deduziu valores de Coeficiente de Engastamento Parcial (CEP). Os valores do CEP variam de 0 a 1, onde ligações articuladas apresentam coeficiente 0 e ligações engastadas, coeficiente 1.

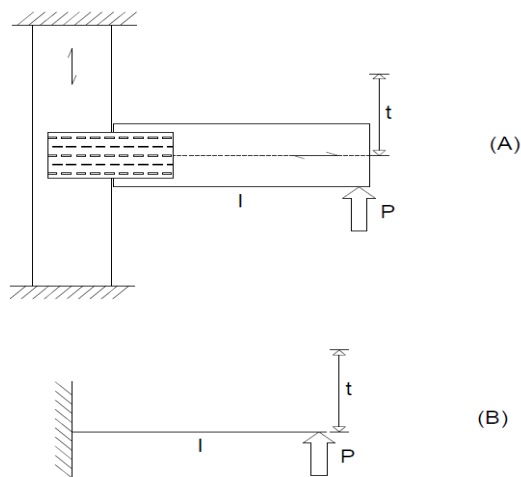
Considerando um modelo de viga em balanço com uma força concentrada na extremidade livre e considerando o engastamento perfeito, a flecha máxima na extremidade da viga pode ser determinada pela equação 1:

$$f = \frac{Pl^3}{3EI} \quad (1)$$

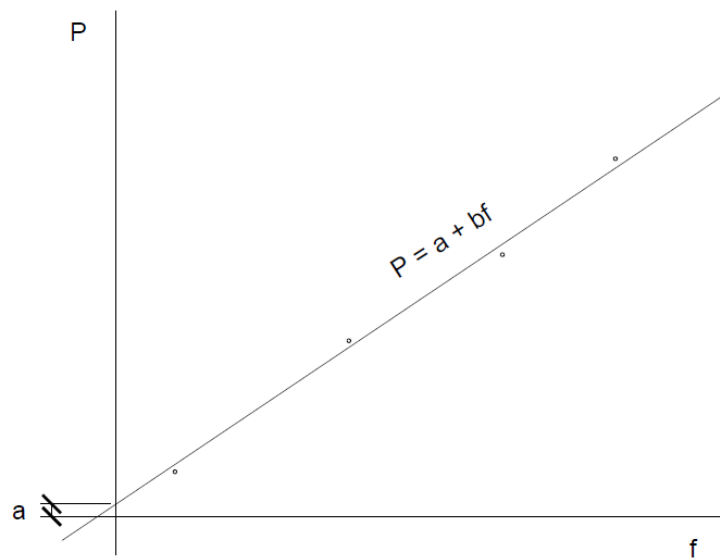
Considerando o Coeficiente de Engastamento Parcial (CEP) pode-se escrever a equação 1 como:

$$f = \frac{Pl^3}{3EI \cdot CEP} \quad (2)$$

Ensaando cada corpo de prova com diferentes geometrias de conectores, Bartholomeu (1995) obteve, através de regressão linear, uma reta representativa da carga P contra a flecha (figuras 5 e 6).



**Figura 5 - Esquema de ensaio para ligação com conector dentado metálico**  
Fonte: Adaptado de Bartholomeu (1995).



**Figura 6 - Regressão linear para o gráfico P x f de cada conector**  
**Fonte: Adaptado de Bartholomeu (1995).**

Esta reta foi dada pela expressão 3:

$$P = a + bf \quad (3)$$

Apresentando valores desprezíveis para o coeficiente “a”, com a reta passando pela origem. Assim, a equação passa a ser:

$$P = bf \quad (4)$$

Sendo “b” a tangente do ângulo de inclinação da reta.

A partir da equação 2, obteve-se a seguinte equação:

$$P = \frac{3EI \cdot CEP}{l^3} \cdot f \quad (5)$$

Juntando as equações 4 e 5 obteve-se:

$$b = \frac{3EI \cdot CEP}{l^3} \quad (6)$$



Chegando à equação para determinar o valor do CEP:

$$CEP = \frac{b \cdot l^3}{3EI} \quad (7)$$

A partir disso, Bartholomeu (1995) determinou o CEP correspondente para cada modelo de conector metálico dentado ensaiado com madeira da espécie Angico Preto (*Piptademia macrocarpa*). A Tabela 1 apresenta diferentes geometrias de conectores:

**Tabela 1 - Valores de CEP para alguns modelos de CDE**

<b>CONECTOR (cm x cm)</b>	<b>CEP</b>
3,6 x 7,9	0,40
3,6 x 11,0	0,68
3,6 x 17,9	0,76
7,1 x 7,9	0,29
7,1 x 11,9	0,42
7,1 x 15,9	0,56
7,1 x 19,8	0,71
7,1 x 25,8	0,73
10,7 x 11,9	0,32
10,7 x 15,9	0,45
10,7 x 19,8	0,55
10,7 x 23,8	0,63
14,2 x 15,9	0,34
14,2 x 23,8	0,57

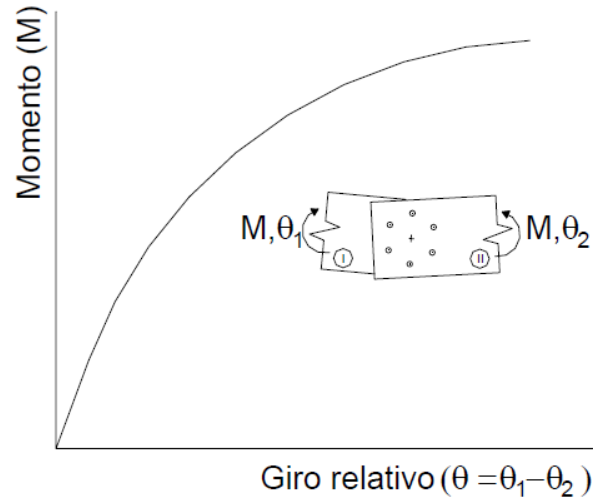
**Fonte: Bartholomeu (1995).**

É importante observar que algumas chapas metálicas de dimensões menores tiveram o CEP maior que outras chapas de dimensões superiores a estas.

As ligações semi-rígidas transmitem uma fração de momento fletor e um giro entre as peças ligadas. O conceito de deformação da ligação está associado, em parte, ao giro permitido entre as peças conectadas. Assim, a relação momento fletor e giro relativo é a melhor relação que caracteriza esse tipo de ligação (SANTANA, 2002).

De acordo com Santana (2002) o comportamento de uma ligação semi-rígida pode ser descrito de forma completa através das relações entre todos os deslocamentos na configuração deformada e as ações correspondentes. Estas

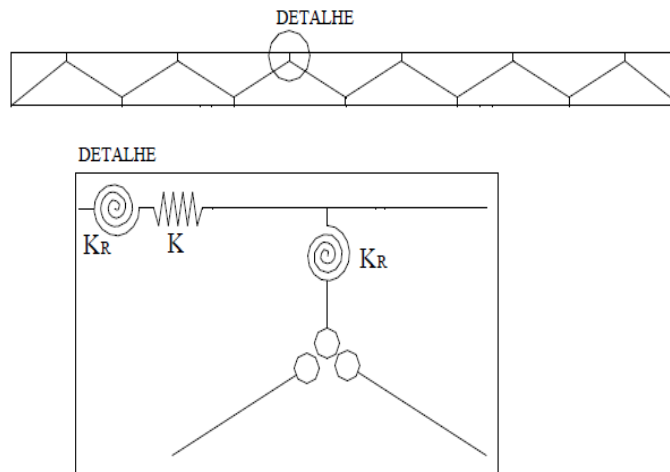
relações entre deslocamentos e ações podem ser representadas por uma matriz de rigidez.



**Figura 7 - Comportamento característico da ligação rotacional**  
Fonte: Santana (2002).

Cheung (2003) comparou os resultados da simulação numérica de uma treliça ligada por CDE com os dados obtidos em seu ensaio preliminar experimental. O modelo numérico apresentou resultados satisfatórios, porém os deslocamentos do ensaio experimental foram superiores aos do modelo teórico. Assim, foi observado que, para melhores resultados no modelo teórico, o ideal seria inserir a deformabilidade das ligações.

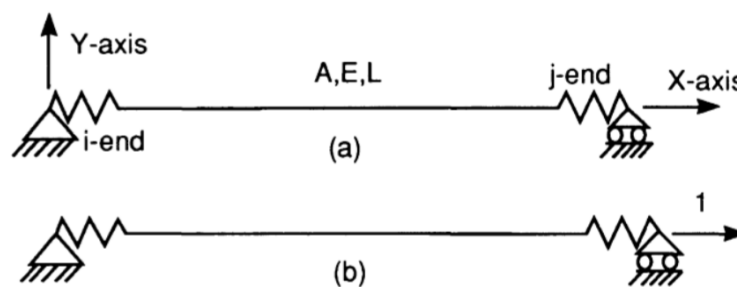
Para melhorar seus resultados teóricos, Cheung (2003) introduziu molas elásticas de translação e rotação nos banzos e nas diagonais através do elemento NLLink, simulando a deformabilidade das ligações (figura 8):



**Figura 8 - Detalhe do modelo proposto**  
**Fonte: Cheung (2003).**

A rigidez axial ( $K$ ) da ligação foi obtida através dos ensaios de caracterização, utilizando a média da rigidez obtida nos ensaios de tração de barras ligadas por CDE (CHEUNG, 2003).

Para incluir o efeito da rigidez axial na ligação por CDE, Gupta (1992) considerou um modelo de barra com molas em suas extremidades (figura 9a). A rigidez axial é obtida aplicando uma força unitária axial à uma extremidade da barra e descrevendo o deslocamento desta extremidade, considerando que este deslocamento é dado pelas parcelas das molas e da rigidez da barra (figura 9b).



**Figura 9 - Modelo de barra com molas axiais.**

O documento normativo CEN EN 1995-1-1:2004 apresenta uma formulação para determinar a rigidez rotacional através da rigidez obtida no ensaio de tração da ligação, relacionando a rigidez por dente do conector a partir do centro de rotação, equação 8:

$$K_r = \sum_{j=1}^n K_{\text{dente}} \cdot r_j^2 \quad (8)$$

Onde:

$K_r$  = rigidez à rotação (kN·m/rad);

$n$  = número de dentes efetivos de uma chapa;

$r_j$  = distância do eixo de rotação da chapa a cada dente (mm);

$K_{\text{dente}}$  = rigidez por dente (kN/mm).

A modelagem numérica contendo os valores de rigidez axial e rotacional apresenta-se como uma ótima alternativa, obtendo valores mais próximos dos valores experimentais. Quanto maior os esforços, mais representativo fica o modelo considerando as constantes de rigidez da ligação. Segundo Cheung (2003), a deformabilidade axial exerce uma influência significativa para esforços elevados.

Amanuel (2000) observou que a rigidez da ligação com CDE diminui com madeiras de módulo de elasticidade menores ou com chapas mais finas. Emerson (2004) observou também que, com o aumento do tamanho da chapa e o aumento da área de dentes embutidos, há um aumento na rigidez da CDE.

#### 4.5 ANÁLISE ESTRUTURAL POR ELEMENTOS FINITOS

O comportamento das estruturas reais pode ser diferente das simulações numéricas. Um dos fatores que levam a esta diferença é a semi-rigidez da ligação, que é geralmente desconsiderada para a simplificação dos cálculos (KARTAL, 2010).

Estruturas treliçadas são largamente utilizadas na engenharia civil para vencer grandes vãos (existem vários modelos). Em geral esse tipo de estrutura é calculado como tendo seus nós rotulados, entretanto, devido ao modo de fixação das barras, dificilmente a ligação apresenta total liberdade de giro (KARTAL, 2010).

Convencionalmente treliças ligadas por CDE são analisadas com a premissa de que são articuladas ou rígidas. Embora isso não seja completamente verdade, essa simplificação facilita nos cálculos. Entretanto, as ligações são semi-rígidas, permitindo

algum movimento entre as barras da treliça, podendo ser de translação ou rotação (GUPTA, 1992).

Santana (2002) através de sua revisão bibliográfica constatou que os métodos utilizados para a análise de estruturas com ligações semi-rígidas resultam em processos similares aos utilizados na análise matricial e classificou os métodos em dois tipos: métodos de análise matricial com elementos de barra e elementos de ligação; e métodos de análise matricial com elementos de barra modificados.

Segundo Ellegaard (2006) os principais modelos utilizados para a representação da rigidez de ligação são: modelos utilizando elementos de molas, modelos com elementos fictícios, modelos com pequenas barras fictícias de menor módulo de elasticidade e modelos baseados em elementos especiais que descrevem o comportamento da ligação.

Para análise matricial com elementos de barra e elementos de ligação, dois elementos são ligados por um elemento deformável, semi-rígido. Este é um método prático porque consiste basicamente na definição de elementos de ligação que representam as deformações adicionalmente aos elementos de barra. Na análise matricial com elementos de barra modificados, para a consideração do efeito das ligações semi-rígidas, é modificada a matriz de rigidez dos elementos de barra (SANTANA, 2002).

Se a análise numérica da estrutura de treliça é feita como se suas ligações fossem rotuladas, a estrutura apresentaria apenas solicitações de esforços internos normais às barras. Entretanto, se considerar a ligação semi-rígida, a análise numérica apresenta, além do esforço normal, esforço cortante e momento fletor (KARTAL, 2010). Ao adicionar a rigidez da ligação, pode-se obter valores mais próximos do real para os esforços nas barras e o comportamento de sua estrutura (GUPTA, 1992).

Gupta (1992) comparou três modelos de vinculações para treliças com CDE por análise matricial: articulada, rígida e semi-rígida. Os valores de rigidez inseridos na análise para vinculação semi-rígida foram obtidos experimentalmente através das curvas de carregamento-deflexão e momento-rotação.

Após a análise dos modelos de cada treliça com suas vinculações, Gupta (1992) observou que os esforços normais dos três modelos analisados foram próximos, porém tiveram esforços de momento fletor, deslocamentos e giros distintos.

Kartal (2010) estudou a influência da rigidez rotacional em diferentes estruturas utilizando software de elementos finitos. Na estrutura de treliça, verificou-se que, com o aumento da rigidez da ligação, houve mudança nos esforços solicitantes e conseqüentemente no comportamento desta estrutura. De tal modo que, se torna importante a consideração desta parcialidade de rigidez nas ligações para que o modelo numérico se torne mais confiável e próximo do comportamento real.

#### 4.6 DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES EM CDE

O CEN EN 1995-1-1:2004 apresenta um método de dimensionamento para as ligações em CDE, entretanto a ABNT NBR 7190:1997 não apresenta critérios de dimensionamento, apenas apresenta um roteiro de ensaios para a verificação do desempenho desta ligação.

A NBR 7190 (ABNT, 1997), define a resistência da ligação por CDE pelo escoamento da chapa, início de arrancamento ou por qualquer fenômeno de ruptura da madeira, para uma deformação específica residual da ligação de 2‰, medida em uma base de referência padronizada, igual ao comprimento da chapa metálica na direção do esforço aplicado.

A partir do modelo de corpo de prova ligado por CDE paralela às fibras da madeira, Carvalho (2007) desenvolveu um modelo matemático para a contribuição na definição de critérios para o dimensionamento deste tipo de ligação, o modelo esquemático está representado nas figuras 10 e 11.

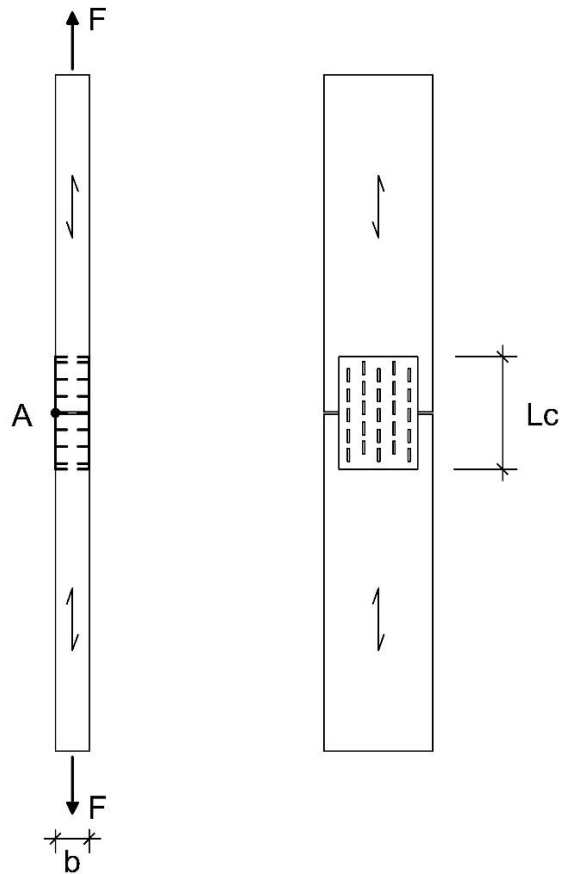


Figura 10 - Esquema da ligação tracionada com CDE  
 Fonte: Adaptado de Carvalho (2002).

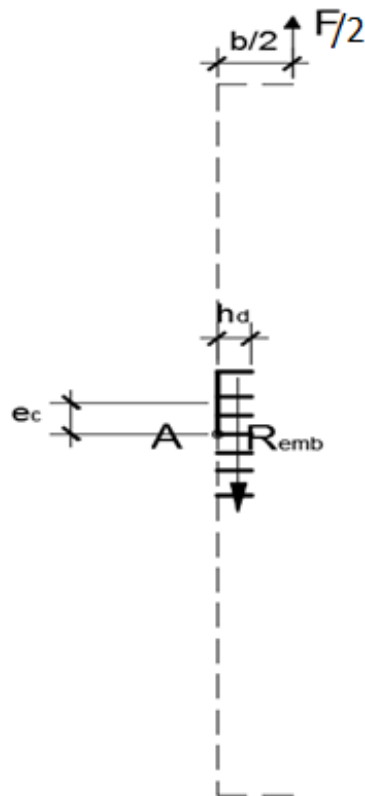


Figura 11 - Equilíbrio de momentos no ponto A de uma chapa

Fonte: Adaptado de Carvalho (2002).

Da equação de equilíbrio  $\sum M = 0$ :

$$R_{emb} = \frac{n}{2} \cdot h_d \cdot e_d \cdot \sigma_{emb} \quad (9)$$

$$\frac{F}{2} \cdot \frac{b}{2} = R_{emb} \cdot \frac{h_d}{2} \quad (10)$$

Onde:

F – Força de tração aplicada

b – Largura das peças interligadas

$R_{emb}$  – Resultante das forças de embutimento

n – Número de dentes de uma chapa

$h_d$  – Altura do dente

$e_d$  – Espessura do dente

$\sigma_{emb}$  – Tensão atuante de embutimento

Das expressões 11 e 12:

$$\frac{F}{2} \cdot \frac{b}{2} = \frac{n}{2} \cdot h_d \cdot e_d \cdot \sigma_{emb} \cdot \frac{h_d}{2} \quad (11)$$

$$F = \frac{n \cdot e_d \cdot h_d^2 \cdot \sigma_{emb}}{b} \quad (12)$$

Para a força de embutimento máxima ( $f_{emb,0}$ ), atinge-se a força de ruptura na ligação, causando o arrancamento da CDE, assim podemos admitir para a ruptura:

$$F = \frac{n \cdot e_d \cdot h_d^2 \cdot f_{emb,0}}{b} \quad (13)$$



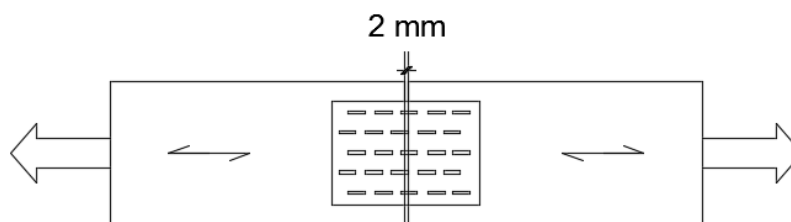
## 4.7 ENSAIOS NORMALIZADOS

Contêm na ABNT NBR 7190:1997 três métodos de ensaio que serão apresentados neste capítulo, sendo eles baseados nos modos de ruptura da ligação:

- Tração da chapa de aço;
- Cisalhamento da chapa de aço;
- Arrancamento da chapa.

### 4.7.1 Ensaio de tração

Para o ensaio à tração da chapa de aço, o modelo de corpo de prova consiste em, unir duas peças de madeira, com espaçamento de 2 mm, utilizando um par de CDE (figura 12).



**Figura 12 - Corpo de prova padrão, ensaio de tração da chapa**

### 4.7.2 Ensaio de cisalhamento da chapa de aço

Para o ensaio de cisalhamento da chapa, a NBR 7190 (NORMA..., 1997) apresenta variações de modelos de corpo de prova e variação na posição da CDE, de 0° a 90°. Há uma folga de 2 mm entre as peças de madeira (figura 13).

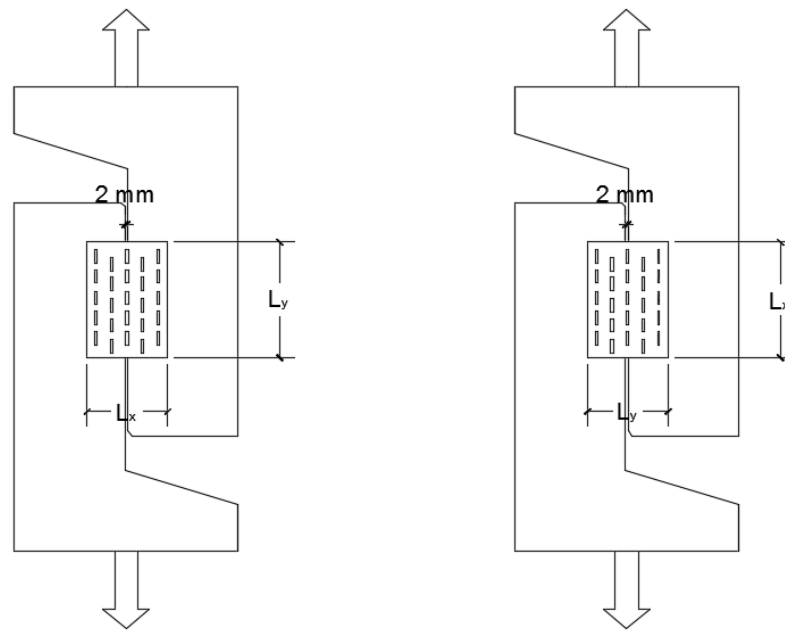


Figura 13 - Corpo de prova para o ensaio de cisalhamento da chapa

#### 4.7.3 Ensaio de arrancamento

Para o ensaio de arrancamento da chapa normal às fibras da madeira, são utilizadas duas peças de madeira por um par de conector metálico de maneira a formar um “T”. O espaçamento entre as peças deve ser de 2 mm (figura 14).

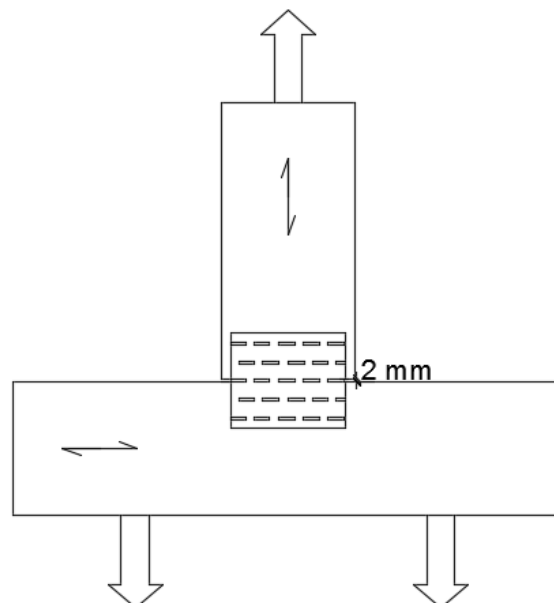


Figura 14 - Corpo de prova para o ensaio de arrancamento da chapa normal às fibras da madeira.

## 5 METODOLOGIA

A análise da influência da rigidez da ligação em estrutura de madeira ligada por CDE foi realizada através da revisão bibliográfica de dissertações e artigos de pesquisadores renomados acerca do tema. Além do estudo teórico, foi confeccionada uma treliça em escala real para a análise experimental e modelagem numérica da mesma estrutura. Os resultados experimentais são comparados aos resultados do modelo numérico para a validação da teoria.

### 5.1 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Para aferir o comportamento de estruturas em madeira ligadas por CDE foram realizados ensaios no Laboratório de Sistemas Estruturais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Campus Campo Mourão. Os ensaios contribuíram não somente na verificação do comportamento real da estrutura, mas também para dados para alimentar o modelo numérico em elementos finitos.

#### 5.1.1 Ensaios de caracterização da madeira

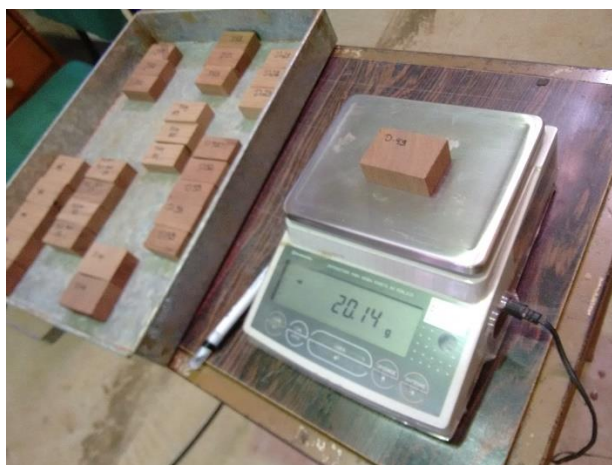
A madeira utilizada para a construção da treliça foi da espécie *Erismia uncinatum warm.*, popularmente conhecido como Cedrinho, pertencente à família Vochysiaceae. Madeira obtida de árvore de grande porte que pode alcançar até 25 metros de altura e 1,5 metro de diâmetro à altura do peito. Sua madeira é de boa trabalhabilidade, apresenta tronco ereto, casca acinzentada, tem peso moderado, cor róseo-acastanhada, às vezes manchada, superfície pouco lustrosa, grã direta a ondulada, textura média, cheiro e gosto indistintos. Esta espécie ocorre naturalmente em florestas pluviais de terra firme, em especial na Região Amazônica, nos Estados do Amazonas, Mato Grosso, Pará e Rondônia e tem sido utilizada na construção civil (FINGER ET. AL., 2002).

Os ensaios de caracterização mecânica da madeira, para obter o módulo de elasticidade e resistência, foram realizados na Máquina Universal de Ensaios EMIC DL 30.000 de acordo com a NBR 7190 (NORMA..., 1997), figura 15.



**Figura 15 - Ensaio de caracterização mecânica**

A caracterização física da madeira foi determinada através de ensaios de umidade e massa específica realizados de acordo com NBR 7190 (NORMA..., 1997), figura 16.



**Figura 16 - Pesagem dos corpos de prova**

### 5.1.2 Ensaio de rigidez da ligação

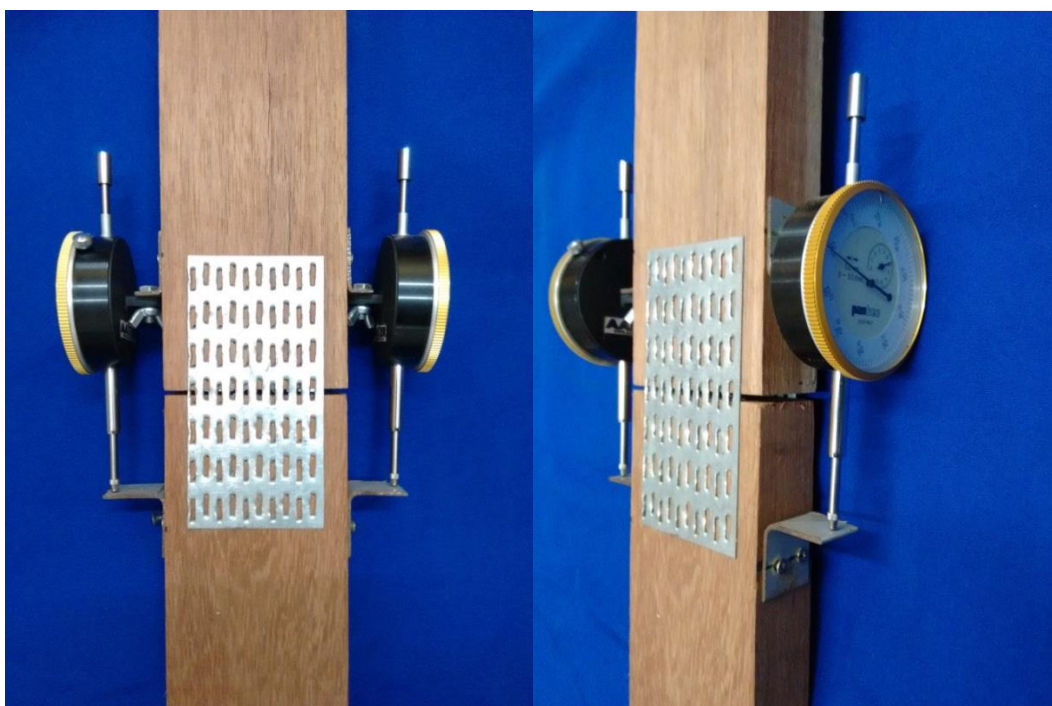
Para a determinação da rigidez da ligação, foram construídos corpos de prova utilizando peças de madeira ligadas por CDE. As chapas de dentes estampados tinham dimensões de 10,7cm x 7,2cm. A ancoragem dos dentes da CDE foi feita

utilizando a Máquina Universal de Ensaio EMIC DL 30.000, com capacidade de carga 300 kN. As chapas foram embutidas um lado por vez (figura 17).



**Figura 17 - Embutimento da CDE na madeira**

A deformação da ligação foi medida através de relógios comparadores de deslocamento, com precisão de centésimos de milímetros, posicionados entre cantoneiras metálicas, fixadas nas extremidades da CDE (figura 18).



**Figura 18 - Ensaio de rigidez da ligação.**

Devido ao possível esmagamento da madeira na região das garras da máquina, foram coladas barras de aço nas extremidades dos corpos de prova,

paralelas às fibras da madeira, de maneira a solucionar este problema (figura 19). As barras de 1/2" foram fixadas a 20 cm de profundidade do corpo de prova utilizando o adesivo a base de epóxi Compound, da Vedacit.

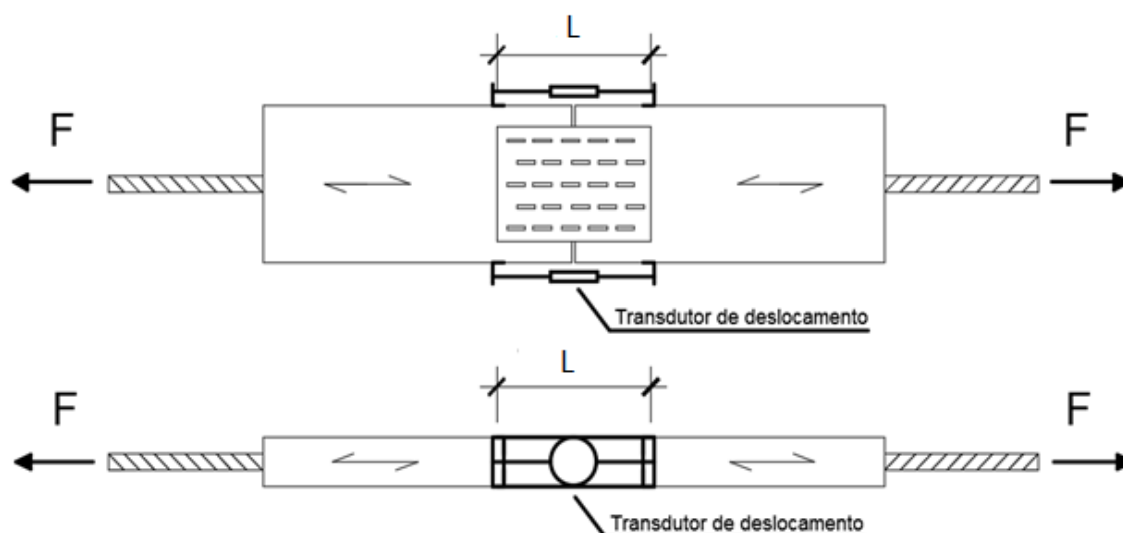


Figura 19 - Figura esquemática do ensaio de rigidez da ligação.

### 5.1.3 Confeção e ensaio da treliça ligada por CDE

Neste presente trabalho foi confeccionada uma estrutura treliçada de banzos paralelos e ligações com CDE, na cravação da mesma foi utilizada uma peça de madeira para distribuir a força aplicada pela marreta ao longo das chapas. A treliça foi confeccionada com 580 cm de comprimento e 50 cm de altura. As peças de madeira possuíam seção transversal de 3,60 cm x 9,65 cm. Foram utilizadas CDE de 23,9 cm por 10,7 cm e 10,7 cm por 7,2 cm (figura 20).

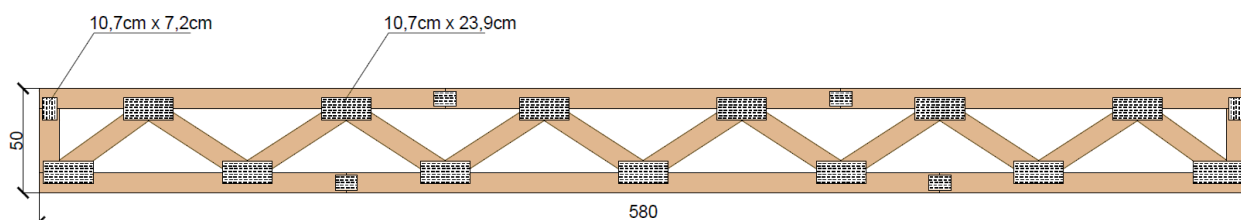


Figura 20 – Treliça conectada por CDE

A estrutura treliçada foi ensaiada em um pórtico equipado com cilindro hidráulico para a aplicação da carga e célula de carga para a leitura desta. Os valores



de deslocamentos foram obtidos por meio de transdutores de deslocamento, instalados no centro do vão, sob cada uma das forças aplicadas e também sob os apoios (figuras 21 e 22).

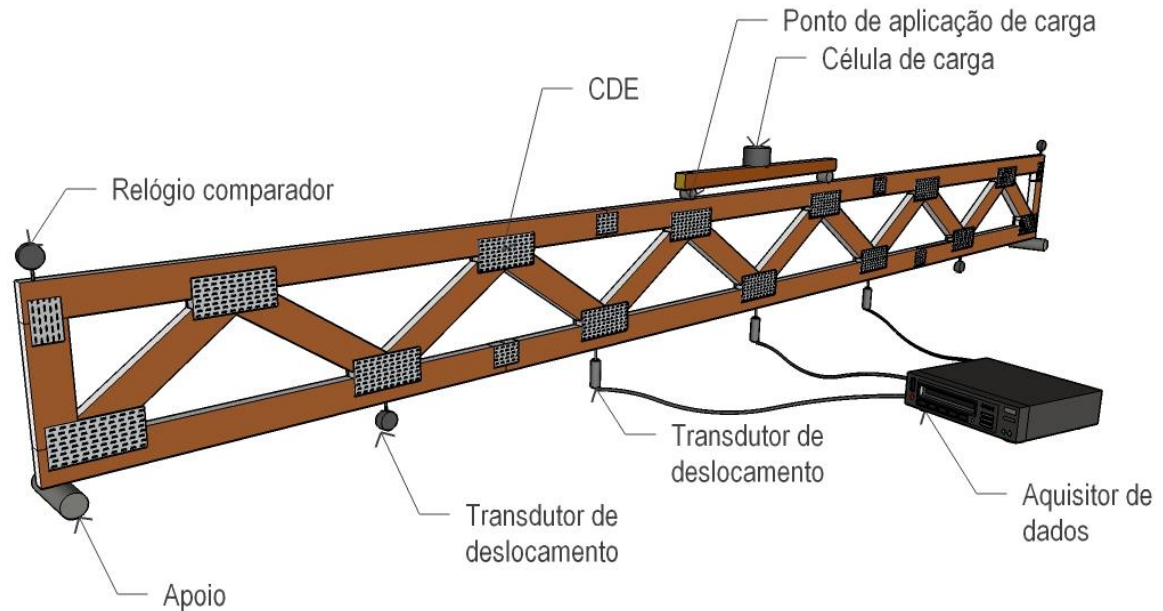


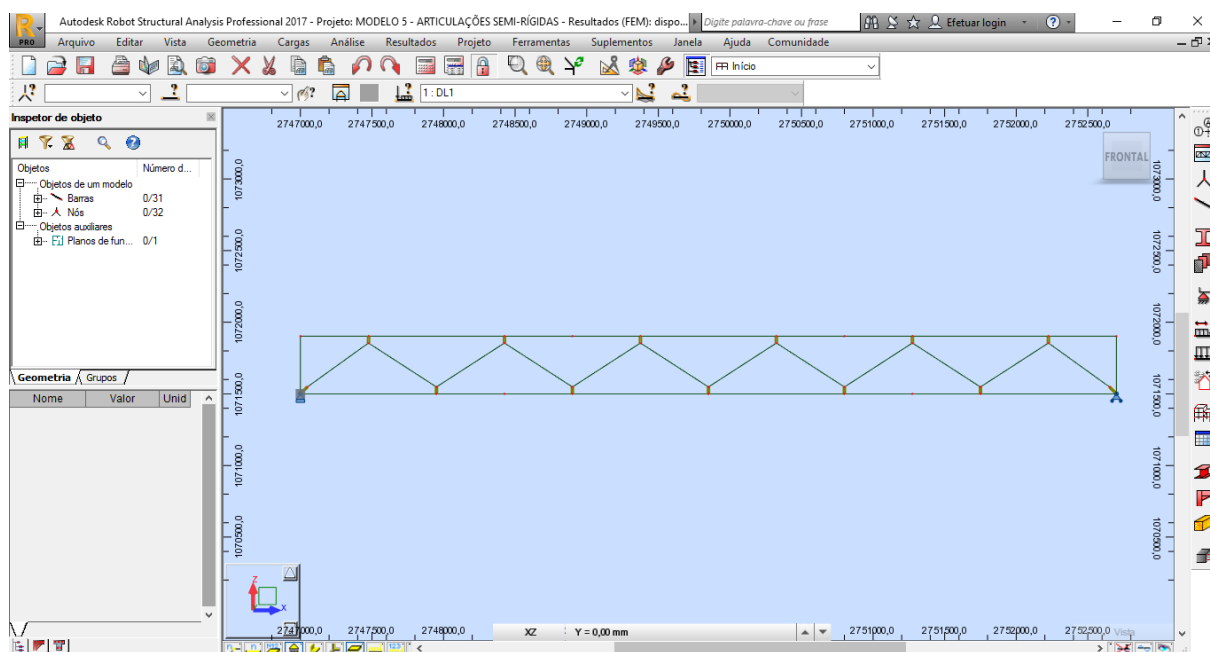
Figura 21 – Figura esquemática de ensaio



Figura 22 - Treliça e aparato de ensaio

## 5.2 MODELAGEM NUMÉRICA

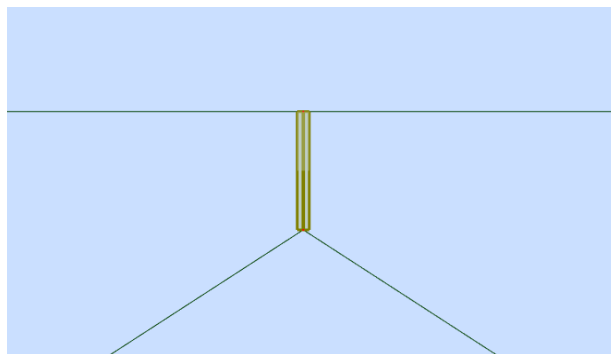
As modelagens numéricas da estrutura treliçada foi feita por meio do software em elementos finitos Autodesk Robot Structural Analysis Professional, versão 2017. Os modelos numéricos apresentam as mesmas dimensões que a treliça confeccionada em laboratório, sendo alimentados pelas informações obtidas nos ensaios de caracterização da madeira (figura 23).



**Figura 23 - Modelagem numérica no Robot**

Como os eixos das barras diagonais não coincidem com os nós das barras dos banzos, foi necessário inserir a ferramenta “Vínculos Rígidos”, essa ferramenta permite uma compatibilidade de deslocamento entre os nós, restringindo os graus de liberdade de rotação e translação. A figura 24 representa o detalhamento do vínculo rígido com os eixos das diagonais e banzo:





**Figura 24 - Detalhamento de vínculo rígido**

As variações entre os modelos numéricos são referentes à concepção do dimensionamento da estrutura, considerando diferentes tipos de vinculação. Os modelos analisados foram os seguintes (Figura 25):

- Modelo 1: Treliza clássica, com todos os nós articulados;
- Modelo 2: Treliza com banzos contínuos e diagonais articuladas;
- Modelo 3: Treliza com ligações dos banzos e diagonais articuladas;
- Modelo 4: Treliza tipo pórtico, com vínculos engastados;
- Modelo 5a: Trelizas com ligações deformáveis na direção axial, com rigidez à rotação nula.
- Modelo 5b: Trelizas com ligações deformáveis na direção axial, com rigidez à rotação infinita.

Para os modelos 5a e 5b foram modificadas as propriedades das extremidades das barras ligadas por CDE no modelo real, sendo adicionado o valor da rigidez axial da ligação, obtidos em ensaio, através da inclusão de propriedades elásticas nas extremidades das barras.

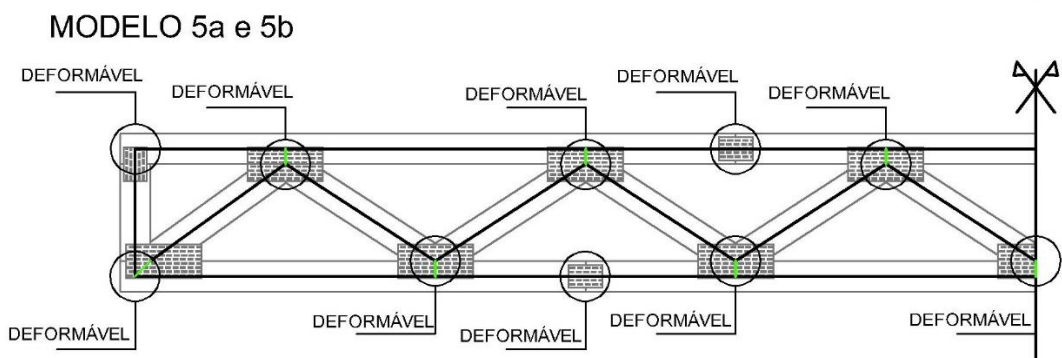
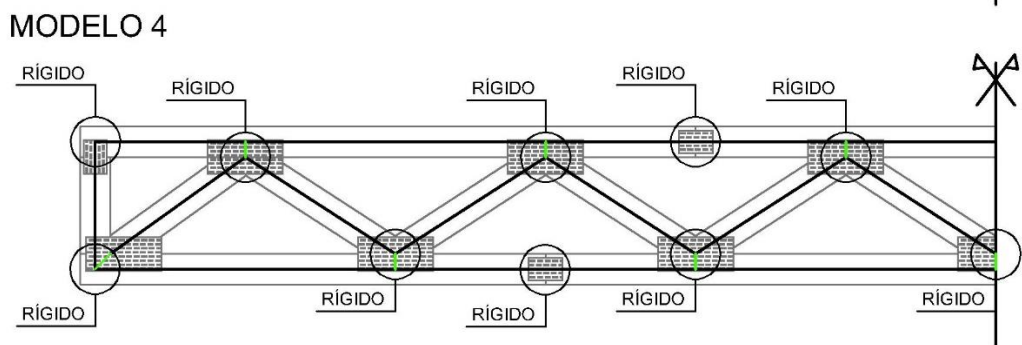
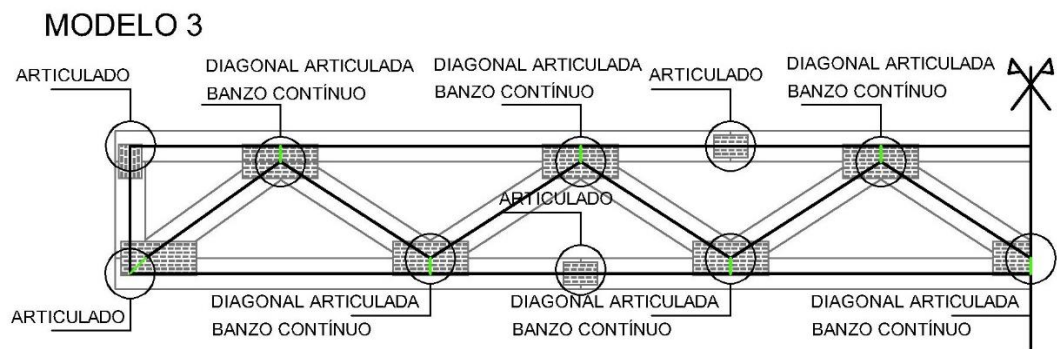
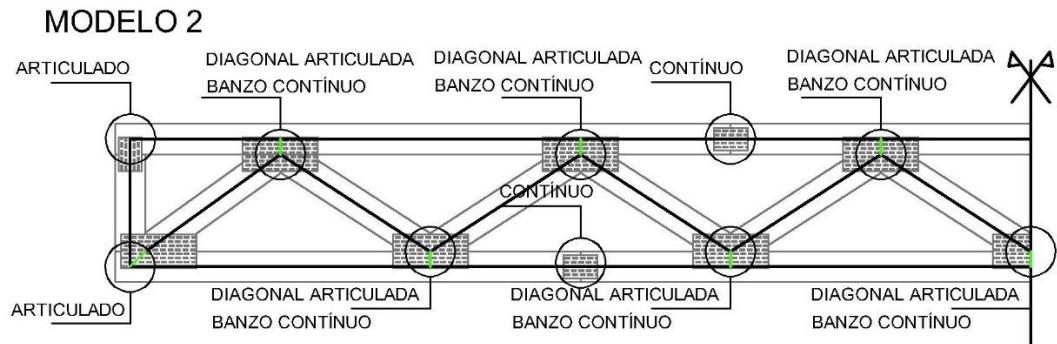
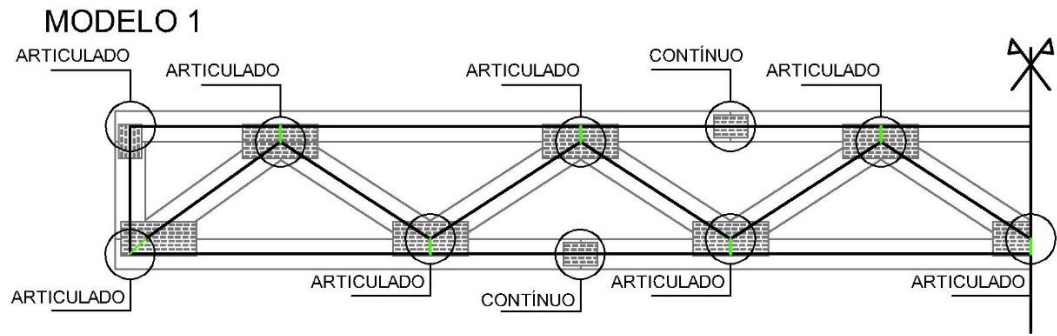


Figura 25 - Modelos numéricos

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA E LIGAÇÃO POR CDE

Os resultados da caracterização mecânica e física do cedrinho estão presentes nas tabelas 2 e 3 respectivamente.

**Tabela 2 - Ensaio de caracterização física do Cedrinho**

Corpo de Prova	Umidade (%)	Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )
1	12,64	456,82
2	11,61	458,75
3	12,10	460,14
4	22,23	511,33
5	11,63	450,43
6	11,44	447,97
7	12,66	617,28
8	12,61	601,89
9	12,66	618,73
10	12,76	557,15
11	12,66	540,59
12	12,02	536,22
13	12,19	544,15
14	12,36	483,62
15	12,38	445,28
16	12,52	473,96
17	12,30	431,89
18	12,85	500,40
19	12,80	414,11
20	13,24	441,61
21	13,04	526,79
22	12,70	483,33
23	12,46	429,39
24	12,51	474,35
25	12,11	527,29
26	12,48	590,67
27	12,93	675,23
28	13,33	607,23
29	13,00	490,00
Média	12,61	483,62
Desvio Padrão	1,86	68,43
Coefficiente de Variação (%)	14,77	14,15

**Tabela 3 - Ensaio de caracterização mecânica do Cedrinho**

Corpo de Prova	Resistência (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)
1	27,81	8319
2	31,00	6058
3	29,36	8367
4	28,48	10563
5	26,24	12236
6	43,98	12246
7	42,50	11889
8	41,30	11893
9	45,77	12080
10	42,91	11458
11	39,57	10866
12	41,96	11899
Média	40,40	116734
Desvio Padrão	7,33	2004
Coefficiente de variação (%)	18,12	17,2

Para determinar a rigidez da ligação por CDE foram ensaiados três corpos de prova (Tabela 4).

**Tabela 4 - Ensaio de Rigidez**

C.P.	Rigidez (kN/mm)
1	57,54
2	59,75
3	63,15
Média	60,15

A seguir a Tabela 5 e as figuras 26 e 27 apresentam os deslocamentos verticais para cada tipo de estrutura analisada numericamente e o deslocamento do ensaio experimental da treliça com chapa de dentes estampados. Para as análises numéricas foi aplicado uma carga de 10417 N, carga de leitura do ensaio experimental para seu respectivo deslocamento.

**Tabela 5 - Deslocamentos (mm)**

L (cm)	MODELO 1 (mm)	MODELO 2 (mm)	MODELO 3 (mm)	MODELO 4 (mm)	MODELO 5a (mm)	MODELO 5b (mm)	EXPERIMENTAL (mm)
95	6,8	6,3	6,5	6,2	8,9	8,3	11,0
190	12,2	11,4	11,5	11,0	15,7	14,9	19,6
285	14,3	13,5	13,7	12,9	18,1	17,2	22,2
380	12,2	11,4	11,5	11,0	15,7	14,9	18,4
475	6,8	6,3	6,5	6,2	8,9	8,3	10,3

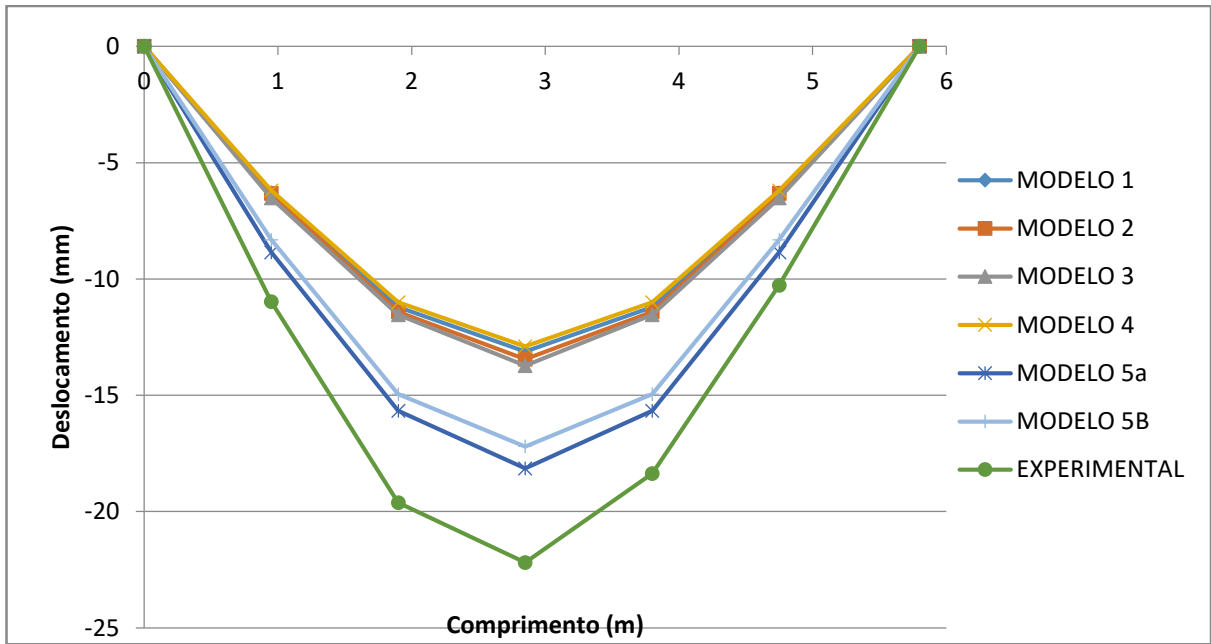


Figura 26 - Deslocamentos das análises numéricas e experimental

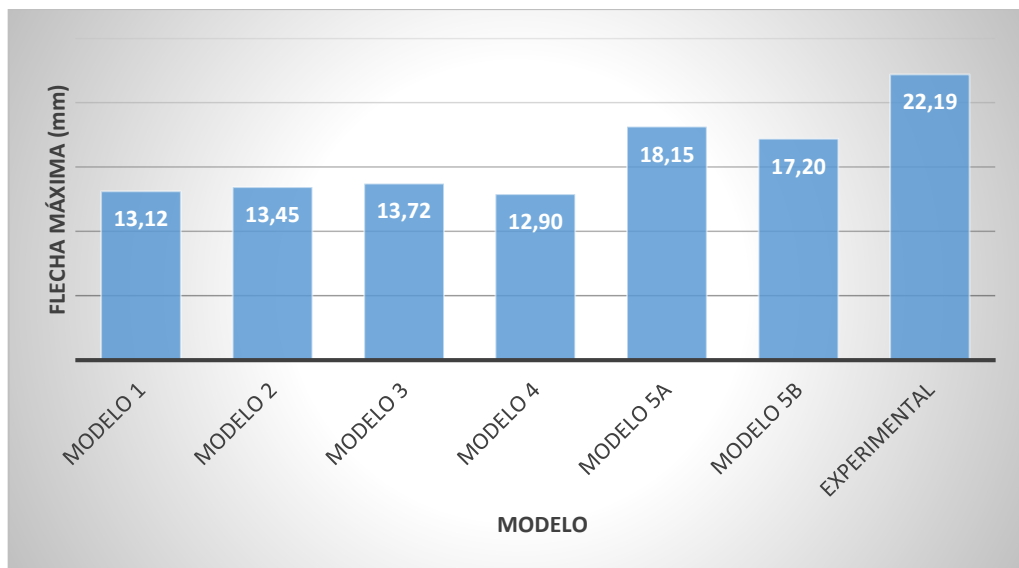


Figura 27 – Flecha máxima para cada modelo

Analisando as figuras 27 e 28 foi possível constatar que os modelos 1, 2, 3 e 4, os quais não constam as propriedades de rigidez das ligações, apresentam comportamento mais distante do modelo experimental, assim como constatado no trabalho de Cheung (2003). No entanto, os modelos 5a e 5b, contendo propriedades de ligações deformáveis, apresentam comportamento mais próximo do modelo experimental.

Os modelos 5a e 5b apresentam propriedades de ligação elástica, proporcionando deformações relativas ente as extremidades das peças de madeira em uma ligação, comportando-se como uma mola de rigidez axial menor do que a rigidez da madeira. Entretanto, os modelos se diferenciam em relação à rigidez rotacional, o modelo 5a contém rigidez rotacional nula e o modelo 5b rigidez rotacional infinita, ou seja, engastado.

A figura 28 faz uma representação gráfica do ensaio experimental, apresentando os deslocamentos verticais da treliça para os respectivos pontos de leitura a cada acréscimo de carga.

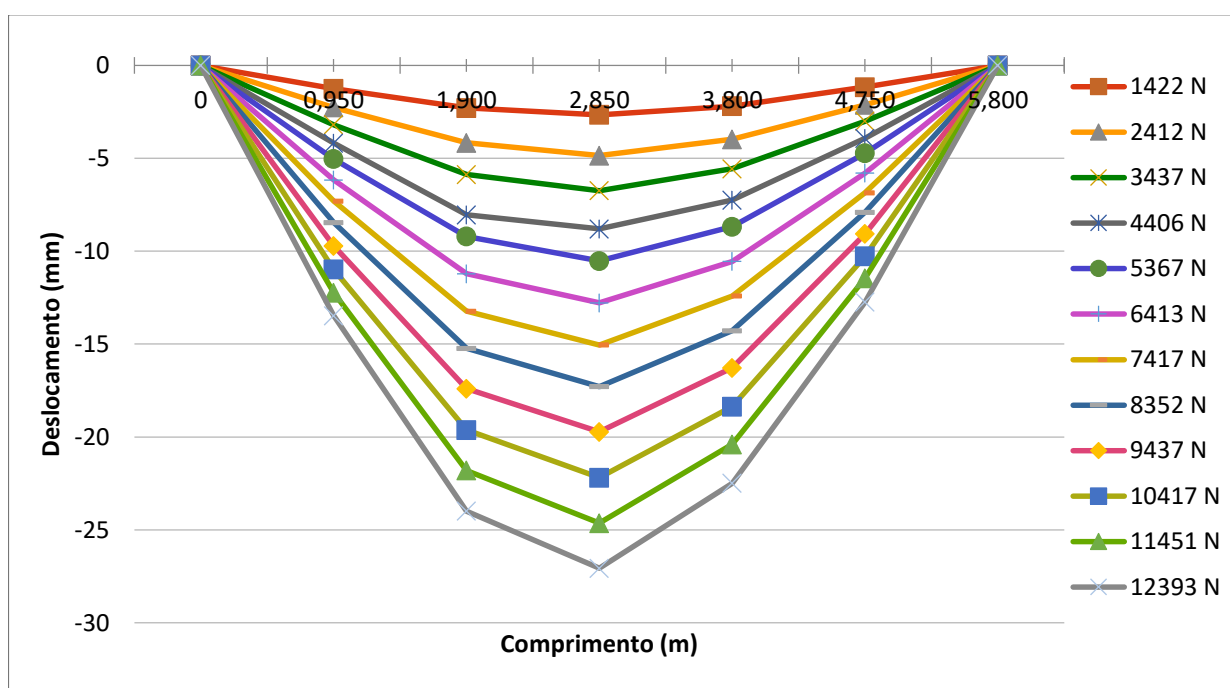


Figura 28 - Diagrama Força x Deslocamento do ensaio da treliça

O rompimento da estrutura treliçada se deu com força última de 15 kN e ocorreu por arrancamento da CDE entre as peças constituintes do banzo inferior (figuras 29 e 30). A figura a seguir mostra o deslocamento em função da carga aplicada:



**Figura 29 - Modelo de ruptura da ligação no banzo inferior da treliça**



**Figura 30 – Imagem superior do rompimento por arrancamento dos dentes do banzo inferior da treliça**

A Tabela 6 apresenta valores que comparam os deslocamentos no meio do vão de cada modelo de vinculação em relação ao modelo experimental a partir da equação 14.

$$\text{Diferença (\%)} = \frac{\delta_{\text{exp}} - \delta_{\text{num}}}{\delta_{\text{exp}}} \times 100 \quad (13)$$

Onde:

$\delta_{\text{exp}}$  – Deslocamento central do ensaio experimental;

$\delta_{\text{num}}$  – Deslocamento central do respectivo modelo numérico.

**Tabela 6 - Comparação entre modelos de vinculação**

COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS	
MODELO 1	35,7%
MODELO 2	39,4%
MODELO 3	38,2%
MODELO 4	41,9%
MODELO 5a	18,2%
MODELO 5b	22,5%

Conforme tabela 6, comparando o modelo 1, nós rotulados, sendo o modelo mais utilizado no cálculo de treliças, com a treliça real, foi verificado uma diferença de 35,7% entre os deslocamentos no meio do vão. Comparando o modelo 4, nós rígidos, com o resultado experimental, verificou-se uma diferença de 41,9% entre os deslocamentos no meio do vão, sendo o modelo que mais se distancia do comportamento real. O modelo 5a tem melhor aproximação ao comportamento real, com diferença de flechas de 18,2%.

A rigidez rotacional exerce pequena influência no comportamento estrutural de treliças ligadas por CDE, levando em conta que a diferença entre as comparações dos modelos 5a e 5b é de apenas 4,3%, além disso, os modelos correspondem aos deslocamentos máximos em um intervalo de variação de rigidez rotacional de zero à infinito, ou seja, os extremos de variação de rigidez rotacional possível. Como a CDE apresenta uma rigidez rotacional não infinita, pode-se afirmar que sua influência é menor que 4,3%.

A partir dos resultados acima observa-se que a rigidez das ligações exerce grande influência no comportamento estrutural de estruturas treliçadas ligadas por



CDE e a sua desconsideração pode levar à flechas excessivas na estrutura, superiores às obtidas em cálculo, de forma a não atender os critérios de Estados Limites de Serviços (ELS) estipulados pelas normas.

## 7 CONCLUSÕES

No presente trabalho, foi analisado a influência da rigidez das ligações entre barras ligadas por CDE em estrutura treliçada de madeira. O estudo foi realizado comparando os deslocamentos dos modelos numéricos com os deslocamentos do ensaio da treliça em escala real no laboratório de estruturas da UTFPR, a fim de determinar o modelo numérico que melhor representa o comportamento real.

Com base neste estudo, foi possível concluir que:

- Na análise dos deslocamentos de treliças ligadas por CDE, a rigidez de suas ligações exerce grande influência no comportamento da mesma. A consideração do modelo rotulado, convenientemente utilizado no meio técnico, apresentou diferenças significativas da ordem de 36%, para o caso estudado;
- O modelo engastado foi o que apresentou maior diferença para o caso estudado, com quase 42%;
- O modelo 5a, com ligações semi-rígidas, é o que melhor representa o comportamento real da estrutura de madeira treliçada ligada por CDE;
- A rigidez rotacional exerce pequena influência no comportamento estrutural de treliças ligadas por CDE.

## REFERÊNCIAS

AMANUEL, Senait et al. **Modeling the interface of metal-plate-connected tension-splice joint by finite element method**. Transactions of the ASAE-American Society of Agricultural Engineers, v. 43, n. 5, p. 1269-1280, 2000.

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

BARALDI, Lívio T. **Método de ensaio de ligações de estruturas de madeira por chapas com dentes estampados**. 1996. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia das Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1996.

BARTHOLOMEU, A. **Análise teórico-experimental de pórtico-treliça de madeira**. 1995. 107f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1995.

CALIL JR, C.; DIAS, A. A. (1997). Utilização da madeira em construções rurais. In: **Revista Brasileira em Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, PB, Brasil, v.1, p.71-77, set/dez 1997.

CARVALHO, Johnny S. de. **Contribuição para a definição de critérios para o dimensionamento da ligação entre peças estruturais de madeira por chapas metálicas com dentes estampados**. 2002. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia das Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

CHEUNG, Andrés B. **Tabuleiro ortótropo treliçado protendido transversalmente para aplicação em pontes de madeira**. 2003. 188f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

ELLEGAARD, Peter. Finite-element modeling of timber joints with punched metal plate fasteners. **Journal of structural engineering**, v. 132, n. 3, p. 409-417, 2006.

EMERSON, R. N.; COLLINS, T. A. Effect of toothed metal plate connector size on wood frame behavior. In: **Structures 2004: Building on the Past, Securing the Future**. 2004. p. 1-10.

EUROPEAN PRESTANDARD. **EUROCODE 5** – Design of timber structures-Part1-1: General rules and rules for buildings. Brussels], 2004.

FINGER, F. A., LOGDSON, N. B., FINGER, Z. **CEDRINHO: CARACTERÍSTICAS DENDROLÓGICAS E FÍSICAS**. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA – EBRAMEM, 8., 2002, São Carlos, São Paulo. **Anais...** São Carlos, IBRAMEM, CD-ROM.

GUPTA, R.; GEBREMEDHIN, K. G. Destructive testing of metal-plate-connected wood truss joints. **Journal of Structural Division**, New York, v.116, n.7, p.1971-1982, 1990.

GUPTA, R.; GEBREMEDHIN, K. G. Resistance distributions of a metal-plate-connected wood truss. **Forest products journal**, v. 42, n. 7/8, p. 11-16, 1992.

KARTAL, M. E. et al. Effects of semi-rigid connection on structural responses. **Electronic journal of structural Engineering**, v. 10, n. 10, p. 22-35, 2010.

MARTINS, Odilon. **Estudo das ligações por conectores de chapas com dentes estampados em peças estruturais de madeira**. 2007. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.

MORAES JR, M. S.; CALIL NETO, C.; VARANDA, L. D.; MOLINA, J.C.; CHRISTOFORO, A. L.; CALIL JR, C.. Ligações de estruturas de madeira por chapas com dentes estampados. **Revista Madeira: Arquitetura e Engenharia**, v. 13, p. 13-26, 2012.

NAGAOKA, Raí. K. **Comportamento mecânico de treliça de madeira com ligações por chapas de dentes estampados**. 2014. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2014.

PARTEL, Henrique. **Sistema informatizado para projeto de estruturas industrializadas de madeira para telhados**. 2000. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia das Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

SANTANA, L.C. **Análise não-linear de pórticos planos de madeira com ligações semi-rígidas**. 2002. 214f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) –Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

## APÊNDICE A – DIAGRAMAS DE ESFORÇOS NORMAIS

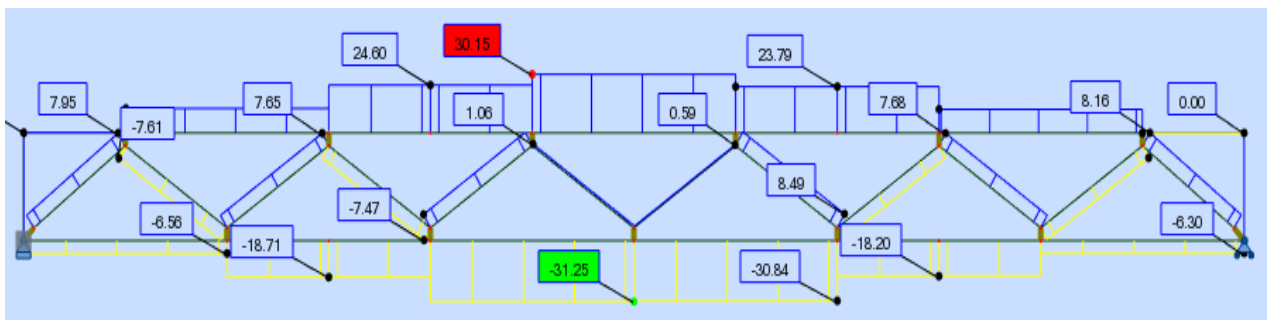


Figura 31 - Diagrama de esforços normais para o Modelo 1

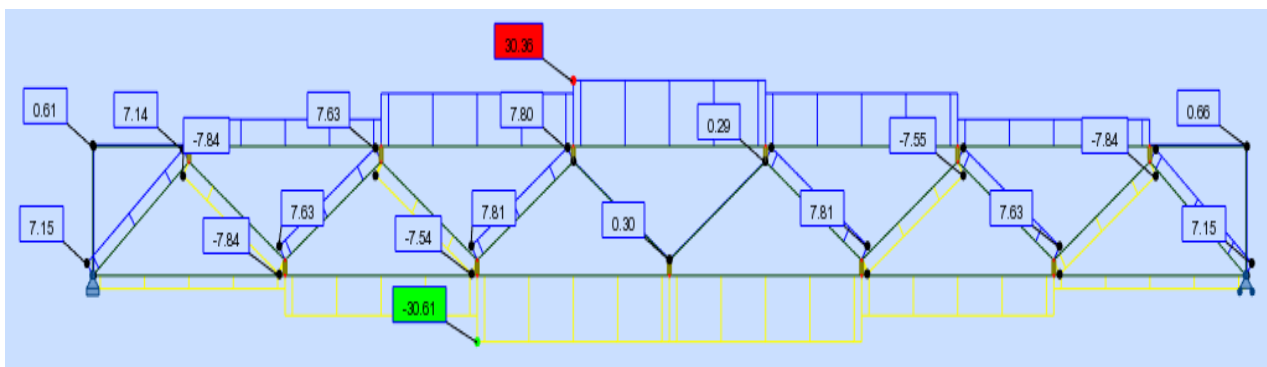


Figura 32 - Diagrama de esforços normais para o Modelo 2

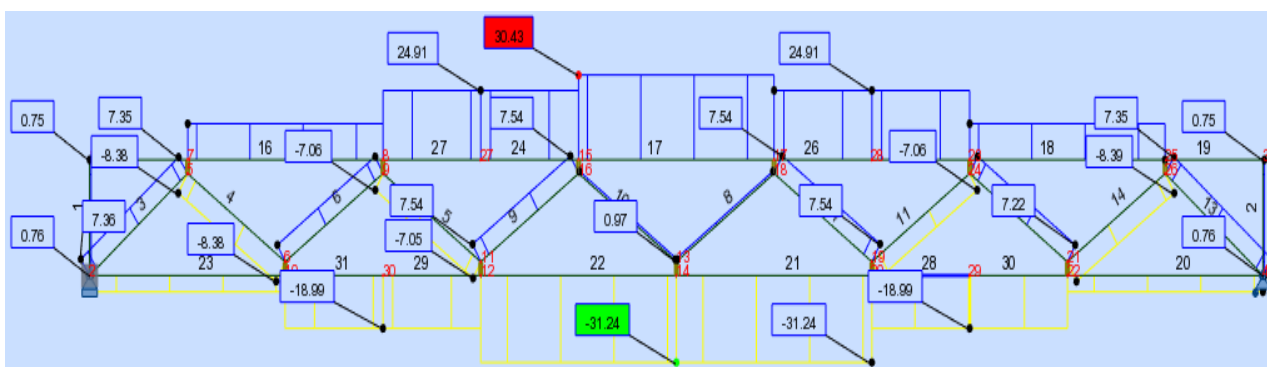


Figura 33 - Diagrama de esforços normais para o Modelo 3

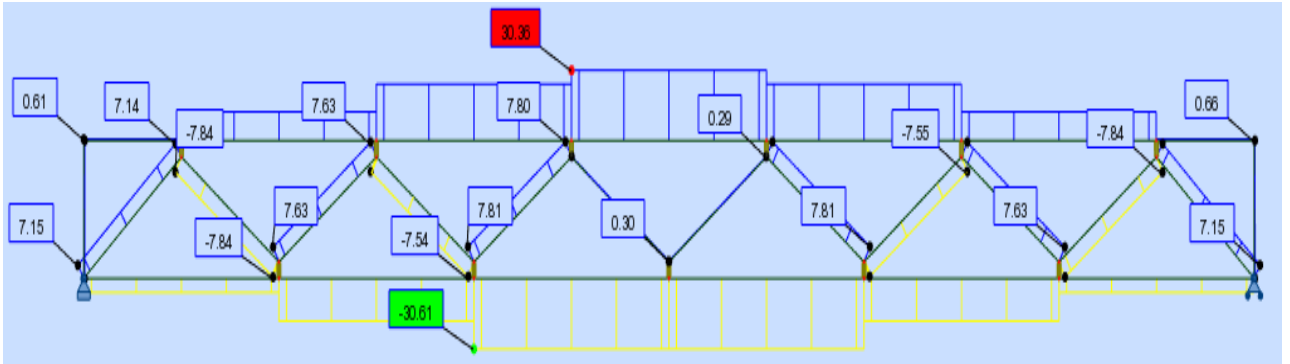


Figura 34 - Diagrama de esforços normais para o Modelo 4

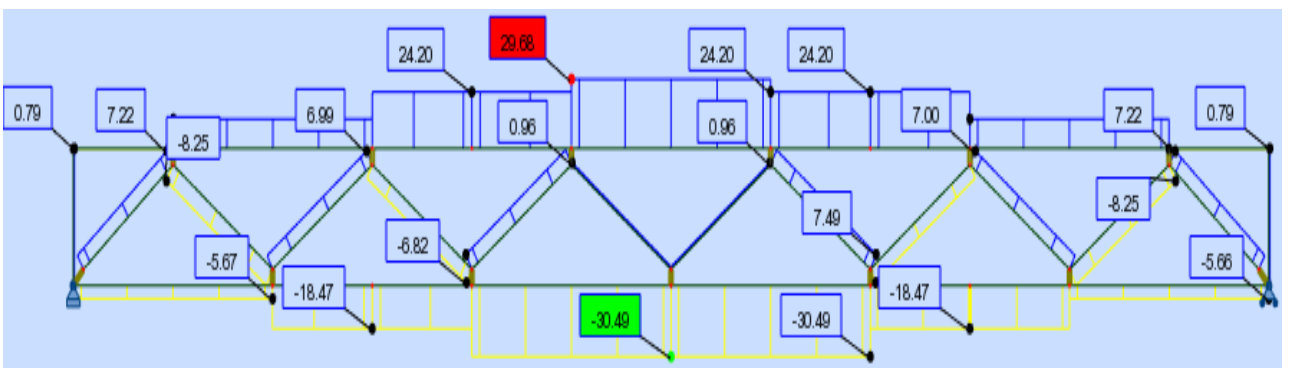


Figura 35 - Diagrama de esforços normais para o Modelo 5a

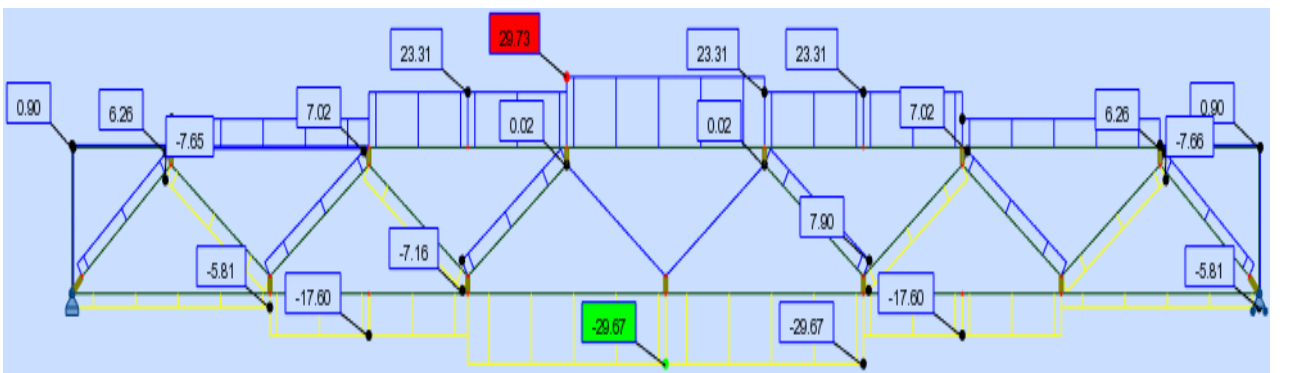


Figura 36 - Diagrama de esforços normais para o Modelo 5b

## APÊNDICE B – DIAGRAMAS DO ENSAIO DE RIGIDEZ DA LIGAÇÃO

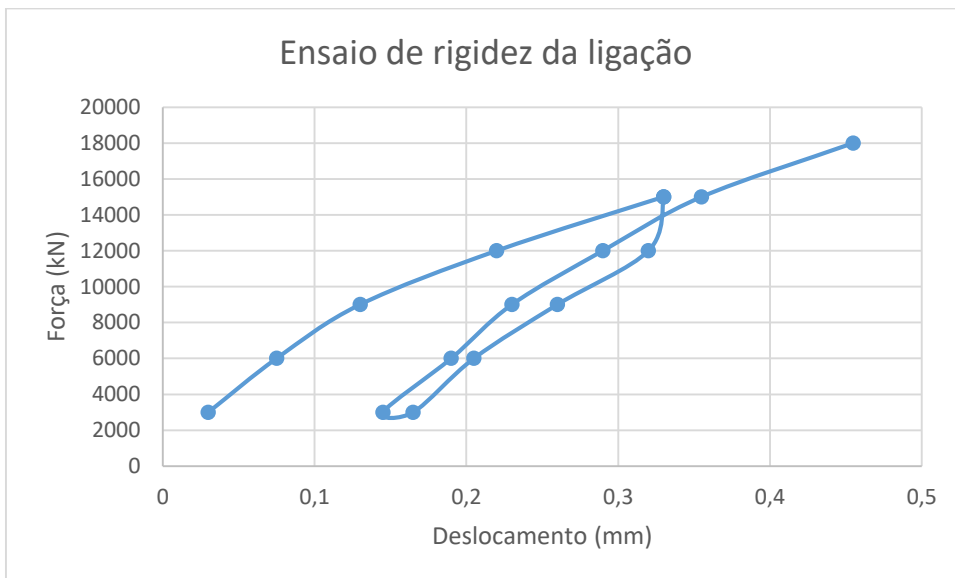


Figura 37 - Ensaio de rigidez da ligação - CP1

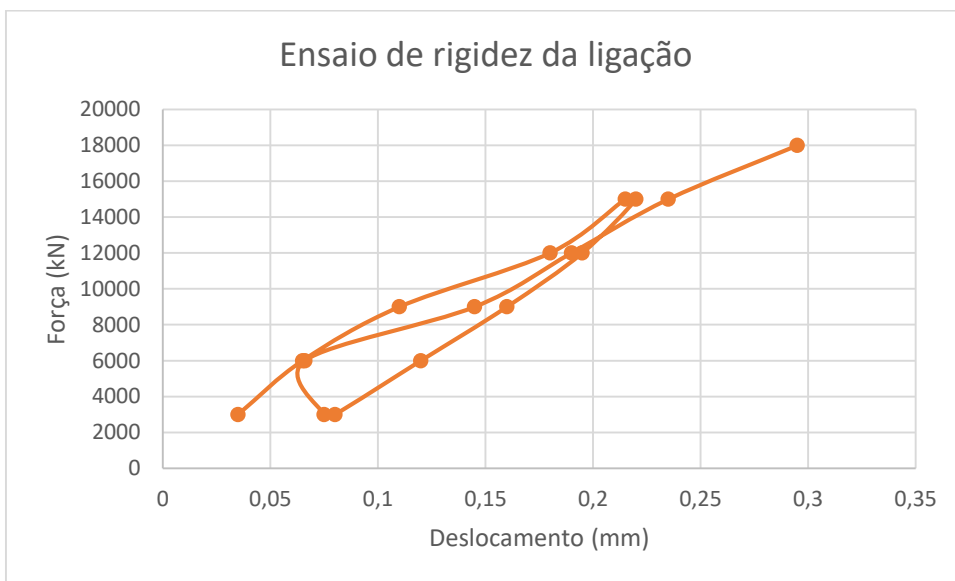
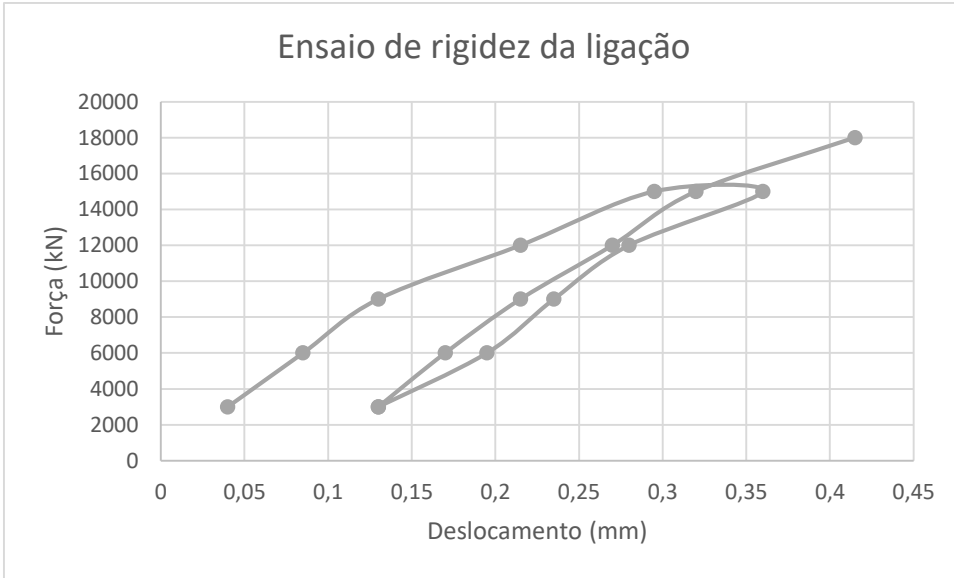


Figura 38 - Ensaio de rigidez da ligação - CP2



**Figura 39 - Ensaio de rigidez da ligação - CP 3**