

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

RAÍ KAZUO NAGAOKA

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE TRELIÇAS DE MADEIRA COM  
LIGAÇÕES POR CHAPAS DE DENTES ESTAMPADOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO

2014

RAÍ KAZUO NAGAOKA

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE TRELIÇAS DE MADEIRA COM  
LIGAÇÕES POR CHAPAS 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 - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes

CAMPO MOURÃO

2014



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 Nº 74

### COMPORTAMENTO MECÂNICO DE TRELIÇAS DE MADEIRA COM LIGAÇÕES POR CHAPAS DE DENTES ESTAMPADOS

por

**Raí Kazuo Nagaoka**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 17h00min do dia 06 de Agosto de 2014 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. Me. Angelo Giovanni Bonfim Corelhano**  
( UTFPR )

**Prof. Me. Jeferson Rafael Bueno**  
( UTFPR )

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Jorge Luis Nunes de Goes**  
( UTFPR )  
**Orientador**

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

Coordenador do Curso de Engenharia Civil:  
**Prof. Dr. Marcelo Guelbert**

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

***Dedicatória:***

*Aos meus pais Luiz e Maria,  
As minhas irmãs Raíne e Raíssa,*

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família, pela capacidade de acreditar em mim e me dar forças. À minha mãe por mostrar como podemos ser fortes apesar das dificuldades. Ao meu pai, pelo esforço em sempre me mostrar o caminho certo. Aos meus tios Alberto Kazushi Nagaoka e Maria Eiko Nagaoka, a quem sempre serei grato pelo enorme apoio.

Ao meu orientador Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes pela excelente orientação, paciência e disposição durante a elaboração deste trabalho.

Agradeço aos meus amigos Bruna, Livia, Alessandra, Fernanda, Letícia, Rodrigo e André que sempre me apoiaram e ajudaram a vencer as dificuldades encontradas durante a graduação.

Ao técnico do Laboratório de Estruturas, Maiko Cristian Sedoski, e ao Prof. MSc. Angelo Giovanni Bonfim Corelhan pelo apoio e disposição na realização deste trabalho.

A Gang-Nail do Brasil por fornecer gentilmente as chapas utilizadas neste trabalho.

A todos os professores do curso de Engenharia Civil da UTFPR que foram essenciais para minha formação acadêmica.

## RESUMO

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.

Visando o aumento da produtividade e a diminuição do desperdício de material surge as estruturas treliçadas de madeira com ligações por chapas com dentes estampados, ou CDE, que possibilitam a montagem de estruturas de madeira em escala industrial, trazendo versatilidade e qualidade a construção. Para treliças industrializadas com barras unidas com CDE, a consideração de estrutura treliçada isostática pode não ser o modelo ideal para representar o modelo físico real. Este trabalho buscou demonstrar a influência da rigidez de ligações por CDE no comportamento estrutural. Foi realizado ensaio para determinação da rigidez longitudinal e rotacional das ligações. Utilizou-se o software de simulação numérica em elementos finitos Robot Structural Analysis, foram feitas comparações com uso de modelos de treliças, variando as configurações de vinculações das barras. Os resultados indicaram que a ligação com CDE é uma excelente alternativa quando utilizada em estruturas de madeira. Os banzos sofrem maiores influencia em relação às diagonais, também foi observada uma grande influência do tipo de modelagem da estrutura e que a rigidez rotacional tem pouca influencia nos deslocamentos, podendo ser desprezada em alguns casos.

**Palavras-chave:** Chapas com Dentes Estampados. Estruturas industrializadas. Treliças de madeira. Ligações semi-rígidas. Modelagem numérica de estruturas.

## ABSTRACT

NAGAOKA, Raí. K. **Mechanical behavior of wood truss with connections by punched metal plate fasteners**. 2014. 46 pg. Final paper (Graduation) – Civil Engineering. Federal Technological University of Paraná. Campo Mourão, 2014.

Aiming the increasing of production and a decrease of material wasting, the truss structure with connections by punched metal plate fasteners appears, which enables the assembly of wood structures in industrial scale, that brings versatility and quality to the construction. For industrialized trusses with bars connected by punched metal plate fasteners the use of an isostatic truss structure cannot be the ideal model to represent the real physic model. This paper aimed to demonstrate the rigidity influence of connections by punched metal plate fasteners on the structural behavior. An essay was done to determinate the connections longitudinal and rotational rigidity. Using the software of numeric simulation in finite elements Robot Structural Analysis, it was done comparisons using models with different configurations of links in the trusses bars. The results indicated that the connections by metal connectors plates is an excellent option when it is used in wood structures of Brazilian reforestation, the bottoms chord suffer more influence related to the diagonals, it was observed the great influence about the kind of modeling and that the rotational stiffness has little influence on the movements and can be neglected in some cases.

**Keywords:** Punched metal plate fasteners. Industrial Structures. Wood Truss. Semi-Rigid Connections. Numerical modelling of structure.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Características da chapa com dentes estampados .....	14
Figura 2 - Sistema estrutural de cobertura tradicional .....	16
Figura 3 - Sistema de estrutural de treliças industrializadas .....	16
Figura 4 - Posição da chapa em relação às fibras da madeira .....	18
Figura 5 - Corpo de prova básico, ensaio de tração da chapa .....	19
Figura 6 - Corpo de prova para o ensaio de arrancamento normal .....	20
Figura 7 - Corpo de prova para o ensaio de cisalhamento da chapa .....	20
Figura 8 - Esquema da ligação tracionada com CDE .....	22
Figura 9 - Equilíbrio de momentos no ponto A de uma chapa .....	23
Figura 10 - Diagrama força x deformação específica da ligação por chapas com dentes estampados .....	25
Figura 11 - Representação gráfica do comportamento característico da ligação rotacional .....	26
Figura 12 - Treliça tipo Howe .....	27
Figura 13 - Treliça tipo Pratt .....	28
Figura 14 - Treliça tipo Belga .....	28
Figura 15 - Treliça tipo Fink .....	28
Figura 16 - Treliça de banzos paralelos com diferentes posições das diagonais .....	29
Figura 17 - Diferentes formas de modelagem de treliças .....	30
Figura 18 - Deslocamentos teóricos e experimentais da treliça .....	31
Figura 19 - Elemento barra .....	32
Figura 20 - Modelos de treliça .....	34
Figura 21 – Detalhamento das ligações .....	35
Figura 22 - Carregamentos treliça isostática .....	37
Figura 23 - Diagrama de forças normais treliça Tipo 1 .....	38
Figura 24 - Treliça com chapas .....	38
Figura 25 – Arrancamento da chapa ensaio de tração da ligação .....	39
Figura 26 - Comportamento da ligação no ensaio de tração .....	39
Figura 27 - Esforços normais das treliças .....	41
Figura 28 - Treliça com barras numeradas .....	41
Figura 29 - Deslocamentos da análise numérica .....	43
Figura 30 - Momentos Fletores treliça Tipo 5 .....	44



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
1.1 JUSTIFICATIVAS .....	11
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>12</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	12
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>13</b>
3.1 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE LIGAÇÕES EM CDE .....	15
3.2 REVISÃO DOS DOCUMENTOS NORMATIVOS .....	17
3.2.1 Ensaio de tração da chapa .....	18
3.2.2 Ensaio de arrancamento da chapa .....	19
3.2.3 Ensaio de cisalhamento da chapa .....	20
3.3 DIMENSIONAMENTO DAS LIGAÇÕES .....	21
3.4 LIGAÇÕES SEMI-RIGIDAS.....	24
3.5 TRELIÇA DE MADEIRA.....	27
3.5.1 Modelos de treliças .....	27
3.5.2 Diferentes modelos de análise de treliças .....	29
3.6 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	31
3.7 MODELAGEM NUMÉRICA COMPUTACIONAL .....	33
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	<b>36</b>
4.1 DIMENSIONAMENTO DAS LIGAÇÕES .....	36
4.2 ENSAIO DE TRAÇÃO DAS CHAPAS .....	37
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>37</b>
5.1 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS.....	40
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>45</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>46</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a madeira tem levado a imagem de material de pouca durabilidade e custo elevado, utilizada preferencialmente em acabamentos e em menor escala para fins estruturais é empregada de forma geral com técnicas artesanais. Seu uso em países do hemisfério norte, como material estrutural, é mais frequente, devido o maior nível de conhecimento técnico e de inovações tecnológicas na área. Nesses países, os processos construtivos são industrializados, o que faz com que haja redução do tempo de construção *in loco*, aumento de produtividade, redução de desperdício de materiais e maior garantia de qualidade.

Devido às dimensões das peças de madeira, e da geometria das estruturas, há a necessidade de emendas ou ligações entres os elementos que compõem a estrutura, onde em construções convencionais são utilizados pregos, cavilhas, parafusos ou entalhes, no entanto, para a industrialização é necessário um elemento que possibilite rápida montagem e padronização das ligações. Surgem então, para esse fim, à ligação por Chapa de Dente Estampado (CDE).

Para sua utilização, é importante conhecer suas características mecânicas e seu comportamento na estrutura para garantir um dimensionamento mais preciso. O dimensionamento dos elementos de uma estrutura faz-se a partir do conhecimento dos esforços internos, que são obtidos em uma análise da estrutura, por meio de um modelo matemático que simula o comportamento do sistema físico estrutural. Pelo fato desse sistema ser sempre muito complexo, adotam-se hipóteses simplificadoras que permitam a análise em função de sua importância e dos recursos disponíveis.

Atualmente, com a utilização de computadores cada vez mais avançados e o desenvolvimento de softwares baseados no Método dos Elementos Finitos (MEF), pode-se analisar modelos estruturais cada vez mais complexos. A precisão do modelo matemático em relação ao modelo físico é diretamente afetada pela discretização dos elementos, condições de contornos adotados, dentre outros.

Por exemplo, uma mesma estrutura terá comportamentos distintos se os vínculos entre os elementos (barras) forem idealizados rígidos ou articulados. Da mesma forma, a alteração das suas vinculações externas, resultará em um comportamento mecânico diferente.

## 1.1 JUSTIFICATIVAS

O mercado atual da construção civil exige métodos de construção que otimizem o tempo da mão de obra e reduzam o desperdício de materiais. Porém, para a construção das estruturas convencionais de madeira são utilizados métodos artesanais que fazem com que o uso da mão de obra seja oneroso e sem eficiência. As dimensões comerciais das peças de madeiras geralmente não são compatíveis com o projeto, havendo a necessidade de corte no canteiro de obra para sua adequação, o que gera um grande desperdício do material adquirido.

Para resolver essa questão, os processos de produção industrializados de estruturas de madeira se mostram eficientes, visto que empregam novas tecnologias e maior conhecimento técnico. Diante desse pensamento surgem as estruturas treliçadas de madeira com ligações por chapas de dentes estampados, que além de permitirem a produção em escala industrial, proporcionam a utilização de madeira proveniente de reflorestamento, que vem de encontro com os anseios do mercado.

No Brasil existem diversas pesquisas sobre o assunto, apesar da tecnologia ainda ser pouco empregada no mercado de construção civil. Historicamente os engenheiros calculistas simulam as estruturas treliçadas de madeira com articulações entre as barras (isostática), que pode representar as ligações em madeira tradicionais. No caso de treliças industrializadas com barras unidas com CDE a consideração como estrutura isostática treliçada pode não ser o modelo matemático ideal para representar o modelo físico real.

A consideração das ligações com determinada rigidez pode implicar em diferenças significativas no comportamento estrutural.

Assim, o trabalho tem como objetivo avaliar a influência da rigidez de ligações por chapas de dentes estampados no comportamento estrutural de treliças de madeira industrializadas, gerando subsídios para os futuros trabalhos na área, bem como contribuir na disseminação do sistema estrutural.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a influência da rigidez das ligações por chapas de dentes estampados em estruturas treliçadas de madeira, considerando modelos com diferentes vinculações entre as barras.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar a rigidez de ligações por CDE por meio de ensaio de arrancamento;
- Realizar simulações numéricas utilizando software baseado em elementos finitos, com diferentes determinações geométricas;
- Comparar os resultados das simulações numéricas utilizando diferentes configurações de vinculações entre barras.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Mesmo a madeira sendo umas das opções na escolha do material estrutural, juntamente com o aço e o concreto, é visto de forma equivocada como de qualidade inferior. Esse pensamento se deve ao uso inadequado desse material em épocas de fácil acesso que geraram projetos de baixa qualidade, estética e durabilidade (BARALDI, 1996).

Este problema também é encontrado em estruturas de coberturas de pequenos e médios vãos, principalmente de uso residencial, que por não serem tradicionalmente dimensionadas, nem executadas por profissionais especializados, resultam em estruturas sem garantia de resistência e com grande desperdício de material. O uso do material madeira de forma desordenada e sem apoio técnico adequado favoreceu a extração predatória, reduzindo a área de floresta nativa.

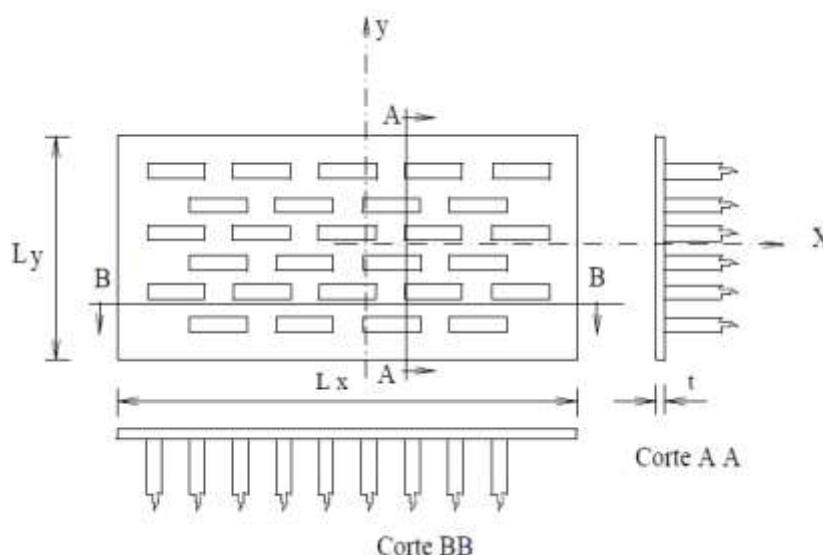
Atualmente, o distanciamento dos pontos de extração de madeira em relação aos grandes centros e o aumento do custo da mão de obra, fizeram com que seja repensada a forma com que é utilizado este material. A principal solução para este problema é a industrialização dos processos de extração e fabricação de estruturas baseadas nesse material (PARTEL, 2000).

Souza<sup>1</sup> (1995 apud MARTINS, 2007, p.23) estima que no Brasil 75% das coberturas de construções são compostas por treliças de madeiras, porém apenas 2% foram construídas racionalmente por processos industriais, resultando em estruturas sem respaldo técnico e econômico, no que diz respeito à escolha do material e sua execução, desfavorecendo a otimização da produção das estruturas.

Na Europa, as indústrias de estruturas de madeira surgiram para suprir a necessidade de reconstrução rápida e econômica das cidades no pós-guerra. Deste processo de reconstrução surgiram as chapas com dentes estampados (CDE), que proporcionaram a montagem com qualidade em escala industrial (BARALDI, 1996).

Os conectores CDE são fabricados pela estampagem industrial de chapas de aço, onde os dentes ficam em posição perpendicular ao plano da chapa. A Figura 1 ilustra um conector CDE com as suas principais características geométricas.

<sup>1</sup> SOUZA, M. Divisores de água. *Téchne*, Madson, n. 16, p.16-19, 1995.



**Figura 1 - Características da chapa com dentes estampados**  
 Fonte: NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 1997).

Os conectores CDE são extensamente utilizados em obras de construção civil, principalmente para estruturas de coberturas residenciais no sistema *wood-frame*. Esse sistema representa mais de 90% das residências dos Estados Unidos e Canadá, além de ser amplamente utilizado nos países do Norte da Europa, Japão, Austrália, Nova Zelândia, entre outros (STAMATO, 2012).

No Brasil, seu uso ainda é restrito, principalmente devido ao desconhecimento das capacidades do sistema. Apesar de pouco utilizado no país o sistema demonstra potencialidades em diversos usos. Pesquisadores brasileiros vem estudando o sistema de ligação e algumas destas pesquisas são descritas em forma cronológica, a seguir.

Baraldi (1996) realizou pesquisa sobre o tema e como conclusão de seu trabalho foi proposto um método de ensaio para determinação da resistência das ligações por chapas com dentes estampados, sendo incorporado à NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997). Em sua pesquisa realizou ensaios em 5 diferentes espécies de madeiras, verificando os modos básicos de ruptura das ligações: tração da chapa, cisalhamento da chapa e arrancamento dos dentes da chapa da peça de madeira, variando a direção da chapa em relação à força aplicada.

O trabalho realizado por Partel (2000) teve como objetivo expor os aspectos importantes do processo de dimensionamento de estruturas treliçadas industrializadas de madeira para coberturas e, desenvolver um software para o seu dimensionamento.

O estudo realizado por Carvalho (2002) buscou estabelecer critérios para o dimensionamento de ligações por conectores metálicos com dentes estampados, tendo em vista fornecer os subsídios tecnológicos necessários aos profissionais ligados ao projeto e à construção de estruturas de madeira.

Cheung (2003) estudou o comportamento teórico e experimental de treliças com CDE para formar um tabuleiro ortótropo de madeira, utilizado como superestrutura de pontes. Sua pesquisa aponta que a consideração da rigidez das ligações resulta em alterações significativas de comportamento estrutural das treliças.

Martins (2007) determinou a resistência e a rigidez das ligações de chapas com dentes estampados para as classes de madeiras C20, C30 e C40 através dos modos básicos de falha de arrancamento dos dentes da chapa, cisalhamento e tração.

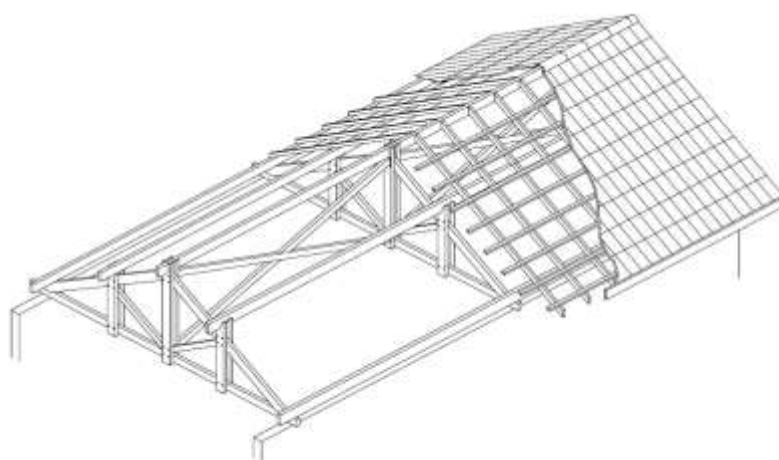
### 3.1 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE LIGAÇÕES EM CDE

A difusão dos sistemas de treliças pré-fabricadas e industrializadas está diretamente ligada ao emprego de chapas com dentes estampados como sistema de ligação entre as peças da estrutura.

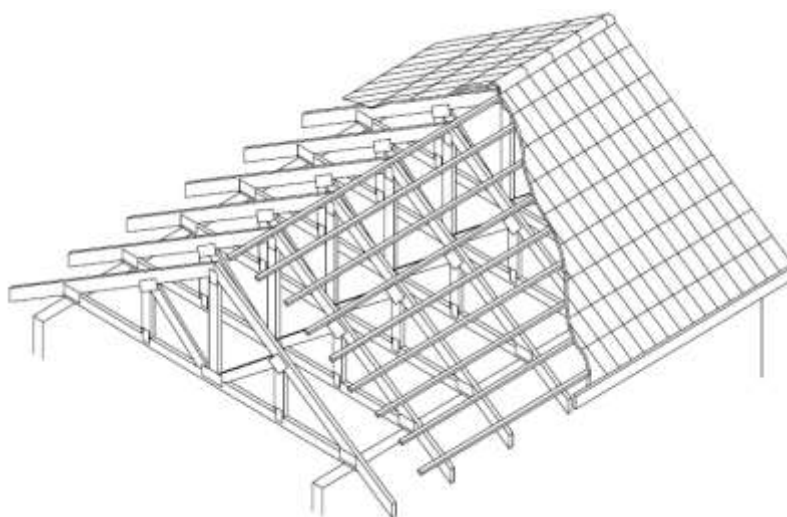
Esse sistema é composto pela fixação de chapas de aço dentadas nas regiões de encontro de barras de madeira, de forma a transmitir esforços de tração, compressão, cisalhamento e flexão. Devido a essa característica de transmissão de esforços combinados, o sistema possibilita redução da seção transversal das barras de madeira, resultando em estruturas mais leves (BOLANDIM, 2008).

Essas chapas, ainda eliminam a necessidade de utilização de pregos, parafusos e entalhes, aumentando a área útil da seção transversal das peças, contribuindo para o uso mais racional do ponto de vista mecânico (CARVALHO, 2002).

O sistema estrutural em treliças industrializadas com CDE permite o espaçamento de treliças de 0,8 a 1,0 metros para telhas cerâmicas e de 1,5 a 2,0 metros para telhas de fibrocimento e metálicas. O aumento do número de treliças devido o menor espaçamento entre elas é compensado na substituição de todo o madeiramento complementar por sarrafos que cumprem a função das ripas, nos casos de telhas cerâmicas, ou terças, para telhas de fibrocimento ou metálicas (PARTEL, 2000). A Figura 2 ilustra o sistema tradicional de treliças e a Figura 3 o sistema industrializado que utiliza chapas de dentes estampados nas ligações.



**Figura 2 - Sistema estrutural de cobertura tradicional**  
Fonte: Partel (2002).



**Figura 3 - Sistema de estrutural de treliças industrializadas**  
Fonte: Partel (2002).



Segundo Molina (2010), com a utilização de treliças industrializadas com CDE é possível reduzir em 40% o peso da cobertura, uma vez que os elementos de barra possuem pequenas dimensões, usualmente seção transversal de 3 cm x 7cm. Além da economia do material da própria treliça, simultaneamente haverá redução das seções das estruturas suportes, como pilares e fundações.

As propriedades e características mecânicas das chapas de dentes estampados são expostas no item 5.1.

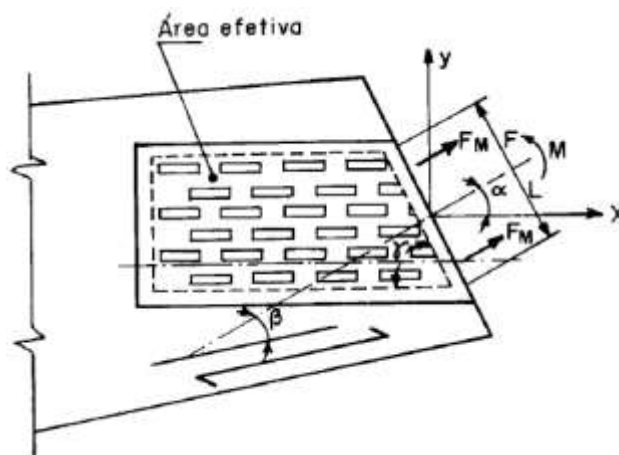
### 3.2 REVISÃO DOS DOCUMENTOS NORMATIVOS

Neste item é apresentada uma breve revisão comparando os ensaios relacionados às ligações por CDE, da NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 1997) e do documento normativo europeu, onde são denominadas *punched metal plate fasteners*, EUROCODE 5 (COMITÊ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO, 2004).

Tanto a norma da comunidade européia como a norma brasileira apresentam métodos de ensaios baseados em três modos básicos de ruptura:

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

Para cada um desses modos de ruptura são apresentados, pelas normas, variações da posição das chapas, ângulo do eixo horizontal das chapas em relação às fibras da madeira ( $\alpha$ ) e ângulo da força em relação às fibras ( $\beta$ ), conforme Figura 4. Apresentando ainda as dimensões a serem adotadas na confecção dos corpos de prova de madeira para os ensaios.



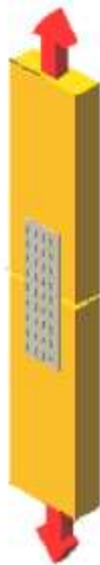
**Figura 4 - Posição da chapa em relação às fibras da madeira**  
**Fonte: NBR 7190 (1997)**

A NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 1997) define a resistência das ligações por chapas com dentes estampados como sendo a resistência do início do arrancamento da chapa metálica, ou o escoamento da chapa metálica, ou por qualquer fenômeno de ruptura da madeira, não se tomando valor de carga maior do que a necessária para a deformação específica residual da ligação de 0,2%, medida em uma base de referência padronizada, igual ao comprimento da chapa metálica na direção da força aplicada.

### 3.2.1 Ensaio de tração da chapa

Para o ensaio de tração da chapa, tanto a norma brasileira quanto a norma europeia estabelecem um mesmo modelo de corpo de prova, com duas barras de madeira unidas por um par de chapas, Figura 5.

As dimensões mínimas da seção transversal das peças de madeiras devem ser de 9,7 cm de altura e 3,3 cm de largura, sendo comprimento mínimo de 20 cm. A chapa deve ser dimensionada para que o rompimento do corpo de prova ocorra na chapa e não pelo rompimento da peça de madeira ou pelo arrancamento da chapa (ASSOCIAÇÃO..., 1997).



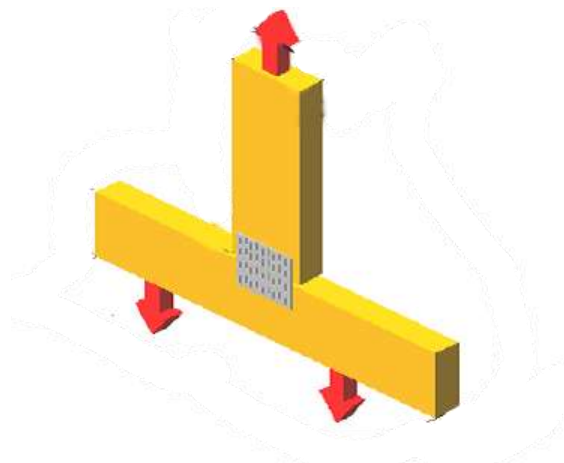
**Figura 5 - Corpo de prova básico, ensaio de tração da chapa**  
**Fonte: Martins (2007).**

A norma brasileira NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 1997) estabelece duas variações na posição da chapa, com  $\alpha = 0^\circ$  e  $\alpha = 90^\circ$ , já a europeia ainda inclui variações no ângulo da chapa no intervalo de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  de acordo com os interesses da pesquisa.

### 3.2.2 Ensaio de arrancamento da chapa

Os ensaios de arrancamento da chapa metálica possuem dois modelos, um para tração paralela às fibras ( $\beta = 0^\circ$ ) e outro para tração normal ( $\beta = 90^\circ$ ). O corpo de prova do ensaio de tração paralela é o mesmo utilizado no ensaio de tração da chapa. Já para o ensaio de arrancamento normal às fibras é utilizado um corpo de prova no formato de um "T" no qual as peças de madeira são interligadas pelas chapas, conforme a Figura 6.

As dimensões mínimas para a peça de madeira do elemento transversal são de 9,7 cm para a altura e 3,3 cm para a largura, como no ensaio de tração da chapa. A chapa deve ser dimensionada para que o rompimento do corpo de prova ocorra pelo arrancamento da chapa e não pelo rompimento da peça de madeira ou chapa (ASSOCIAÇÃO..., 1997).

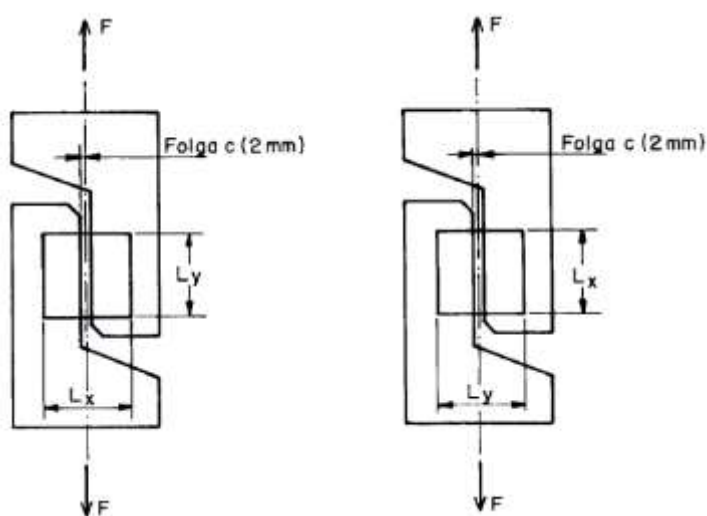


**Figura 6 - Corpo de prova para o ensaio de arrancamento normal**  
**Fonte: Martins (2007).**

São especificadas duas variações da posição da chapa com ângulos de  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , sendo que a norma europeia ainda inclui valores dentro desse intervalo.

### 3.2.3 Ensaio de cisalhamento da chapa

Para o ensaio de cisalhamento da chapa há variações nos modelos de corpos de prova, conforme mostra a Figura 7. A NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 1997) não especifica as dimensões mínimas para esse ensaio.



**Figura 7 - Corpo de prova para o ensaio de cisalhamento da chapa**  
**Fonte: Adaptado de Baraldi (1996).**

O arranjo para o ensaio de ensaio de cisalhamento segundo a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 1997) estabelece ângulos de  $0^\circ$  e  $90^\circ$  para a posição da chapa metálica, já a norma europeia não estabelece ângulos pré-definidos para a chapa, deixando a cargo dos objetivos da pesquisa.

### 3.3 DIMENSIONAMENTO DAS LIGAÇÕES

O documento normativo europeu, EUROCODE 5 (COMITÉ..., 2004) apresenta critérios de dimensionamento para as ligações em CDE, onde os aspectos a serem analisados são:

- Capacidade resistente dos conectores;
- Resistência de ancoragem;
- Resistência da ligação ao arrancamento;
- Resistência do conector aos esforços solicitantes, tração, compressão e momento fletor.

A norma brasileira não apresenta o modelo de dimensionamento de ligações por CDE, estabelecendo apenas critérios para os ensaios, conferindo aos fabricantes das chapas o fornecimento e a responsabilidade dos valores de resistências para os modos rupturas básicos da ligação.

Carvalho (2002) apresenta um método para determinar a resistência última ao arrancamento das chapas, sendo comprovado ao ensaiar espécies que abrangem todas as classes de resistência estabelecidas pela NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 1997). Tal equacionamento é encontrado quando as chapa e forças aplicadas estão paralelas à direção das fibras, conforme Figura 8.

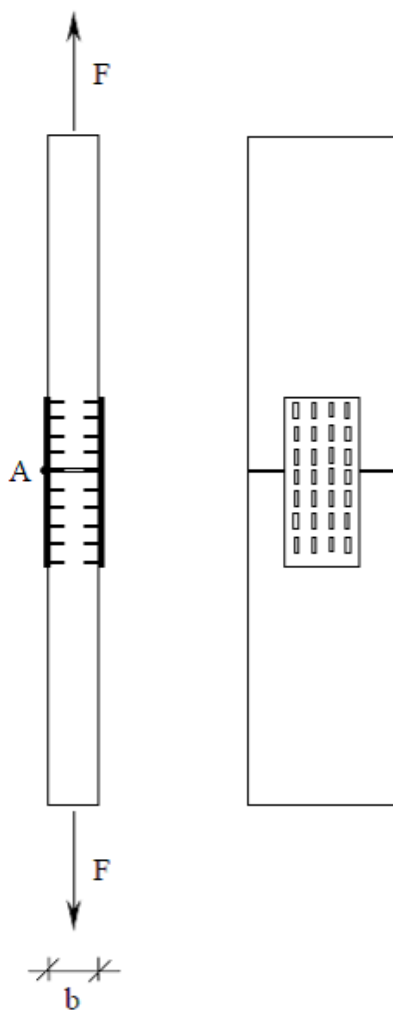
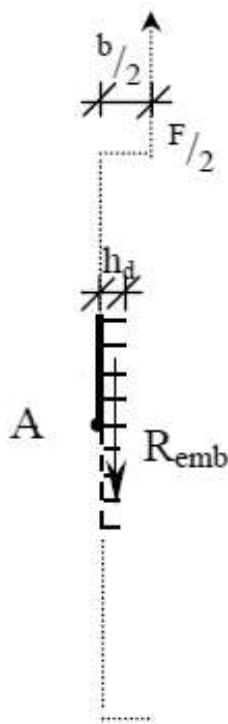


Figura 8 - Esquema da ligação tracionada com CDE  
Fonte: Carvalho (2002).

Ao isolar apenas uma chapa é proposto o seguinte diagrama de corpo livre para o equilíbrio das forças, Figura 9.



**Figura 9 - Equilíbrio de momentos no ponto A de uma chapa**  
**Fonte: Carvalho (2002).**

Encontrando a reação de embutimento dos dentes na madeira e realizando o equilíbrio das forças, tem-se Equação 1 e Equação 2 respectivamente.

$$R_{emb} = \frac{n}{2} \cdot h_d \cdot e_d \cdot \sigma_{emb} \quad (1)$$

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

Substituindo a Equação 2 na Equação 1 e isolando-se a força de tração, chega-se a Equação 3.

$$F = \frac{n \cdot e_d \cdot h_d^2 \cdot \sigma_{emb}}{b} \quad (3)$$

A ligação rompe-se quando a tensão de embutimento chega ao seu valor máximo ( $f_{emb}$ ), pois neste instante é desencadeado o arrancamento da chapa, sem o aumento da força aplicada. Então tem-se:

$$F = \frac{n \cdot e_d \cdot h_d^2 \cdot f_{emb,0}}{b} \quad (4)$$

Em que,  $F$  = Força última de arranchamento (N);  
 $N$  = Número de dentes da chapa;  
 $e_d$  = Espessura do dente da chapa que atua na direção da força aplicada (cm);  
 $h_d$  = Altura dos dentes da chapa (cm);  
 $f_{emb}$  = Tensão de embutimento, segundo a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 1997) (N/cm<sup>2</sup>);  
 $b$  = Largura das peças interligadas (cm);  
 $\sigma_{emb}$  = Tensão atuante de embutimento (cm).

### 3.4 LIGAÇÕES SEMI-RIGIDAS

A teoria clássica classifica as ligações em rígidas ou semi-rígidas, sendo que no caso das rígidas considera-se que não há deslocamento entre as peças unidas e no caso das semi-rígidas, ou flexíveis, considera-se que existem deslocamentos axiais e/ou angulares entre as peças unidas. A relação entre força e deslocamento é chamada de coeficiente de deslocamento da ligação, ou rigidez da ligação, e é expresso no Sistema Internacional por N/m, no caso de deslocamentos axiais e N.m/rad no caso de deslocamentos angulares (SANTANA, 2002).

No caso de treliças de madeira geralmente são utilizadas simulações considerando os nós perfeitamente articulados, no qual as ligações são consideradas perfeitamente rígidas para a transmissão de forças normais e perfeitamente articuladas, permitindo giro relativo entre as barras, portanto, não ocorrendo transferência de momento fletor.

A NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 1997) estabelece que a rigidez axial seja definida pela inclinação, ou tangente, da reta afastada de 0,2‰ e paralela à secante, obtida no gráfico Força x Deformação Específica, construído através do ensaio à tração da ligação, Figura 10.



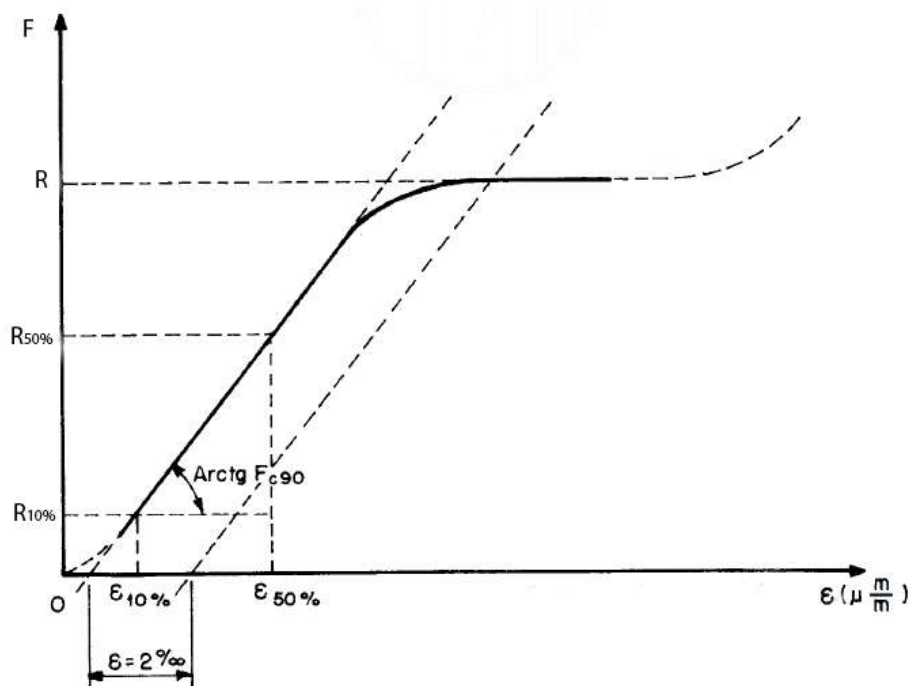


Figura 10 - Diagrama força x deformação específica da ligação por chapas com dentes estampados

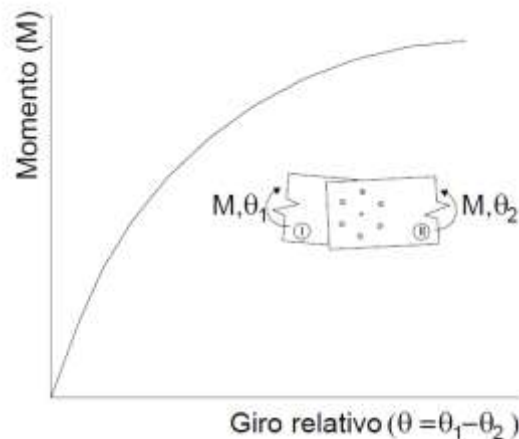
Fonte: Adaptado de NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 1997).

Santana (2002) estudou a rigidez rotacional de ligações pregadas em madeira e define como sendo:

$$K_r = \frac{M}{\theta} \quad (5)$$

Em que,  $M$  = momento transferido pela ligação (kN.m);  
 $\theta$  = rotação relativa entre as peças conectadas (rad);  
 $K_r$  = rigidez à rotação da ligação (kN.m/rad) .

A Figura 11 ilustra o comportamento da rigidez rotacional de ligações pregadas em madeira.



**Figura 11 - Representação gráfica do comportamento característico da ligação rotacional**  
**Fonte: Santana (2002).**

Uma rótula ideal, por não transferir momento fletor, apresenta rigidez rotacional  $K_r = 0$ , uma ligação perfeitamente engastada possui  $K_r = \infty$ . Sendo as duas situações idealizadas, é difícil a ocorrência de um arranjo que apresente essas propriedades extremas (VALLE, 1999).

O EUROCODE 5 (COMITÊ... 2004) sugere uma formulação para obter a rigidez à rotação através da rigidez obtida no ensaio de tração da ligação, admitindo relação entre a rigidez de cada dente da chapa a partir do centro de rotação, Equação 6:

$$K_r = \sum_{j=1}^n K_{\text{dente}} \cdot r_j^2 \quad (6)$$

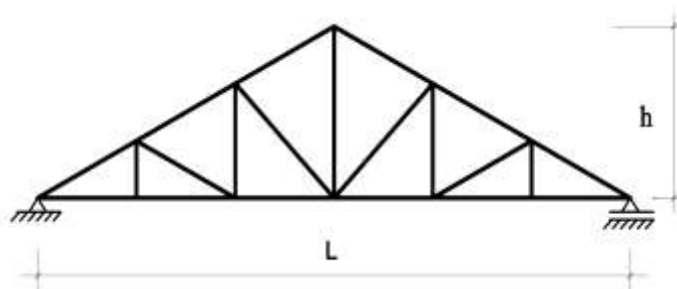
Em que,  $K_r$  = rigidez à rotação (kN.m/rad);  
 $n$  = numero de dentes efetivos de uma chapa;  
 $r_j$  =distância do eixo de rotação da chapa a cada dente (mm);  
 $K_{\text{dente}}$  = rigidez por dente (kN/mm).

## 3.5 TRELIÇA DE MADEIRA

### 3.5.1 Modelos de treliças

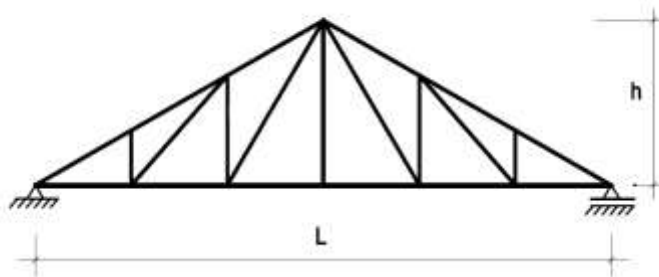
Uma treliça de madeira é descrita como sendo um sistema estrutural de barras ligadas umas às outras pelas extremidades, através de um sistema de ligação, de modo a formar figuras geométricas triangulares com as barras, comportando-se como um corpo rígido (MOLITERNO, 2010). Existem diversas geometrias de treliças sendo as mais utilizadas descritas a seguir.

A treliça tipo Howe ou tesoura com diagonais normais é o tipo de treliça mais frequentemente utilizado para pequenos e médios vãos em madeira, até 18 m. Para carregamento combinado de cima para baixo, possuem diagonais comprimidas e montantes tracionados, Figura 12. Segundo Gesualdo (2003), sua relação de  $h/L$  varia de  $1/7$  a  $1/4$ .



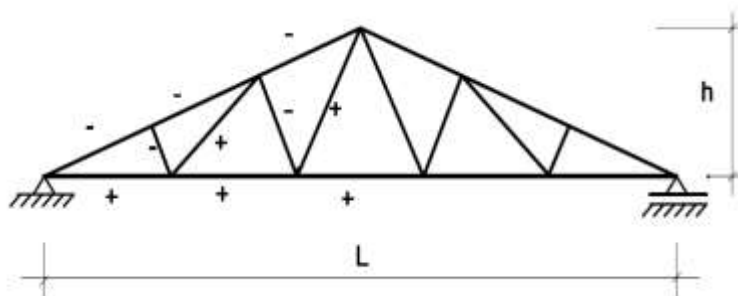
**Figura 12 - Treliça tipo Howe**  
**Fonte: Gesualdo (2003)**

A treliça tipo Pratt é recomendada para vãos maiores, entre 18m e 30m. Com carregamento combinado de cima para baixo apresenta compressão nos montantes e tração nas diagonais, Figura 13. Segundo Gesualdo (2003), as treliças tipo Pratt apresentam relações de  $h/L$  variando de  $1/7$  a  $1/4$ .



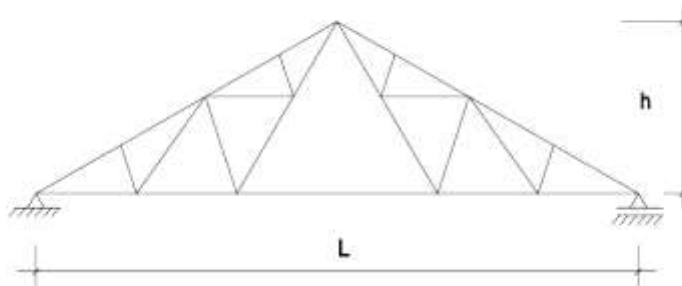
**Figura 13 - Treliça tipo Pratt**  
**Fonte: Gesualdo(2003).**

A treliça tipo Belga é uma variação da treliça Pratt, com montantes posicionados paralelos ao banzo superior, tem os esforços melhor distribuídos. A relação  $h/L$  entre  $1/8$  e  $1/6$ . Figura 14.



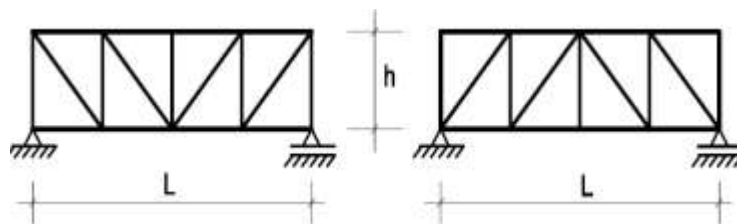
**Figura 14 - Treliça tipo Belga**  
**Fonte: Gesualdo, (2003).**

A treliça tipo Fink é uma variação do tipo Belga, utilizada para vãos maiores, entre 20m e 30 m. A relação  $h/L$  entre  $1/5$  e  $1/4$ , Figura 15, (GESUALDO, 2003).



**Figura 15 - Treliça tipo Fink**  
**Fonte: Gesualdo (2003).**

As treliças de banzos paralelos ou vigas treliçadas são normalmente utilizadas em cobertura quando o projeto exige o formato retangular, podendo também ser utilizada como longarinas de pontes, Figura 16. Para Gesualdo (2003) a relação  $h/L$  é de  $1/6$ .

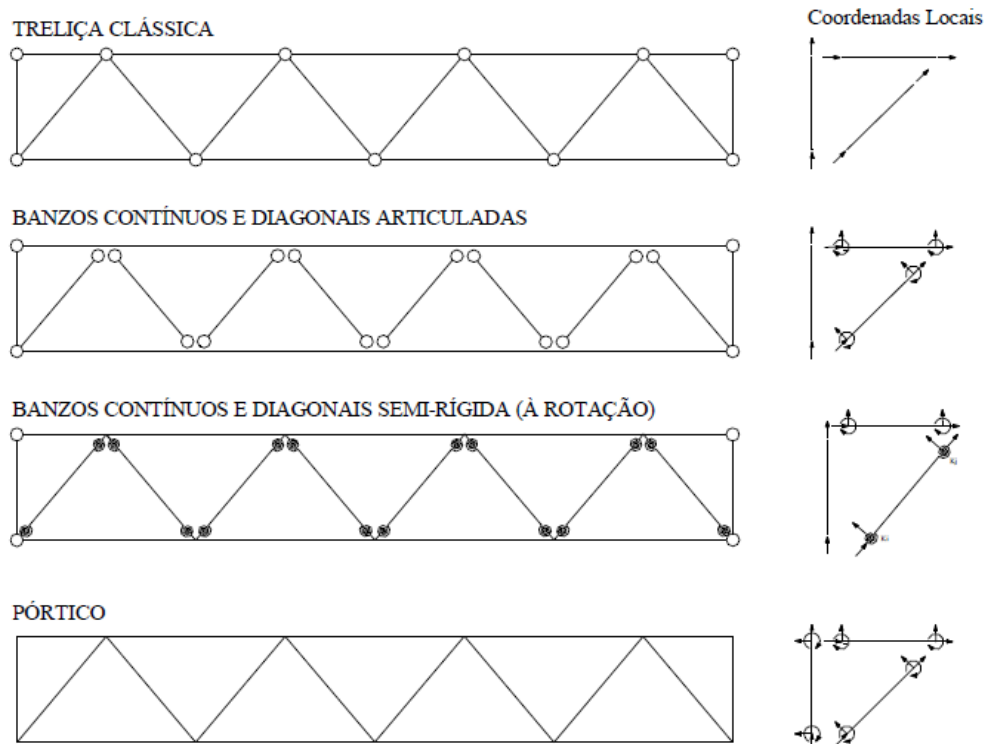


**Figura 16 - Treliça de banzos paralelos com diferentes posições das diagonais**  
Fonte: Gesualdo (2003).

### 3.5.2 Diferentes modelos de análise de treliças

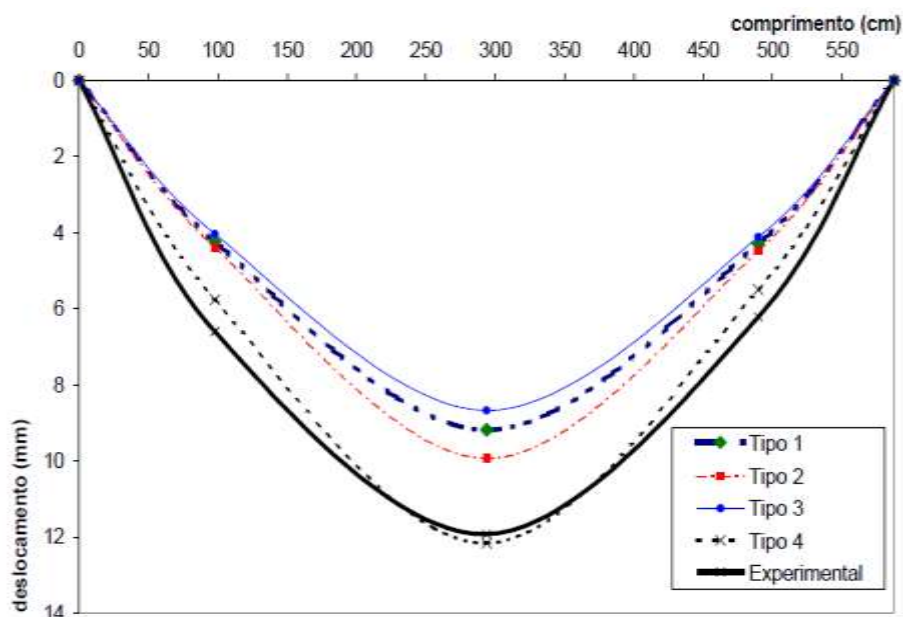
Nas estruturas de madeiras usuais, comumente são feitas análises por simplificações do comportamento real da ligação, podendo ser consideradas ligações articuladas ou rígidas. No entanto, podem ser adicionadas à análise modelos que considerem as ligações semi-rígidas (VALLE, 1999). Como exemplos podem ser citados os modelos (Figura 17):

- Treliça clássica com todas as barras articuladas
- Banzos contínuos e diagonais articuladas;
- Banzos contínuos e diagonais semi-rígida (à rotação);
- Pórtico-treliça, com ligações rígidas.



**Figura 17 - Diferentes formas de modelagem de treliças**  
**Fonte: Cheung (2003).**

Para analisar a influência dos modelos numéricos no deslocamento, Cheung (2003) compara 4 modelos numéricos à um modelo em escala real de uma treliça. Os modelos numéricos utilizados foram: banzos contínuos e diagonais articuladas (tipo 1), banzos contínuos com ligação articulada e diagonais articuladas (tipo 2), pórtico (tipo 3) e banzos contínuos com ligações semi-rígidas (tipo 4), conforme a Figura 18.



**Figura 18 - Deslocamentos teóricos e experimentais da treliça**  
**Fonte: Cheung (2003).**

Cheung (2003) conclui que os deslocamentos em treliças são influenciados pela rigidez das ligações, e que deve ser considerada nos modelos numéricos.

Mais pesquisas devem ser realizadas com intenção de esclarecer a influência da rigidez das ligações sobre o comportamento mecânico de treliças com ligações com CDE.

### 3.6 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um método baseado no método dos deslocamentos e na discretização do domínio do problema, em subdomínios com dimensões finitas. Os subdomínios são designados elementos finitos e tendo comportamento conhecido, com soma dos comportamentos desses elementos tem-se o comportamento do todo. Cada elemento finito possui  $n$  nós, os deslocamentos são apenas considerados nos nós, porém através de interpolação pode-se determina-los para os demais trechos do elemento finito.

Sendo MEF um método numérico, com o aumento do número de nós há uma tendência em melhorar a precisão dos resultados, no entanto há também o aumento do número de equações e condições de contorno, o que faz com que sua

resolução seja mais demorada. Porém, com a evolução dos computadores o MEF, tem sua versatilidade é o principal fator para sua escolha como método numérico.

São diversos os elementos finitos que podem ser utilizados para simulação dos elementos estruturais, devido aos erros gerados pelas aproximações das simplificações, a correta escolha do elemento finito, que representará o elemento real, deve ser feita com cuidado para que o comportamento da estrutura seja adequado e próximo ao real.

O modelo de treliça que será analisado exige apenas a utilização do elemento finito barra, porém necessita de diferentes configurações das vinculações. As barras são elementos bidimensionais que possuem 3 graus de liberdade (translação UX e UZ e rotação em RY) e é definida por 2 nós (início e fim). Os deslocamentos e rotações nos nós podem ser liberados individualmente podendo configurar uma barra engastada, onde nenhum grau é liberado e pode ser submetida à flexão, cisalhamento, compressão ou tração, ou uma barra articulada, quando a rotação em Y é liberada e pode ser submetida apenas a compressão ou tração, conforme Figura 19.

As barras também podem ter seus deslocamentos e rotação liberados, e serem atribuídos coeficientes elásticos UX, UZ e rotação em RY, possibilitando a simulação de ligações semi-rígidas com propriedades de rigidez axial e rotacional definidas.

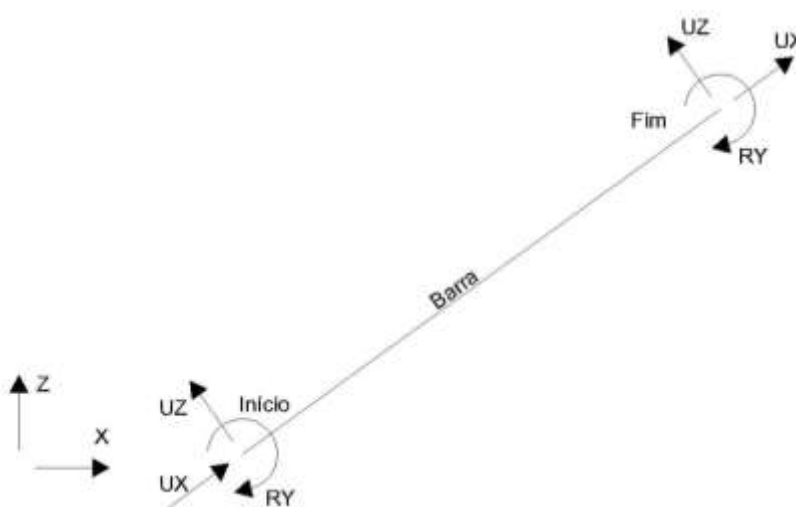


Figura 19 - Elemento barra

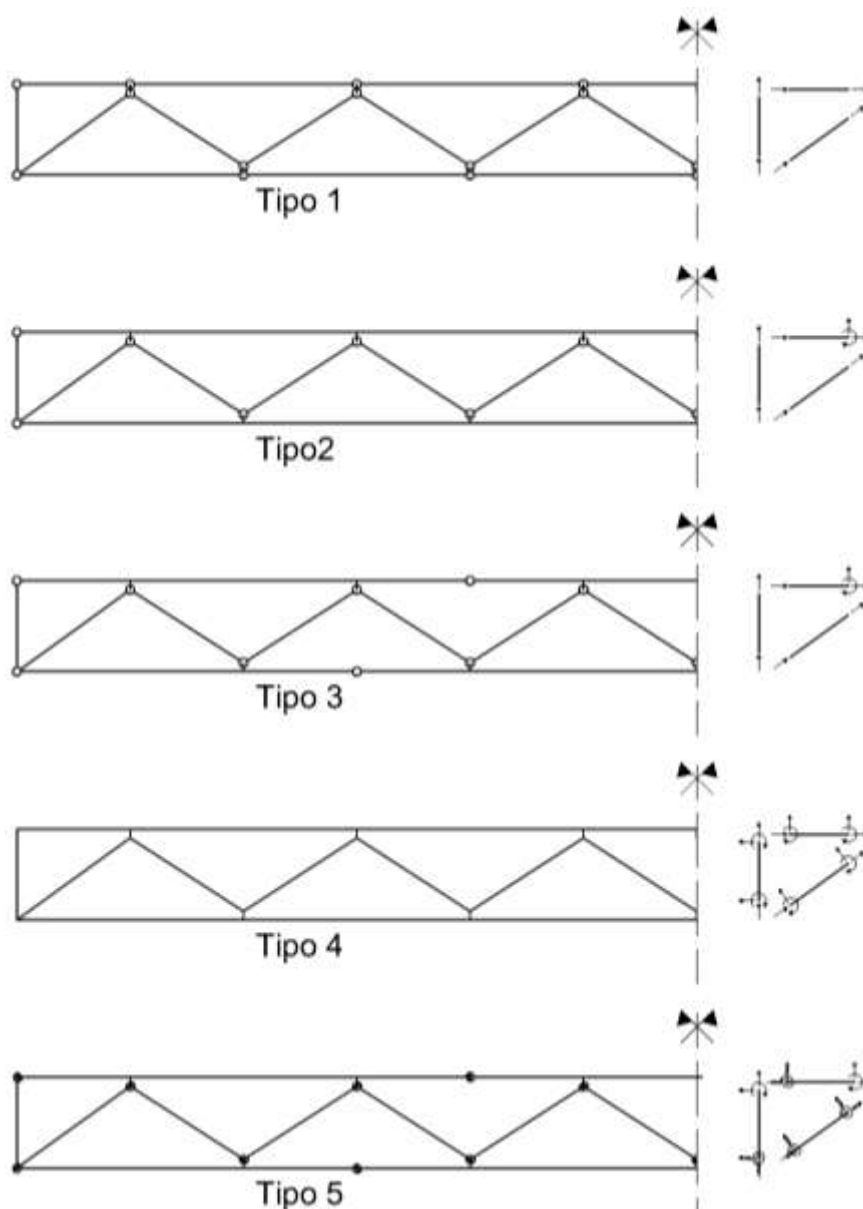


### 3.7 MODELAGEM NUMÉRICA COMPUTACIONAL

Para a análise feita neste trabalho foram propostos 5 modelagens diferentes para a mesma estrutura, variando apenas as vinculação entre as barras. Os modelos propostos são apresentados a seguir:

- Treliça isostática (tipo 1);
- Treliça com banzos contínuos e diagonais articuladas (tipo 2);
- Treliça com ligações dos banzos e diagonais articuladas (tipo 3);
- Treliça tipo pórtico (tipo 4);
- Treliça com banzos contínuos e ligações deformáveis (tipo 5).

O tipo 1 é o modelo clássico de análise de treliças isostáticas, constituído inteiramente por barras articuladas. O modelo tipo 2 possui o banzo contínuo em elementos barra engastada e com diagonais e montantes em barras articuladas. Para o modelo tipo 3 todas as ligações feitas pelas chapas são articuladas, incluído as ligações das barras dos banzos. O modelo tipo 4 possui todas as barras engastadas entre si, sendo assim, a estrutura torna-se um pórtico. Já o modelo tipo 5 possui ligações semi-rígidas, que possibilitam a deformação axial e rotacional das barras, Figura 20.



**Figura 20 - Modelos de treliça**

Como os nós não convergem para o mesmo ponto foi necessário uma ligação utilizando *links* rígidos, eles possibilitam a ligação rígida entre nós em uma estrutura, sendo o mesmo que introduzir uma condição de compatibilidade de deslocamento entre os nós.

Para simular a rigidez axial e rotacional das ligações no modelo tipo 4 foi aplicada às barras a propriedade de liberação elástica para simular o efeito da rigidez axial e rotacional, Figura 21. O coeficiente de deslizamento ou rigidez da ligação foi obtido através do ensaio descrito no item 4.2.1

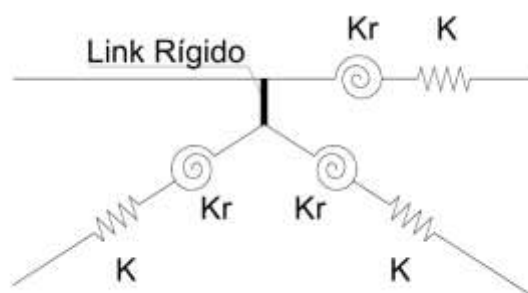


Figura 21 – Detalhamento das ligações

## 4 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia para o desenvolvimento do trabalho incluindo as modelagens numéricas bem como o ensaio experimental da para determinação da rigidez da ligação.

Inicialmente foi elaborada a revisão bibliográfica com as principais características do elemento de ligação, revisão dos documentos normativos nacionais e europeus e realizados estudos referentes à modelagem numérica. Utilizando a formulação elaborada por Carvalho (2002) foi realizada o dimensionamentos utilizando a treliça modelo tipo 1. Em seguida foi determinado o coeficiente de rigidez longitudinal através do ensaio de tração da ligação, com essa propriedade em mãos também pode ser determinada a rigidez rotacional seguindo orientação do EUROCODE 5 (COMITÊ..., 2004). E por fim, foram feitas análises comparativas entre os diferentes modelos numéricos, comparando esforços normais e deslocamentos.

Todos os ensaios foram realizados no laboratório de estruturas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Campus Campo Mourão, a madeira utilizada foi da espécie Cedrinho, as chapas de ligação utilizadas foram da empresa Gang Nail do Brasil e o software utilizado para as análises numéricas foi o Robot Structural Analysis.

### 4.1 DIMENSIONAMENTO DAS LIGAÇÕES

Neste trabalho foi utilizado um modelo de treliça com banzos paralelos e ligações com chapas de dentes estampados. No software foi utilizada seção de 3,5 cm x 10,0 cm e material com módulo de elasticidade de 8500 Mpa. Os esforços utilizados no dimensionamento foram obtidos através da modelagem numérica do modelo Tipo 1, com carregamentos concentrados de 5kN nos dois nós centrais do banzo superior, conforme Figura 22.

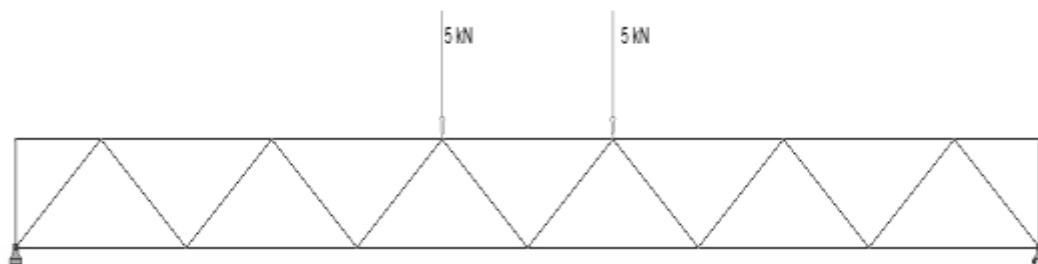


Figura 22 - Carregamentos treliça isostática

## 4.2 ENSAIO DE TRAÇÃO DAS CHAPAS

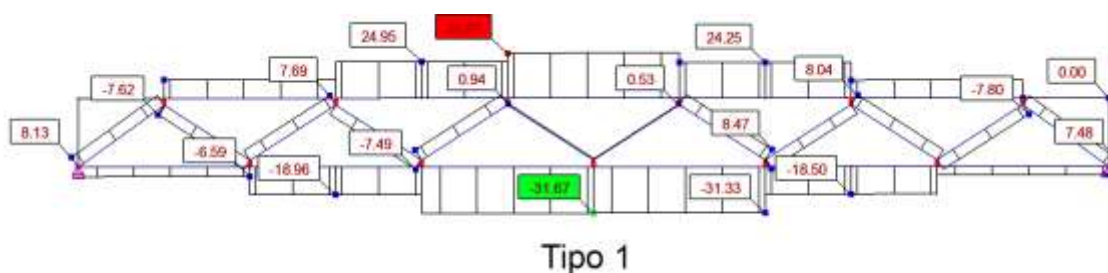
A rigidez axial da ligação foi obtida por meio do ensaio de tração de um corpo de prova de madeira da espécie Cedrinho com 3,5 cm x 10,00 cm ligado com chapas de 10,7 cm x 13,7 cm. O ensaio foi realizado até a ruptura na Máquina Universal de Ensaio EMIC DL 30.000, com capacidade de carga 300 kN, e as chapas utilizadas foram as do fabricante Gang Nail do Brasil, gentilmente cedidas pelo fabricante.

Com o diagrama força x deformação específica, a rigidez pode ser obtida a partir do seu trecho linear, sendo definido como inclinação da reta secante à curva força x deformação específica, definida pelos pontos ( $\sigma_{10\%}$ ;  $\epsilon_{10\%}$ ) e ( $\sigma_{50\%}$ ;  $\epsilon_{50\%}$ ), correspondentes respectivamente a 10% e 50% da resistência à tração da ligação.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados do dimensionamento das ligações, dos experimentos e da modelagem numéricas realizados nesse trabalho.

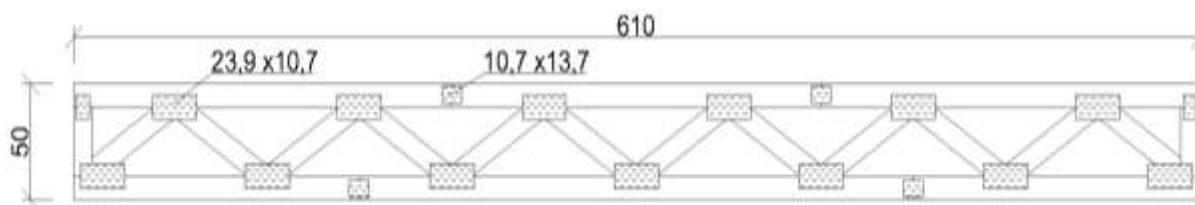
O dimensionamento das ligações foi feito com base na formulação desenvolvida por Carvalho (2002) apresentado no capítulo 4.3 e de acordo com os esforços normais da Figura 23.



**Figura 23 - Diagrama de forças normais treliça Tipo 1**

A barra do banzo utilizada para o dimensionamento da ligação é solicitada com esforço normal de tração de 31,6 kN, sendo necessário uma chapa com 156 dentes. Devido à quantidade de dentes e os modelos de chapas disponíveis no mercado foi definida a chapa de 10,7 cm x 13,7 cm para as ligações dos banzos superior e inferior.

Para as diagonais a força normal máxima é de 8,4 kN, sendo então necessários 40 dentes para cada barra. Nesse arranjo de treliça a chapa de ligação das diagonais ligam duas barras em um mesmo ponto, implicando em uma chapa com o dobro de dentes, então para essa ligação foi definida a chapa de 23,9 cm x 10,7 cm. A seguir Figura 24 com o posicionamento das chapas.



**Figura 24 - Treliça com chapas**

Observa-se na Figura 25 o arrancamento das chapas iniciando-se pelas extremidades devido ao acúmulo de tensões, como descrito por Cheung (2003). Segundo EUROCODE 5 (COMITÉ..., 2004), em função desse efeito deve ser considerado um acréscimo de 20% no comprimento da chapa.



Figura 25 – Arrancamento da chapa ensaio de tração da ligação

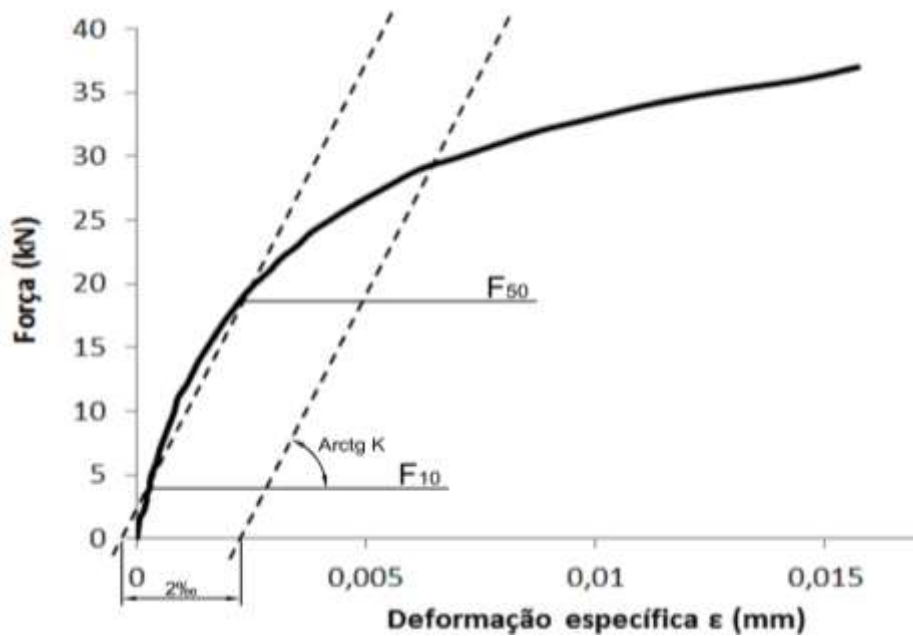


Figura 26 - Comportamento da ligação no ensaio de tração

Através da Figura 26 foi obtido o coeficiente de rigidez axial da ligação, conforme NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 1997). Para chapa ensaiada foi encontrada rigidez longitudinal de 53,82 kN.m/mm.

Com o coeficiente de rigidez longitudinal foi calculado a rigidez rotacional, admitindo-se a rigidez por dente é feita a proporcionalidade da rigidez a partir do centro de rotação, sendo equivalente a Equação 6 do capítulo 4.4. Os coeficientes obtidos são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1 - Coeficientes de rigidez das ligações**

<b>Ligação</b>	<b>K (kN/mm)</b>	<b>K/dente (kN/mm)</b>	<b>Kr (kN.m/rad)</b>
Banzos	53,818	0,897	3093,96
Diagonais	53,818	0,897	5709,13

## 5.1 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS

Introduzindo os coeficientes, obtidos na Tabela 1, no modelo numérico tipo 5 apresentado no capítulo 3.7 é possível obter os valores dos esforços normais nas barras e os deslocamentos dos nós dos 5 modelos numéricos, Figura 27.



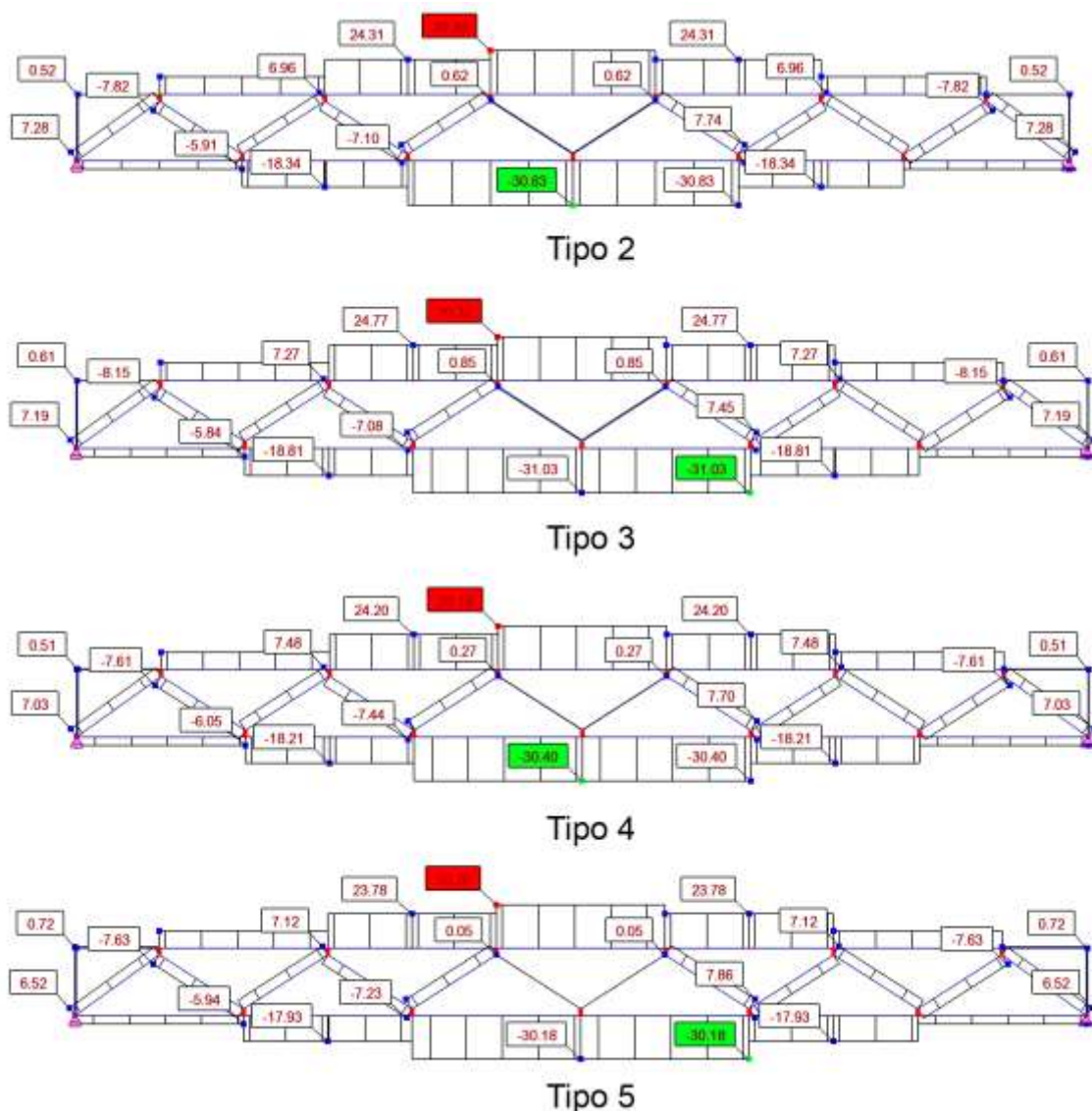


Figura 27 - Esforços normais das treliças

A análise foi realizada por comparativo dos valores de esforços normais e deslocamentos das barras, sendo apresentados em forma de tabela e gráfico, respectivamente.

Na Tabela 2 são apresentados os esforços normais de cada treliça e comparados à treliça Tipo 1, modelo clássico comumente utilizado para obtenção dos esforços em treliças, na Figura 28 a numeração correspondente as barras.

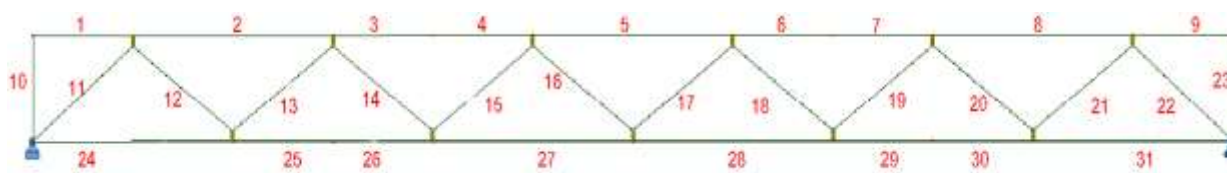


Figura 28 - Treliça com barras numeradas

Tabela 2–Comparativo entre esforços normais das barras

Barra	Tipo 1 (kN)	Tipo 2 (kN)	Diferença (%)	Tipo 3 (kN)	Diferença (%)	Tipo 4 (kN)	Diferença (%)	Tipo 5 (kN)	Diferença (%)
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,48	-	0,79	-
2	12,71	12,48	1,81	12,69	0,16	12,18	4,17	12,19	4,09
3	24,95	24,31	2,57	24,77	0,72	24,20	3,01	23,78	4,69
4	24,95	24,31	2,57	24,77	0,72	24,20	3,01	23,78	4,69
5	30,69	30,30	1,27	30,32	1,21	30,18	1,66	30,20	1,60
6	24,25	24,31	0,25	24,77	2,14	24,20	0,21	23,78	1,94
7	24,25	24,31	0,25	24,77	2,14	24,20	0,21	23,78	1,94
8	12,06	12,48	3,48	12,69	5,22	12,18	1,00	12,19	1,08
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,48	-	0,79	-
10	0,00	0,52	-	0,61	-	0,51	-	0,72	-
11	8,13	7,28	10,46	7,19	11,56	7,03	13,53	6,52	19,80
12	-7,62	-7,82	2,62	-8,15	6,96	-7,61	0,13	-7,63	0,13
13	7,69	6,96	9,49	7,27	5,46	7,48	2,73	7,12	7,41
14	-7,49	-7,10	5,21	-7,08	5,47	-7,44	0,67	-7,23	3,47
15	8,16	7,74	5,15	7,45	8,70	7,70	5,64	7,86	3,68
16	0,94	0,62	34,04	0,85	9,57	0,27	71,28	0,05	94,68
17	0,53	0,62	16,98	0,85	60,38	0,27	49,06	0,05	90,57
18	8,47	7,74	8,62	7,45	12,04	7,70	9,09	7,86	7,20
19	-7,36	-7,10	3,53	-7,08	3,80	-7,44	1,09	-7,23	1,77
20	8,04	6,96	13,43	7,27	9,58	7,48	6,97	7,12	11,44
21	-7,80	-7,82	0,26	-8,15	4,49	-7,61	2,44	-7,63	2,18
22	7,48	7,28	2,67	7,19	3,88	7,03	6,02	6,52	12,83
23	0,00	0,52	-	0,61	-	0,51	-	0,72	-
24	-6,59	-5,91	10,32	-5,84	11,38	-6,05	8,19	-5,94	9,86
25	-18,96	-18,34	3,27	-18,81	0,79	-18,21	3,96	-17,93	5,43
26	-18,96	-18,34	3,27	-18,81	0,79	-18,21	3,96	-17,93	5,43
27	-31,67	-30,83	2,65	-31,03	2,02	-30,40	4,01	-30,18	4,70
28	-31,33	-30,83	1,60	-31,03	0,96	-30,40	2,97	-30,18	3,67
29	-18,50	-18,34	0,86	-18,81	1,68	-18,21	1,57	-17,93	3,08
30	-18,50	-18,34	0,86	-18,81	1,68	-18,21	1,57	-17,93	3,08
31	-5,77	-5,91	2,43	-5,84	1,21	-6,05	4,85	-5,94	2,95

Esse comparativo indicou que a maior diferença quando comparadas ao modelo tipo 1 encontra-se nas barras 16 e 17, que são as diagonais centrais da treliça. Estas diferenças não acarretariam mudança no dimensionamento das ligações, pois essas barras possuem esforços quase nulos e a diagonal utilizada para o dimensionamento é a da barra 7, onde para a treliça tipo 3 há a maior diferença, 2,14%. Os Banzos tem a maior diferença na barra 28, no entanto a barra utilizada para o dimensionamento é a barra 24, que é a mais solicitada com 11,38%

de diferença no modelo tipo 3, sendo nesse caso consideravelmente grande pois o número de dentes da chapa é diretamente proporcional ao esforço normal em que a ligação é submetida.

A Figura 29 apresenta o comparativo dos deslocamentos dos nós dos 5 modelos numéricos da treliça. Sendo possível visualizar a grande influência da rigidez das ligações no deslocamento das barras.

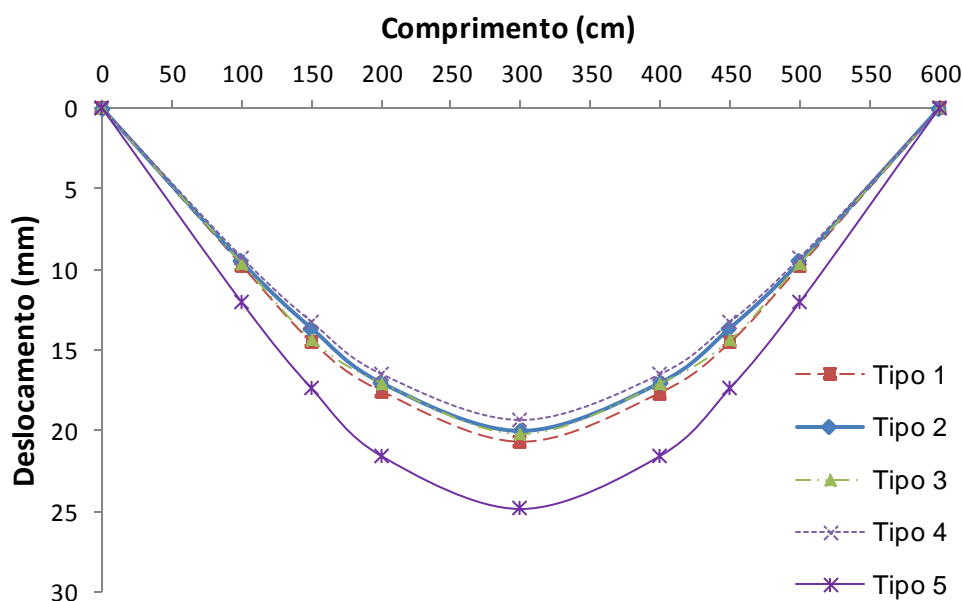


Figura 29 - Deslocamentos da análise numérica

O modelo tipo 4, pórtico, apresentou uma diferença de 6,79% quando comparada a treliça tipo 1, sendo o modelo com menor deformação da estrutura quando submetido à carregamentos. Este comportamento se deve ao bloqueio dos giros entre as barras engastadas do modelo tipo 4, reduzindo assim o deslocamento.

O modelo 5, onde são consideradas as deformações das ligações, apresentou diferença de 19,81% ao ser comparada com o tipo 1. Ainda que os momentos sejam parcialmente transferidos e o giro entre as barras seja reduzido pela rigidez rotacional, esse modelo possui valores consideravelmente maiores que os outros modelos.

As diferenças encontradas no comparativo de esforços normais podem causar pequenas alterações na verificação dos Estados Limites Últimos e uma influência maior nas verificações dos Estados Limites de Serviço devido a grande variação das flechas.

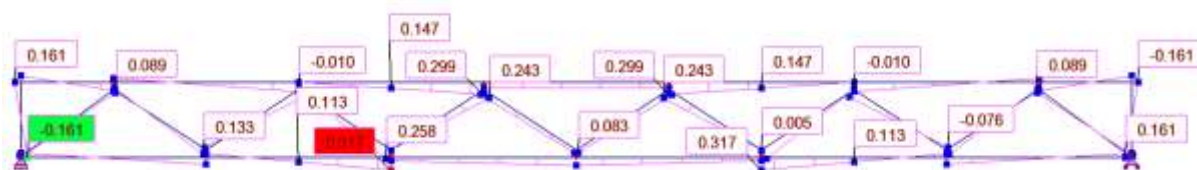
Para analisar a contribuição da rigidez rotacional sobre o modelo com ligações semi-rígidas é feita mais uma comparação entre o modelo tipo 5 e outro

modelo sem a rigidez rotacional, Tipo 6. A comparação é feita em forma de tabela devido à pequena variação entre os modelos, Tabela 3.

**Tabela 3 - Deslocamentos treliças Tipo 5 e 6**

Posição (m)	Tipo 5 Deslocamento (mm)	Tipo 6 Deslocamento (mm)	Diferença (%)
0	0,000	0,000	0,00%
100	12,033	12,027	0,05%
150	17,367	17,353	0,08%
200	21,554	21,543	0,05%
300	24,845	24,833	0,05%
400	21,554	21,543	0,05%
450	17,367	17,353	0,08%
500	12,033	12,027	0,05%
600	0,000	0,000	0,00%

A diferença flecha entre a Tipo 5 e a Tipo 6 foi apenas de 0,05%, demonstrando a pequena contribuição da rigidez rotacional da ligação no deslocamento. Esta baixa influencia deve-se aos pequenos valores de momentos fletores que são proporcionais a baixa inércia das seções, 3,5 cm x 10,0 cm, Figura 30. Com os valores dos esforços normais e de momentos fletores em grandezas diferentes, sendo os esforços normais maiores. Como a rigidez rotacional é relacionada ao momento fletor contribui muito pouco ao deslocamento.



**Figura 30 - Momentos Fletores treliça Tipo 5.**

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As chapas de dentes estampados, amplamente utilizadas nos Estados Unidos e Europa em estruturas de coberturas em madeira, foram concebidas principalmente pela facilidade e velocidade com que pode ser utilizadas em estruturas industrializadas. Além de possuírem uma excelente propriedade de rigidez, o que torna as estruturas mais esbeltas e proporcionalmente mais leves.

Neste trabalho, foram realizados ensaios para determinação da rigidez das ligações com chapas de dentes estampados e análises numéricas de modelos com diferentes configurações de articulações entre as barras de uma treliça com banzos paralelos, comparando os esforços normais e deslocamentos.

Com base nesse trabalho, pode se obter as seguintes conclusões:

- As ligações com chapas de dentes estampados apresentam-se como uma excelente alternativa na ligação de elementos em estruturas para cobertura utilizando madeira de reflorestamento brasileira.
- O dimensionamento das ligações das diagonais da treliça estudada não sofre muita influência quando é alterado o tipo de modelo numérico, 2,14% de diferença no pior dos casos. Já o dimensionamento das ligações dos banzos é muito influenciado pela modelagem da treliça, podendo ter uma diferença no número de dentes de até 11,38% quando se comparam os diferentes modelos.
- Neste trabalho foi analisada a influência da forma como é tratada a modelagem das estruturas de treliças e pode-se observar o efeito das ligações semi-rígidas no deslocamento quando submetida a carregamentos, no entanto, mais trabalhos devem ser realizados com treliças reais para comparação com valores teóricos a fim de determinar o modelo numérico adequado que representa o modelo físico real.
- Ao fim foi possível notar a pequena contribuição da rigidez rotacional no modelo que considera a rigidez das ligações. Em futuros estudos onde as seções sejam esbeltas e os valores de momentos fletores sejam pequenos em relação aos esforços normais, pode-se desprezar a rigidez rotacional sem influencia na acurácia da análise numérica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ASTM, American Society for Testing and Materials. **D198**: Standard Test Methods of Static Testss of Lumber in Structural Sizes. West Conshohocken, 2002.

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, André. **Análise teórico-experimental de pórticos-treliça de madeira**. 1995. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.

BOLANDIM, Emerson A. Estudo da influência da umidade na resistência e na rigidez das ligações em peças de madeira por conectores de chapa com dentes estampados. **Madeira Arquitetura & Engenharia**, São Carlos, v.9, n.22, p. 81-95, jun. 2008.

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 potes de madeira**. 2003. 188 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia das Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003

EUROPEAN PRESTANDARD. **EUROCODE 5** – Design of timber structures-Part1-1: General rules and rules for buildings. Brussels], 2002.

GESUALDO, Francisco A. R. Notas de aula na disciplina de estruturas de madeira oferecida pela Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, 2003.

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.

MOLINA, Julio C.; CALIL, Carlito Jr. Sistema construtivo em wood frame para casa de madeira. **Semina: Ciência Exatas e Tecnológicas**, Londrina, v.31, n.2, p. 143-156, jul./dez. 2010.

MOLITERNO, Antonio. **Caderno de projetos de telhados em estruturas de madeira**. 4. ed. São Paulo, SP: E. Blücher, 2010. xiii, 268 p.

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.

STAMATO, Guilherme C. Utilização da madeira de florestas plantadas para construção de habitações In: CONGRESSO FLORESTAL PARANAENSE, 4, 2012, Curitiba, PR, **Anais**, 2012.

VALLE, Ângela do. **Rigidez de ligações com parafusos em estruturas de madeira laminada colada**. 1999. 169p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.