

# AValiação DO COMPORTAMENTO DE PLACAS DE CLT: UM ESTUDO TEÓRICO E NUMÉRICO

Cassiano Antonio Gasparini de Barros<sup>1</sup>, Leandro Vanalli<sup>2</sup>, Germano Francisco Simon Romera<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Graduado no Curso de Engenharia Civil, Campus Umuarama/PR, Universidade Estadual de Maringá – UEM. ra99486@uem.br

<sup>2</sup>Orientador, Doutor, Departamento de Tecnologia, UEM. Professor da Universidade Estadual de Maringá (UEM) e Chefe do Departamento de Tecnologia (DTC/UEM). Ivanalli@uem.br

<sup>3</sup>Coorientador, Mestre, Departamento de Tecnologia, UEM. Professor e Coordenador Adjunto do Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá (UEM) Campus de Umuarama. gfsromera2@uem.br

## RESUMO

A gradativa preocupação de tornar o mundo um lugar mais sustentável, com o uso de materiais que geram menores impactos ao meio ambiente, avança progressivamente a implantação da madeira. O CLT (*cross laminated timber*) é um material dentro do grupo das madeiras engenheiradas composto por camadas sucessivas de madeira dispostas ortogonalmente entre si a fim de garantir resistência e rigidez em duas direções, podendo ser empregado em lajes e paredes. O conhecimento ainda escasso a respeito traz a necessidade de se ampliar o entendimento de suas características, assim, o presente trabalho apresenta um estudo teórico e numérico, abordando análises das propriedades e o comportamento mecânico de placas de madeira laminada cruzada com o auxílio do *software HyperWorks*, realizando comparações com ensaios experimentais e explorando diferentes rigidezes para análise do efeito *rolling shear*. Foram produzidas análises dos deslocamentos em três placas de CLT com comprimentos diferentes, já estudadas experimentalmente, submetidas à flexão a quatro pontos. As deflexões nas placas menores atingiram valores mais próximos dos obtidos experimentalmente utilizando uma rigidez maior, enquanto na placa maior houve similaridade com os resultados experimentais empregando-se uma rigidez menor. Em suma, esta pesquisa apresenta resultados que contribuem para o melhor entendimento do comportamento da madeira laminada cruzada, principalmente no que diz respeito ao seu desempenho estrutural.

**PALAVRAS-CHAVE:** Madeira laminada cruzada; Desempenho estrutural; *Rolling shear*.

## 1 INTRODUÇÃO

Pode-se dizer que a madeira tenha sido um dos primeiros materiais utilizados para a construção de residências da raça humana e com o desenvolvimento de inúmeras técnicas, hoje é possível realizar projetos de alta complexidade. Esse material tem sido responsável por provocar mudanças em diversas empresas pelo mundo que, preocupadas com a visibilidade, procuram alternativas mais sustentáveis. A madeira surge neste cenário de maneira ímpar, podendo ser uma excelente alternativa para a construção civil graças às novas tecnologias aplicadas neste material (JÚNIOR; SILVA; SOARES, 2017).

Neste contexto, a Madeira Laminada Cruzada, (*Cross Laminated Timber - CLT*) surge como um material inovador, consistindo do empilhamento de camadas de madeira que são coladas de maneira transversal uma a outra. Tal configuração construtiva permite à CLT apresentar recursos de ação bidirecional, análogo a lajes de concreto armado, podendo ser usada em lajes e paredes, diferentemente de outros produtos à base de madeira usados em vigas e pilares que oferecem transferência de carga em uma única direção. Geralmente é empregada uma madeira mais resistente nas camadas externas do material (GAGNON et al., 2013).

A origem da aplicabilidade da CLT remete ao início dos anos 90 na Europa, mais precisamente na Áustria e na Alemanha, para uso residencial. Contudo, só após os anos 2000 este tipo de tecnologia teve um aumento significativo, devido a melhor aceitação do mercado que percebeu a possibilidade da substituição do aço e do concreto pela CLT a qual proporcionaria a mesma funcionalidade destes, além de vantagens como leveza, pré-fabricação, resistência a atividades sísmicas, tempo de execução reduzido e menos

geração de resíduos (PEREIRA, 2014). No Brasil, este tipo de tecnologia é ainda mais recente, impossibilitando, até o momento, a elaboração de bibliografias amplas que descrevem a respeito do assunto em território nacional (OLIVEIRA, 2018).

Quanto às propriedades deste material, é importante salientar que como a qualquer produto a base de madeira, há uma variação na magnitude dos valores de suas propriedades em relação aos três planos ortogonais, classificando-o como material ortotrópico. Encontra-se uma rigidez maior na direção longitudinal, frequentemente denominada direção paralela às fibras e rigidezes menores, porém parecidas entre si, nas direções radial e tangencial (JUNIOR; LAHR; DIAS, 2003).

Como consequência do emprego da madeira laminada cruzada como placa, a disposição dos esforços internos pode se apresentar em mais de uma direção, o que possibilita o surgimento de um comportamento atuante no plano radial-tangencial da madeira chamado efeito *rolling shear* (VILELA, 2020). O fenômeno ocorre normalmente na flexão do painel, gerando esforços cisalhantes nas camadas transversais de maneira perpendicular às fibras fazendo com que elas rompam como ligações e então “deslizem” uma sobre as outras (PEREIRA, 2014).

Vale destacar que a ABNT NBR 7190:1997 (Associação Brasileira de Normas Técnicas) não aborda sobre o efeito *rolling shear*, por conseguinte a metodologia para medir este efeito é baseada em outras referências. Tal efeito é também associado ao módulo de elasticidade transversal no *rolling shear* ( $G_r$ ) que depende de fatores como densidade da camada cruzada, espécie da madeira, teor de umidade, espessura das camadas, entre outros fatores (POPOVSKI et al., 2019). Assim, um fator a ser estudado é a variabilidade das dimensões das estruturas de CLT. Quanto menor a relação entre o vão e a espessura, maior a influência deste efeito para a deformação da estrutura (ROSS; GAGNON; KEITH, 2013).

Os valores comuns para o módulo de elasticidade transversal no *rolling shear* se encontram entre 40 MPa a 80 MPa (CIB-W18, 2004). Vale ressaltar que os valores encontrados em normas e códigos para esta propriedade variam muito, mas para efeito de projeto, sugere-se utilizar  $G_r=50$  MPa (AUGUSTIN, 2008). Em contrapartida, pode-se obter um valor aproximado para esta propriedade assumindo como sendo um décimo do módulo de elasticidade transversal paralelo às fibras ( $G_r=G_0/10$ ) (ROSS; GAGNON; KEITH, 2013).

Deve-se salientar que os modelos que descrevem os comportamentos, elástico e de resistência, deste material estão em um contínuo processo de pesquisa, tendo em vista sua recente investigação. Exploram-se meios que tragam perspectivas mais realistas em relação ao comportamento mecânico dos elementos a base de CLT. Neste cenário, o presente artigo busca apresentar um estudo realizando análises estruturais deste material, qualificando-o quanto ao seu desempenho frente a diferentes tipos de configurações. Planeja-se, além disso, empregar o *HyperWorks*, software fundamentado no método dos elementos finitos, para realizar comparações entre ensaios experimentais e as respectivas simulações produzidas pelo software, enfatizando a análise de diferentes valores da propriedade que mede a magnitude do efeito *rolling shear* em estruturas de CLT.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

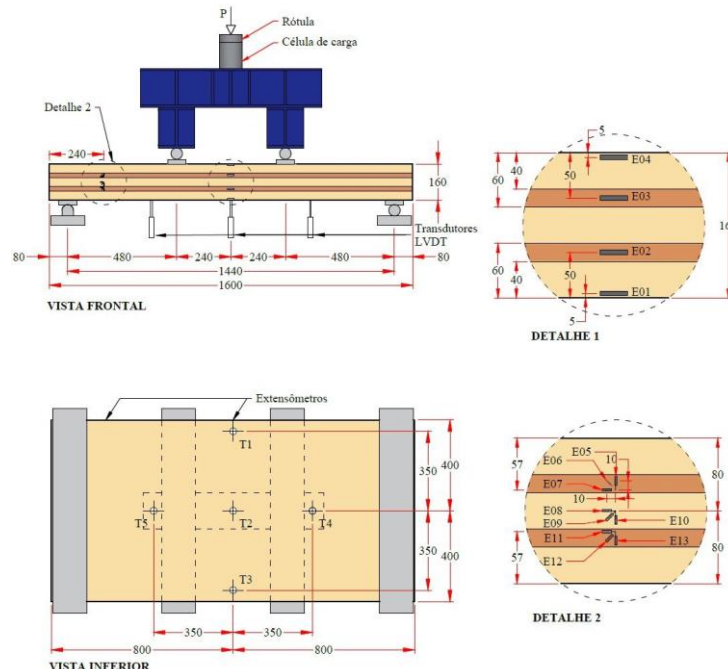
Esta pesquisa foi desenvolvida através de uma análise numérica por meio da versão educacional do software *HyperWorks*, elaborado pela empresa *Altair Engineering*. Este software possibilita a modelagem de estruturas ortotrópicas como a madeira, sendo necessário o emprego adequado de suas propriedades mecânicas que ainda serão discutidas nesta seção. Com isso, ele permite a observação das distribuições das tensões, bem como os deslocamentos em pontos variados de uma estrutura a base de madeira laminada cruzada.

Para a análise de estruturas de CLT, esta metodologia se baseou na pesquisa de Vilela (2020), o qual estudou o comportamento mecânico de placas deste material em ensaios experimentais realizando testes de flexão à quatro pontos, modificando o vão livre e a distância entre os pontos de aplicação de carregamento, formando três tipos de ensaios diferentes. Vale ressaltar que os mesmos experimentos foram reproduzidos numericamente por ele, utilizando valores tanto da norma brasileira quanto da europeia (NBR 7190:1997 e BS EN 338:2016) e duas teorias de placas (Kirchhoff e Mindlin) através do *software* RFEM 5 (DLUBAL SOFTWARE GMBH, 2013).

## 2.1 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

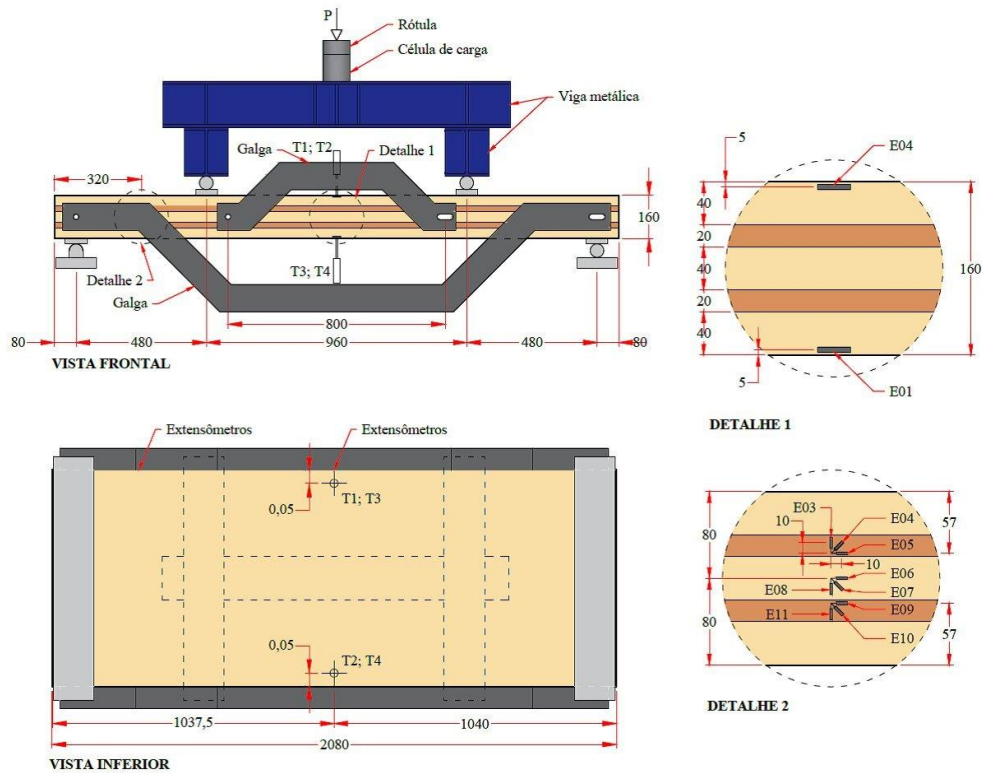
No trabalho de Vilela (2020) foi utilizado um pórtico projetado para suportar até 2.000 kN de carregamento. O carregamento era aplicado mediante um macaco hidráulico de acionamento elétrico, até que houvesse redução significativa deste carregamento devido à redução de rigidez pós-ruptura.

Os ensaios foram denominados PFP-A, PFP-B e PFP-C, com comprimentos de 1,60 m, 2,08 m e 4,00 m, respectivamente, sendo que para cada grupo deste ensaio havia sete placas ao todo, cada uma com largura de 0,80 m. O CLT utilizado para os ensaios era composto por cinco camadas, sendo três longitudinais com espessura de 40 cm e duas transversais com espessura de 20 cm, totalizando 160 cm de espessura efetiva em cada placa. Extensômetros e transdutores foram posicionados com a finalidade de medir os deslocamentos verticais e as tensões normais, respectivamente. Suas posições, bem como as dimensões do CLT, região de aplicação de carga e vinculação nas placas PFP-A, PFP-B e PFP-C são detalhadas nas figuras abaixo (Figuras 1, 2 e 3).

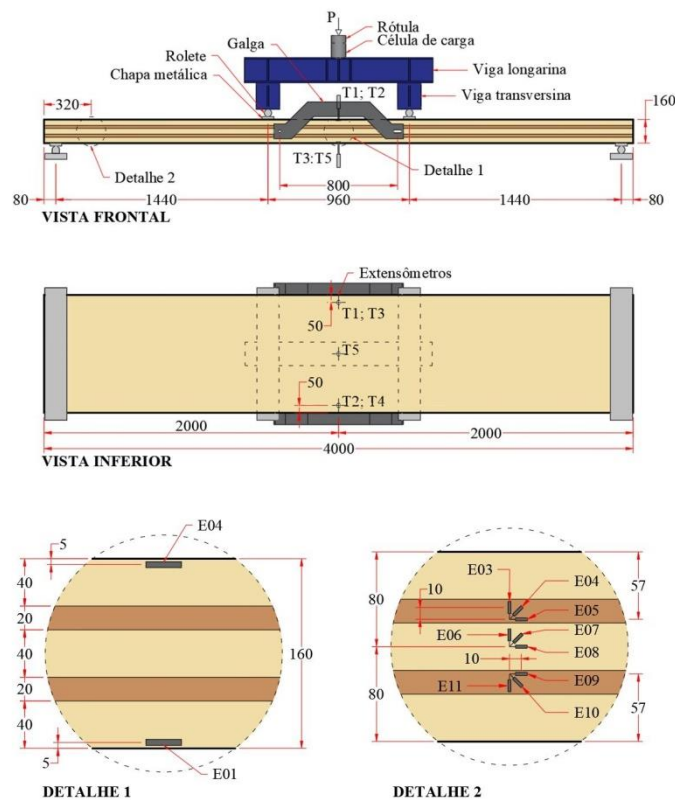


**Figura 1:** Detalhamento da instrumentação, equipamentos e dimensões do ensaio PFP-A (medidas em milímetros)

Fonte: Vilela (2020)



**Figura 2:** Detalhamento da instrumentação, equipamentos e dimensões do ensaio PFP-B (medidas em milímetros)  
**Fonte:** Vilela (2020)



**Figura 3:** Detalhamento da instrumentação, equipamentos e dimensões do ensaio PFP-C (medidas em milímetros)  
**Fonte:** Vilela (2020)

Para fins de maior compreensão das características geométricas relevantes de cada placa, um breve resumo das particularidades das três análises é apresentado na tabela a seguir (Tabela 1).

**Tabela 1:** Resumo das características geométricas das placas PFP-A, PFP-B e PFP-C.

| PLACAS | Largura (mm) | Comprimento (mm) | Espessura (mm) |
|--------|--------------|------------------|----------------|
| PFP-A  | 800          | 1600             | 160            |
| PFP-B  | 800          | 2080             | 160            |
| PFP-C  | 800          | 4000             | 160            |

Fonte: Autor (2021)

## 2.2 PROPRIEDADES

A obtenção das propriedades das camadas de CLT empregadas nesta pesquisa será baseada conforme a norma NBR 7190 (ABNT, 1997). No trabalho de Vilela (2020) a madeira empregada foi o *Pinus taeda* e as classes normativas utilizadas para classificar as camadas de CLT foram C30 para as camadas externas e C20 para as camadas internas, ambas da classe das coníferas. Tal classificação foi feita realizando ensaios experimentais de amostras retiradas das camadas externas e internas para a obtenção das propriedades necessárias para executar a categorização.

Por meio destes dados é possível a obtenção das propriedades das camadas segundo a norma NBR 7190 (ABNT, 1997). O módulo de elasticidade na direção normal às fibras é obtido através da equação a seguir (Equação 1).

$$E_y = \frac{E_x}{20} \quad (1)$$

Onde,  $E_y$  é o módulo de elasticidade normal às fibras e  $E_x$  é o módulo de elasticidade paralelo às fibras.

A norma também traz uma expressão para encontrar o módulo de elasticidade transversal conforme a equação abaixo (Equação 2).

$$G_{xy} = \frac{E_x}{20} \quad (2)$$

Onde  $G_{xy}$  é o módulo de elasticidade transversal no plano  $xy$ .

O módulo de elasticidade transversal no plano  $xz$  ( $G_{xz}$ ) pode ser tratado como o mesmo para o plano  $xy$  ( $G_{xy}$ ). Todavia, o módulo de elasticidade transversal no plano  $yz$  (módulo de elasticidade transversal no *rolling shear*) tem que ser embasado através de outras literaturas, pelo fato da norma NBR 7190 (ABNT, 1997) não abordar este tema. Augustin (2008) traz o valor de  $G_{yz}=50$  MPa, contudo Ross, Gagnon e Keith (2013) sugerem tal propriedade segundo a equação a seguir (Equação 3).

$$G_{yz} = \frac{G_{xy}}{10} \quad (3)$$

Em que  $G_{yz}$  é o módulo de elasticidade transversal no plano  $yz$ .

Os valores das propriedades das camadas de CLT utilizadas nas análises numéricas se encontram na tabela a seguir (Tabela 2).

**Tabela 2:** Valores das propriedades empregadas nas camadas de CLT

| Propriedades | C20 (MPa) | C30 (MPa) |
|--------------|-----------|-----------|
| $E_x$        | 3.500,00  | 14.500,00 |
| $E_y$        | 175,00    | 725,00    |
| $G_{xy}$     | 175,00    | 725,00    |

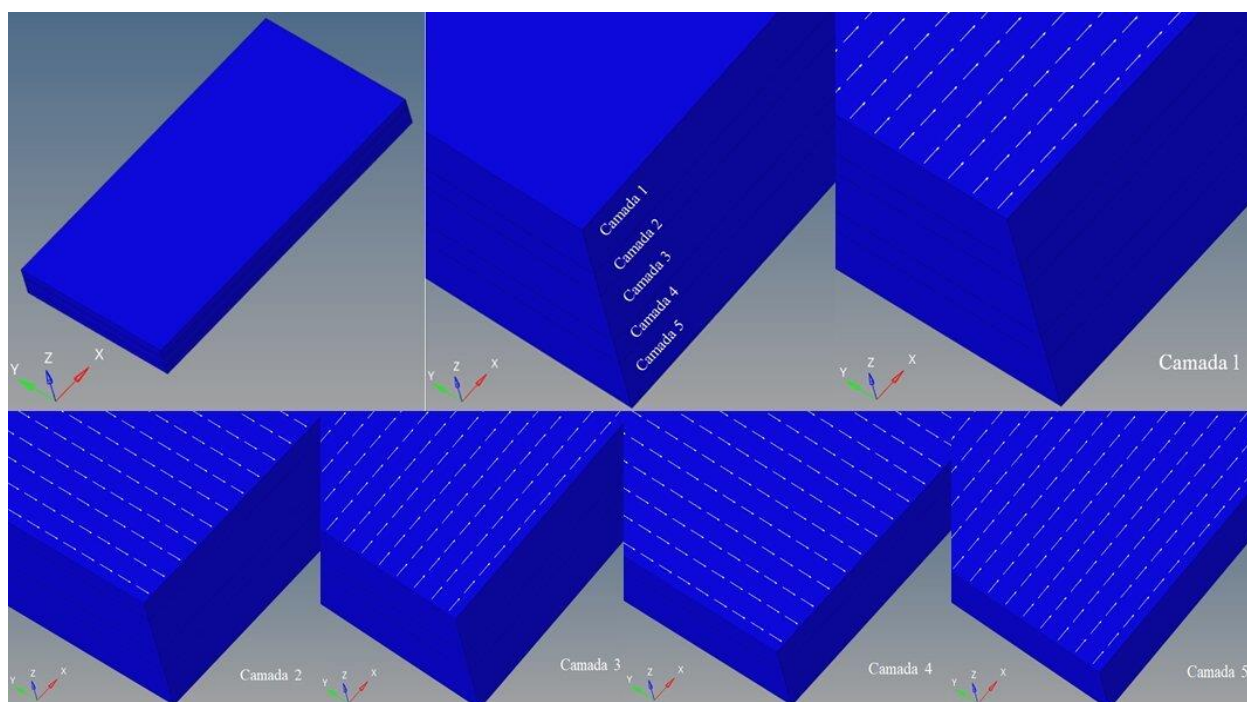
Fonte: Autor (2021)

Para o  $G_{yz}$  foi usado nas camadas externas (C30) o valor de 72,50 MPa. Nas camadas internas (C20) foram testados os valores de 17,50 MPa (resultado da Equação 3) e também de 50 MPa, para observar a diferença entre valores dentro e fora do intervalo de 40 MPa a 80 MPa, conforme encontrado por CIB-W18 (2004).

### 2.3 ANÁLISE NUMÉRICA

A princípio foi necessário inserir as limitações geométricas da estrutura através de coordenadas cartesianas para formar linhas. Estas foram criadas na direção  $y$  (largura do CLT), sendo possível então gerar a malha da estrutura. Vale destacar que foi utilizada a versão estudantil do *software* a qual fornece apenas a possibilidade de trabalhar com um número máximo de 10.000 nós na malha. Quanto maior a quantidade de nós, maior o refinamento da malha, ou seja, maior será a precisão nos resultados. Contudo, para que haja equivalência no refinamento entre estruturas de tamanhos diferentes, a dimensão dos elementos de casca deve ser igual. Por isso, na placa PFP-C (a maior dentre as três analisadas), foi estipulado o menor tamanho possível para estes elementos finitos, sem que ultrapasse a quantidade máxima de nós. As outras duas estruturas (PFP-A e PFP-B) utilizam elementos de casca de dimensão equivalente, de modo que a comparação ocorra em modelos com mesmo refinamento de malha.

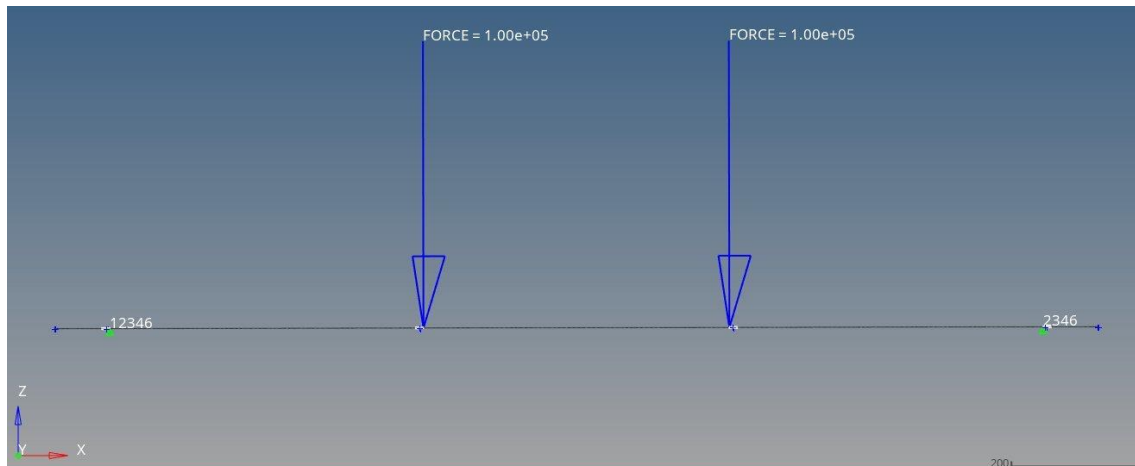
O *HyperWorks* possibilita a modelagem de compósitos de materiais ortotrópicos na malha de elementos 2D, podendo inclusive terem propriedades e espessuras distintas, além de se apresentarem com diferentes orientações principais, como mostra a figura abaixo (Figura 4).



**Figura 4:** Orientação das camadas de CLT no *software HyperWorks*

Fonte: Autor (2021)

Foram atribuídas as posições dos vínculos e o tipo de cada um, sendo que em um deles a rotação na direção  $y$  se apresentava livre e no outro a rotação em  $y$  e translação em  $x$  estavam liberadas. Também foram inseridos os carregamentos atribuindo suas respectivas posições, magnitudes, direções e sentidos, como pode ser observado na figura a seguir (Figura 5).

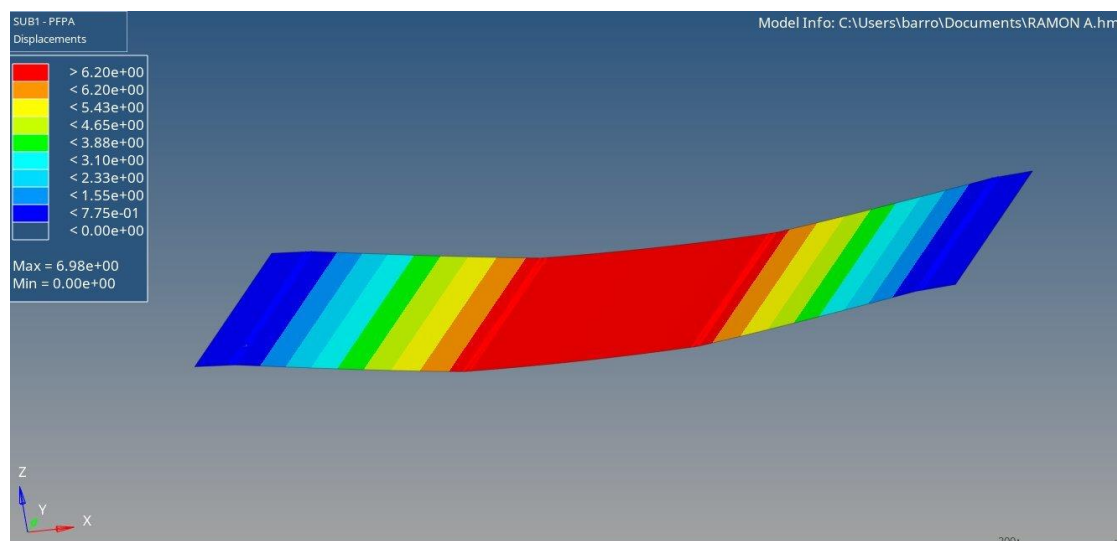


**Figura 5:** Exemplo da configuração dos vínculos e carregamentos  
**Fonte:** Autor (2021)

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da análise numérica com auxílio do *software HyperWorks* estão apresentados a seguir, com os resultados comparados com os obtidos por Vilela (2020). O objetivo foi comparar os deslocamentos no centro do vão da estrutura obtidos através das análises experimentais e numéricas. No *software HyperWorks* foi modelado duas configurações por ensaio com módulo de elasticidade transversal no *rolling shear* diferentes.

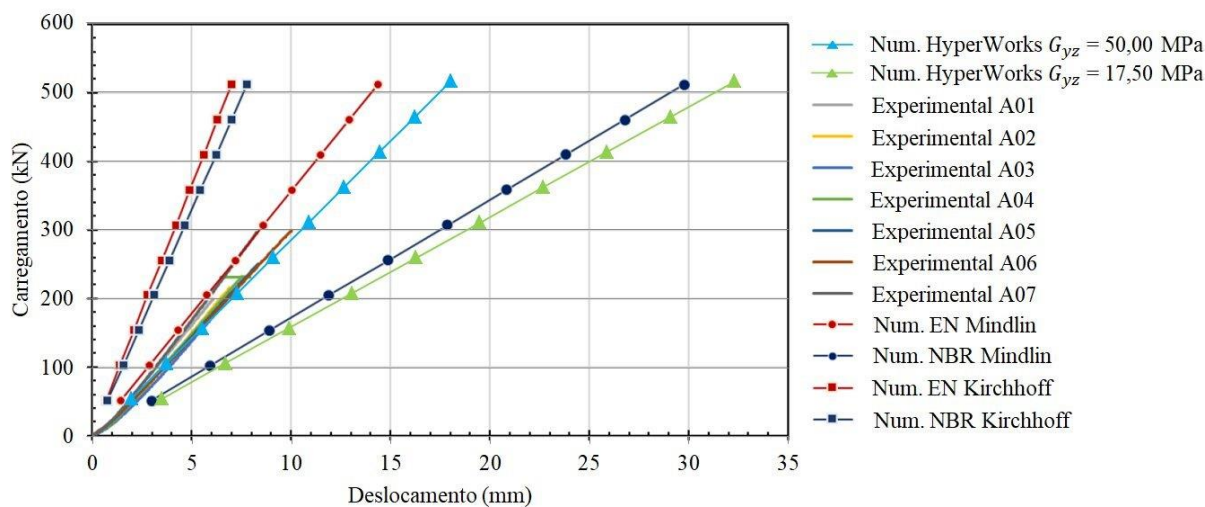
Na figura abaixo (Figura 6) é mostrado o comportamento mecânico da placa de CLT referente ao ensaio PFP-A, o qual pode ser estendido para os outros ensaios em proporções maiores. Nota-se uma maior intensidade dos deslocamentos no centro do vão da estrutura.



**Figura 6:** Comportamento mecânico das placas utilizadas nas análises  
**Fonte:** Autor (2021)

### 3.1 ENSAIOS PFP-A

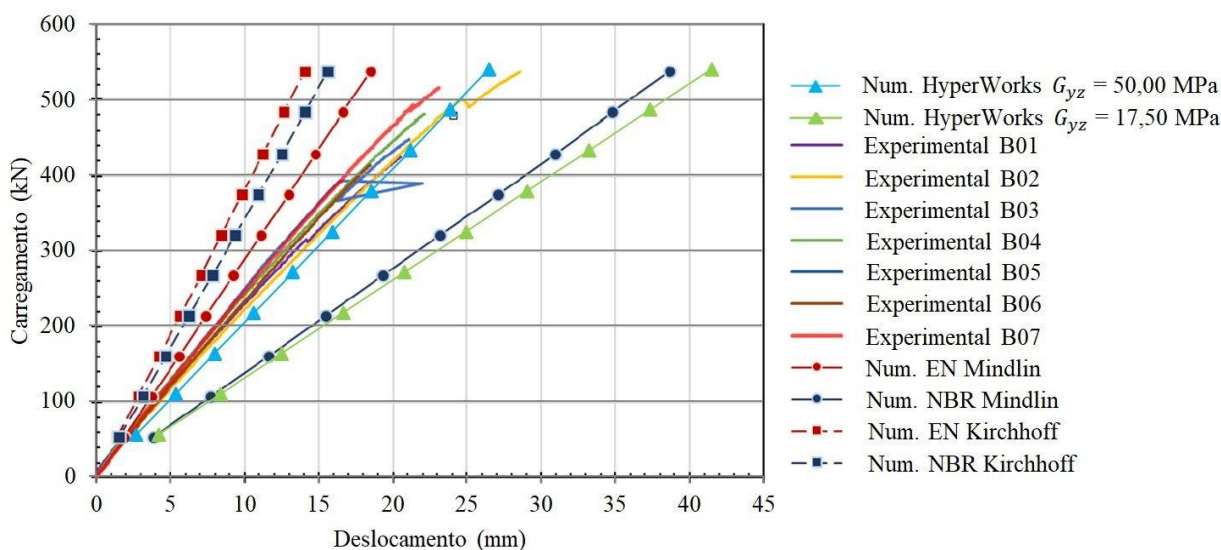
O gráfico a seguir (Gráfico 1) mostra que a configuração mais próxima dos ensaios experimentais, bem como o melhor valor encontrado numericamente por Vilela (2020), foi a que considera maior rigidez para o efeito *rolling shear* ( $G_{yz} = 50$  MPa). A avaliação feita empregando uma rigidez menor de  $G_{yz} = 17,50$  MPa se apresentou bem conservadora, atingindo um resultado bem discrepante com os encontrados experimentalmente e bem próximo da análise numérica feita através da classificação pela NBR 7190 (ABNT, 1997) usando a teoria de Mindlin. Nenhuma das análises realizadas no presente trabalho se aproximaram dos dois resultados numéricos de Vilela (2020) cujos valores se demonstraram inferiores aos resultados experimentais.



**Gráfico 1:** Comparação entre simulações numéricas e resultados experimentais dos ensaios PFP-A

Fonte: Autor (2021)

### 3.2 ENSAIOS PFP-B



**Gráfico 2:** Comparação entre simulações numéricas e resultados experimentais dos ensaios PFP-B

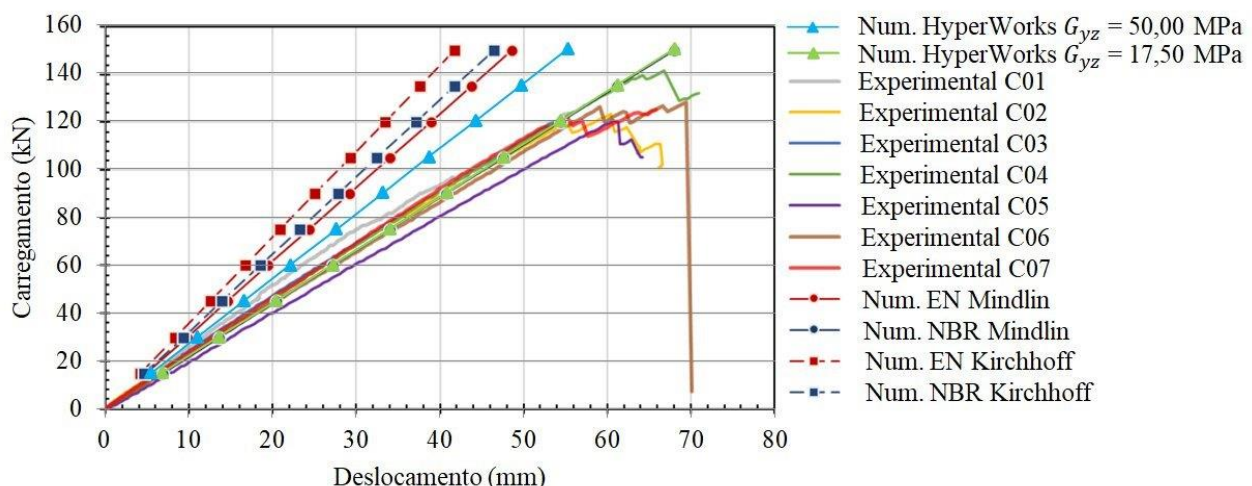
Fonte: Autor (2021)



No gráfico acima (Gráfico 2) se observa uma extrema similaridade dos resultados desta análise com os do ensaio PFP-A, pois novamente ao considerar maior a rigidez devido ao efeito *rolling shear*, o resultado, mesmo sendo um pouco maior que os resultados reais, se apresentou bem mais próximo ao experimental comparado com a reta referente à análise de rigidez menor, cujo resultado se mostrou mais uma vez bem próximo à análise numérica feita através da classificação pela NBR 7190 (ABNT, 1997) usando a teoria de Mindlin e, por conseguinte, bem desproporcional com os ensaios experimentais, a favor da segurança. Novamente nenhum dos dois resultados obtidos no *software HyperWorks* se aproximaram dos resultados numéricos (menores que os experimentais) alcançados por Vilela (2020).

### 3.3 ENSAIOS PFP-C

No terceiro ensaio os resultados obtidos no *software HyperWorks* se apresentaram bem diferentes dos outros dois ensaios como mostra o gráfico a seguir (Gráfico 3). A característica apresentada no gráfico em que a rigidez do *rolling shear* é menor se apresentou próxima dos resultados obtidos experimentalmente e praticamente idêntica ao modelo numérico que utiliza a teoria de Mindlin com propriedades conforme a NBR 7190 (ABNT, 1997). A outra análise realizada no presente trabalho, onde é considerada rigidez maior, demonstrou valores inferiores aos experimentais, da mesma maneira que pode ser observada em três análises numéricas feitas por Vilela (2020).



**Gráfico 3:** Comparação entre simulações numéricas e resultados experimentais dos ensaios PFP-C

Fonte: Autor (2021)

### 3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados encontrados nas duas primeiras análises numéricas mostraram que, possivelmente, o uso de uma rigidez para o efeito *rolling shear* fora do intervalo de 40 MPa a 80 MPa encontrado por CIB-W18 (2004), pode ocasionar valores extrapolados de deslocamentos na estrutura de CLT, sendo que para este estudo, uma rigidez baixa provocou resultados extremamente a favor da segurança. O uso de 50 MPa para este efeito se apresentou de certa forma coerente com os resultados experimentais, contudo isso não significa que este valor seja preciso, dado que quaisquer alterações nas demais propriedades da madeira podem ocasionar resultados diferentes do observado neste trabalho.

Para o ensaio PFP-C, embora a análise com  $G_{yz} = 17,50$  MPa tenha demonstrado muita precisão, não se pode afirmar que neste caso os valores das propriedades modeladas no *software* sejam coerentes com a realidade. Isso porque, quando se tem maiores relações entre vão e espessura a influência do cisalhamento nas camadas é menor, ou seja, as deformações causadas pelo efeito *rolling shear* se tornam menos relevantes (ROSS; GAGNON; KEITH, 2013). Isso significa que para este comprimento provavelmente o valor real da propriedade deste efeito seja bem maior e os valores das outras propriedades devem ser menores do que apresenta a NBR 7190 (ABNT, 1997).

#### 4 CONCLUSÕES

Este trabalho buscou expor características gerais da madeira laminada cruzada, enfatizando o estudo do seu comportamento mecânico de forma numérica perante três tipos de configurações de placa já analisadas experimentalmente. A pesquisa procurou estabelecer correlações entre os resultados reais e numéricos, sendo estes produzidos pelo *software HyperWorks*. A partir deste estudo foi possível concluir:

As três análises produziram resultados semelhantes com os resultados experimentais, sendo que as duas primeiras mostraram que baixos valores de rigidez devido ao efeito *rolling shear* produzem resultados conservadores e que o uso de 50 MPa para esta propriedade se apresenta coerente para ser utilizada em elementos de CLT com estas dimensões. Já na terceira análise, entende-se que há uma incoerência nos resultados obtidos, visto que se esperavam resultados extremamente conservadores, principalmente quando se utilizou menor rigidez para o efeito *rolling shear*. Vale ressaltar que, por se tratar de ensaios experimentais, os resultados obtidos podem sofrer a influência da interação de vários fatores, levando-se a grandes variabilidades de respostas. Pode-se concluir que provavelmente as propriedades utilizadas na análise PFP-C estejam dissonantes com os valores reais da estrutura e que tais valores possivelmente não apresentam comportamento homogêneo. Em função do exposto, sugere-se que para pesquisas futuras sejam usadas propriedades com comportamento mais homogêneos, frisando um estudo aprofundado sobre o efeito *rolling shear* e a sua influência quando se varia a razão vão/espessura, presumindo-se assim, que os resultados obtidos cheguem mais próximos aos resultados experimentais.

#### REFERÊNCIAS

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

AUGUSTIN, Manfred. Wood Based Panels. *In: HANDBOOK 1 – Timber Structures*. Graz: Leonardo da Vinci Pilot Project & TEMTIS, 2008.

CIB-W18. **Edimburgo**: Universitat Karlsruhe, 2004.

DLUBAL SOFTWARE GMBH. **REFEM 5 Program Description**. Tiefenbach: Dlubal Software GmbH, 2013.

GAGNON, S.; BILEK, E. M.; PODESTO, L.; CRESPELL, P. Introduction to cross-laminated timber. *In: CLT Handbook: cross laminated timber*. Pointe-Claire: Erol Karacabeyli & Brad Douglas, 2013.

JUNIOR, C. C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira.** Barueri: Manole Ltda., 2003.

JÚNIOR, C. R. C.; SILVA, W. C. R.; SOARES, P. T. M. L. Uso da madeira na construção civil. **Projectus**, Rio de Janeiro, v. 2, n. 4, p. 79-93, 2017.

OLIVEIRA, Gabriela Lotufo. **Cross Laminated Timber (CLT) no Brasil: processo construtivo e desempenho.** 2018. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

PEREIRA, Marcos Cesar de Moraes. **Metodologia para estudo da caracterização estrutural de painéis de Madeira Laminada Colada Cruzada.** 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

POPOVSKI, M.; GAGNON, S.; MOHAMMAD, M.; CHEN, Z. Structural design of cross-laminated timber elements. *In: Canadian CLT Handbook.* Canadian: FPInnovations, 2019.

ROSS, L. A.; GAGNON, S.; KEITH; E. Structural design of cross-laminated timber elements. *In: CLT Handbook: cross laminated timber.* Pointe-Claire: Erol Karacabeyli & Brad Douglas, 2013.

VILELA, R. **Desempenho estrutural de placas de cross laminated timber submetidas à flexão.** 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2020.