



Estudo do comportamento estrutural de painéis light woodframe com envelopamento por tábuas de madeira serrada

Study of the structural behavior of light woodframe panels enveloped by solid wood boards

Jonathan Gustavo Spolador Ruiz 

Jorge Daniel de Melo Moura 

André Luis Christoforo 

Resumo

No Brasil, construções em madeira do tipo light woodframe possuem envelopamento estrutural do painel dependente do uso de chapas de OSB (Oriented Strand Board), o que implica em uma dificuldade em seu acesso por parte da população. Para ampliar a aplicação do sistema, uma possibilidade consiste em um projeto não atrelado aos monopólios de componentes construtivos. Uma possibilidade é a substituição da camada de envelopamento estrutural dos painéis por tábuas de madeira serrada convencional. Como objetivo esta pesquisa analisa a viabilidade de utilização e o comportamento de painéis de madeira serrada com envelopamento em tábuas de pinus quando solicitados a esforços horizontais, utilizando modelo numérico de simulações em software. O trabalho estuda cinco diferentes tipologias de painéis: um modelo digital de calibração baseado em experimento ensaiado em laboratório; quatro modelos de diferentes configurações, comparando entre si o desempenho estrutural de cada um com dados publicados na literatura. A modelagem digital utilizou dados experimentais já obtidos em trabalhos anteriores. Dos cinco tipos estudados quanto à tensão-deformação, apenas o Modelo 05 não se mostrou viável pela alta concentração de tensão observada nos conectores. Os demais modelos se mostraram adequados aos critérios preconizados por normas e documentos técnicos referenciados.

Palavras-chave: Construções em madeira. Metodologia de projeto. Modelagem digital. Pinus spp. Shear walls. Light woodframe.

Abstract

In Brazil, light woodframe buildings rely on the use of OSB (Oriented Strand Board), what implies a difficulty in its access by part of the population. To increase the applicability of the system one proposition consists in a woodframe project that is not bound by the monopoly over constructive components. A possible way consists in the substitution of the coating of the panels with standard Pinus boards. The objective of this research is therefore to analyze the viability and the behavior of wood panels with Pinus board coating when submitted to horizontal loads, utilizing as method digital simulations. This paper lists five different panel topologies, to calibrate it: one digital model of a previous lab experiment; four panels with different configurations, comparing them between themselves and with the literature in regards of structural performance. The utilized method was of the digital simulation with previous laboratory data calibration. Among the five types studied, only Model 05 exhibited high stress concentrations at connectors, rendering it unviable. The other models meet the criteria of referenced standards and technical documents.

¹Jonathan Gustavo Spolador Ruiz

¹Universidade Estadual de Londrina
Londrina -PR - Brasil

²Jorge Daniel de Melo Moura

²Universidade Estadual de Londrina
Londrina -PR - Brasil

³André Luis Christoforo

³Universidade Federal de São Carlos
São Carlos - SP - Brasil

Recebido em 15/06/23

Aceito em 25/09/23

Keywords: Wood construction. Project methodology. Digital model. Pinus spp. Shear walls. Light woodframe.

Introdução

As construções em light woodframe (LWF) no Brasil detém potencial para ser a tecnologia do futuro, mais e mais empresas têm se dedicado à implantação do sistema no Brasil. Segundo Sotsek e Santos (2018), trata-se de uma inovação devida à flexibilidade operacional, agilidade produtiva, racionalização de material, custos competitivos e níveis eficientes de limpeza e tempo de montagem. De maneira geral, o sistema utiliza painéis constituídos de uma ossatura em madeira sólida que é coberta e enrijecida por dois planos de chapa de madeira reconstituída OSB (Oriented Strand Board).

Segundo Stark, Cai e Carll (2010) o OSB é uma chapa estrutural composta por lascas orientadas em camadas cruzadas composto por finas partículas de madeira coladas por uma resina com alta resistência à umidade. De Araújo *et al.* (2020) elenca que o uso de madeira maciça em construções é limitado pelo comprimento da peça e seção transversal e nos países desenvolvidos, para vencer grandes vãos e estruturas altas, utilizam-se os produtos engenheirados de madeira, obtidos pela colagem de resinas estruturais para obter componentes robustos.

Este material, no Brasil, é fabricado por apenas uma empresa, o que pode trazer uma dependência comercial e dificuldade ao acesso do sistema woodframe como um todo. Por outro lado, um envelopamento com um material de maior disponibilidade poderia ampliar a abrangência de utilização do sistema, e isto, em todo o território nacional.

Estudos realizados por Gosselin *et al.* (2015) demonstram que o uso de madeiras em construções não-residenciais também cresceu. Por exemplo, na Província do Quebec, o uso de madeira cresceu de 18% para 22% já entre 2006 e 2009.

Gustavsson, Pingoud e Sathre (2006) realizaram um comparativo na quantidade de dióxido de carbono emitido por construções em madeira e construções em concreto, em seu estudo, realizado em dois edifícios, na Suécia e Finlândia. Os resultados demonstraram que a produção de materiais para construção em madeira requer menos energia e emite menos CO_2 na atmosfera.

Petersen e Solberg (2005) discorrem sobre como quantificar a economia de energia em construções, segundo os autores, um procedimento válido para análise de uso de energia é o que utiliza uma área funcional de 1 m² de área por pavimento de edificação para quantificar a matéria prima extraída, manufatura e desperdício, além de calor utilizado para incineração, eletricidade e eficiência energética para produção do material.

Werner *et al.* (2005) realizou estudos na Suíça sobre emissões de carbono e constatou três fatores elementares em uma estratégia para mitigar a mudança climática com foco em construções:

- (a) aumento do uso de madeira em construções;
- (b) uso térmico eficiente e eficaz de resíduos de madeira para substituir os combustíveis fósseis; e
- (c) evitar o aumento de emissões de carbono que surgem em regiões próximas à florestas durante colheitas através do aproveitamento dos resíduos da colheita para substituir os combustíveis fósseis.

Segundo Araújo *et al.* (2020) o setor de construções em madeira possui relativamente poucas empresas consolidadas em operação no Brasil, não mostrando uma representação notável e presente em todos estados brasileiros se comparado ao dos edifícios de alvenaria, que atualmente apresentam maior representatividade de mercado. Segundo o autor, isso se deve principalmente à falta de técnicas para construção residencial em madeira, visto que um mesmo produtor imobiliário poderia utilizar madeira de maneiras diferentes, independentemente do conceito arquitetônico ou sua origem cronológica.

Sobre a escolha do material, Prazeres, Alverti e Arakawa (2022) apontam que tanto grandes empresas de reflorestamento quanto pequenos proprietários rurais tendem a escolher a madeira da espécie *Pinus* por ser caracterizado por alta produtividade, capacidade de adaptação e baixa exigência de recursos do solo, possibilitando a aplicação na construção em *woodframe*, que se torna sustentável uma vez que seus resíduos gerados nas plantações florestais comerciais trazem benefícios ambientais importantes, como a proteção do solo, o aumento da biomassa microbiana e a ciclagem de nutrientes.

No mercado de construções o fator tempo de execução é fundamental para escolha de projeto. Araújo *et al.* (2022) revela em seus estudos que, considerando diferentes técnicas construtivas em madeira, todas aquelas em madeira utilizadas no Brasil são mais rapidamente executáveis do que as de alvenaria.

Qu *et al.* (2012) utilizou de dados demográficos, questionários sobre materiais de construção, avaliação do atual desenvolvimento de casas de madeira em relação às fontes de matéria-prima, regulamentos relacionados, pontos fortes, restrições, disseminação de informações, opiniões e conhecimentos sobre construções de

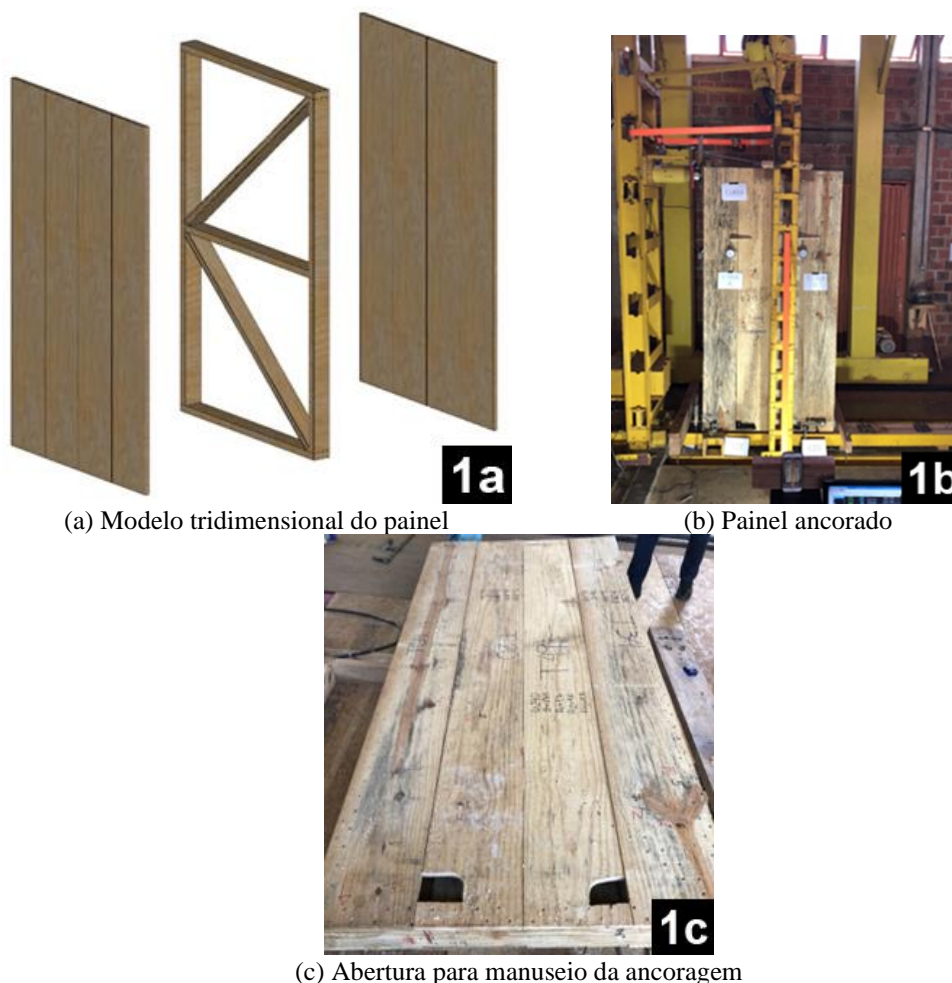
madeira para elaborar um estudo sobre o desenvolvimento de construções em *light woodframe* na China. Neste estudo foi possível perceber que as construções em madeira estão em um baixo nível de desenvolvimento na China principalmente pela baixa disseminação de informação e conhecimento sobre *light woodframe*, sendo que se faz necessário promover uma melhor educação sobre suas vantagens e benefícios.

Sob esta ótica, este trabalho analisa uma variação de método construtivo para construções em *light woodframe*, alterando seu componente de vedação sem prejudicar o desempenho estrutural do sistema. Como base para elaboração dos modelos de projeto e guia para aplicação dos carregamentos utilizou-se do *Wood Frame Construction Manual* (AWC, 2018) nesta pesquisa, o WFCM está de acordo com o *American Wood Council*, ou Conselho Americano da Madeira, e é concebido para edificações de dois pavimentos projetadas para resistirem condições de neve, sismos e alto carregamento de ventos.

Há documentos técnicos nacionais na área sobre *woodframe*, como o DATec nº 020-D (Brasil, 2020a) e a diretriz SINAT nº 005 (Brasil, 2020b), elaborados com base em sistemas *light woodframe*, que fornecem requisitos e critérios de desempenho estrutural de segurança contra incêndio, durabilidade, manutenção dos elementos e métodos de avaliação do produto. Quanto a normas internacionais, a E564-06 (ASTM, 2018) descreve métodos de ensaio para avaliar a resistência das peças, a TR 12910 (ISO, 2010) faz um comparativo entre diversas normas e documentos técnicos e o IRC (2018) funciona como guia para construtores e projetistas.

Este trabalho continua as pesquisas de Paixão (2018) e Bortoleto (2019), que analisaram o comportamento estrutural de painéis de tábuas de pinus com vedações em ensaios de laboratório. Bortoleto (2019) revisou o estudo de Paixão (2018), identificando um escorregamento excessivo entre as tábuas do envelope como uma limitação importante. Nossa proposta para melhorar o painel é substituir as diagonais por montantes adicionais, aumentando a rigidez e resistência por meio de mais conectores e uma maior área de fixação. A Figura 1 mostra o trabalho de Paixão (2018) com fotos do ensaio e concepção do projeto.

Figura 1 - Painel ensaiado por Paixão (2018)



Buscando ampliar o trabalho de Paixão (2018), assim como adotar uma nova trajetória de pesquisa, este trabalho visa principalmente testar uma nova configuração de sistema construtivo em *light woodframe* que não utilize chapas OSB.

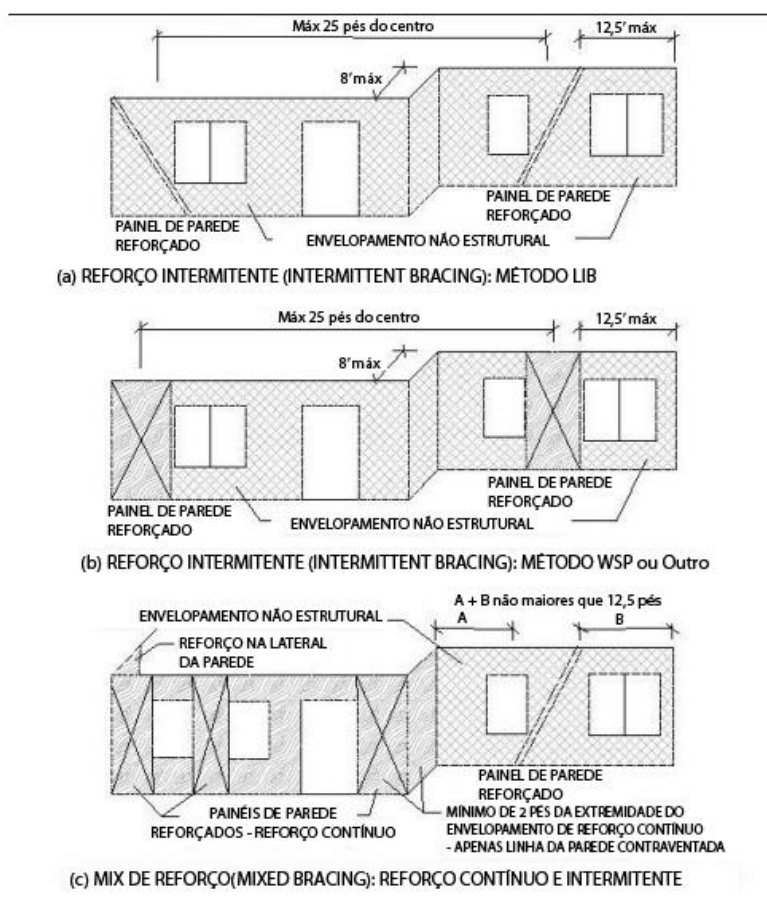
Deste modo, para contribuir com a tecnologia de construções em madeira, aumentando sua gama de possibilidades, ao apresentar a vedação em tábua de pinus como uma alternativa construtiva, o painel a ser estudado propõe fornecer a resistência ao cisalhamento tomando por base documentos técnicos e normas existentes, como a NBR 7190 (ABNT, 1997) de projetos de estruturas de madeira e suas atualizações, a NBR 7190-5 (ABNT, 2022a) que trata da resistência e da rigidez de ligações feitas com conectores mecânicos, a NBR 7190-1 (ABNT, 2022b) que fornece critérios de dimensionamento, e a EN 26891 (BSI, 1991) que fornece condições de uso de construções em madeira.

Referencial teórico

Os painéis de *woodframe* podem apresentar tanto caráter estrutural quanto não estrutural, e um conceito importante relativo a este aspecto é o do “*intermittent bracing*” e “*continuous sheathing*”. De acordo com o IRC (2018), no *intermittent bracing*, paredes não estruturais são dotadas de reforços estruturais ao longo de seu comprimento e no *continuous sheathing* toda a parede é estrutural, conforme Figura 2.

Para serem consideradas estruturais, as paredes do *continuous sheathing*, além de apresentarem capacidade de carga em pelo menos um de seus dois revestimentos (externos ou internos), devem apresentar um limite de espaçamento em suas aberturas. O limite pode variar, mas, de modo geral, de acordo com o IRC (2018) as paredes ao lado das aberturas devem ter dimensão mínima de 24 polegadas (aproximadamente 60 cm), a não ser em casos de “*portal frame*”, que são aberturas maiores para garagens, por exemplo, em que podem chegar a 16 polegadas (aproximadamente 40 cm) por apresentarem reforços estruturais.

Figura 2 - Exemplo de reforço intermitente



Fonte: IRC (2018).

A Figura 2 exemplifica tipos de reforço intermitente em construções em woodframe, em (a) um reforço em diagonal chamado de método LIB (*Let-in Bracing*), em (b) um reforço em cruz chamado de método WSP (*Wood Structural Panels*), e em (c) uma combinação de (a) e (b) chamada de *mixed bracing*.

Kasal *et al.* (2004) comparou diferentes métodos de distribuição força lateral com experimentos em escala real em *light woodframes*, dentre os métodos utilizados em seu estudo considerando cargas de vento, o mais preciso se mostrou o que utiliza placas de carregamento para aplicação de força, o mesmo método utilizado nesta pesquisa.

Tanto o *software SolidWorks* (Hirschtick, 2020) quanto o *Ansys* (Swanson, 2021) são geralmente utilizados para se projetar estruturas metálicas, como peças e componentes, porém também se mostram adequados para o cálculo de estruturas de madeira. Para tanto é necessário criar-se na simulação um material cujas propriedades são as mesmas da madeira a ser empregada e configurar o desenho do elemento para utilização desse material.

A dificuldade de simulação de peças em madeira nesses *softwares* se dá no fato da madeira ser um material anisotrópico, ou seja, se comporta de maneira heterogênea e não proporcional nos 3 planos de simetria (radial, tangencial e longitudinal) devido à sua anatomia. Isto fez com que os dados coletados em laboratório para Módulo de Elasticidade Dinâmico e os dados de Paixão (2018), que foram os de um material isotrópico, não resultassem em análises iniciais muito precisas.

Foi possível, porém, fazer uma melhor aproximação definindo a madeira como material ortotrópico, ou seja, àquele que “[...] não apresenta simetria em três direções, porém suas propriedades não variam numa mesma direção, variando apenas de uma direção para outra [...]” (Melo, 2002, p. 16).

Segundo o autor:

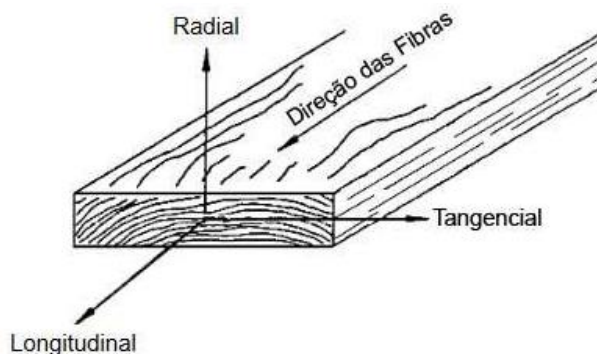
Para efeito de caracterização física, pode-se idealizar a madeira como um material ortotrópico, com três direções principais, perpendiculares entre si, coincidentes com a direção longitudinal (ao longo do comprimento da árvore), tangencial (tangente aos anéis de crescimento) e radial (perpendicular aos anéis em direção ao centro da árvore) [...] (Melo, 2002, p. 16).

Para madeiras, como o *Pinus*, os valores de Módulo de Elasticidade e os coeficientes de *Poisson* podem ser obtidos em cada uma das três direções ortotrópicas do plano cartesiano, a direção das fibras (ou longitudinal), a direção tangencial e a radial. Essas direções são padronizadas conforme a Figura 3.

Esse tema de definição de propriedades ortotrópicas na madeira foi estudado por Pizzini (2017), que obteve os valores de constantes elásticas da Tabela 1. Nesta tabela “*E*” se refere ao módulo de elasticidade, “*v*” ao coeficiente de *Poisson*, “*G*” o módulo de elasticidade transversal, e L, R e T são as direções longitudinal, radial e transversal.

Tanto o *software SolidWorks* (Hirschtick, 2020) quanto o *Ansys* (Swanson, 2021) se baseiam no método dos elementos finitos, conforme explana Tavares (2014, p. 3): “O método FEM (*Finite Element Method*) substitui um problema complexo por um conjunto de problemas simples. Divide o modelo em muitas peças pequenas (por exemplo, tetraedros) de formas simples, chamados elementos [...]”. Os resultados desta análise são fornecidos em valores de tensão em MPa e deslocamento em mm.

Figura 3 - Direções ortotrópicas da madeira



Fonte: Green, Winandy e Kretschmann (1999).

Tabela 1 - Valores médios para as constantes elásticas da madeira (E_i e G_{ij} em MPa)

Espécie	E_L	E_R	E_T	G_{LT}	G_{LR}	G_{RT}
Guapuruvu	3507,5	519,5	287,2	420,8	377,8	72,9
Ipê	18043,9	1748,1	960,5	831,2	620,2	356,3
Angico	8558,5	759	462,1	727,1	542,4	248,6
Pinus	5471,0	1049,4	737,6	307,0	542,6	116,3
Espécie	ν_{RT}	ν_{RL}	ν_{TR}	ν_{TL}	ν_{LR}	ν_{LT}
Guapuruvu	0,6802	0,0662	0,3458	0,0448	0,4818	0,5019
Ipê	0,6136	0,0371	0,3532	0,0270	0,4345	0,4790
Angico	0,8068	0,0484	0,4975	0,0239	0,5089	0,4549
Pinus	0,6393	0,0858	0,4509	0,0477	0,3701	0,3346

Fonte: Pizzini (2017).

Na tensão, segundo Tavares (2014), um escalar positivo avalia a falha ou não da estrutura em determinado ponto do corpo e pode ser definida em termos das tensões normais e de corte pela equação da tensão de *Von-Mises*, Equação 1.

$$\sigma_{vonMises} = \sqrt{\frac{(\sigma_{11}-\sigma_{22})^2+(\sigma_{22}-\sigma_{33})^2+(\sigma_{33}-\sigma_{11})^2+6(\sigma_{12}^2+\sigma_{23}^2+\sigma_{31}^2)}{2}} \quad \text{Eq. 1}$$

Em que:

- 1 é a direção x;
- 2 é a direção y;
- 3 é a direção z; e

σ_{ij} se refere ao tensor tensão de *Cauchy*, ou seja, às tensões em cada direção dos planos de um sólido elementar.

O critério de *Von-Mises* é desenvolvido para materiais dúcteis, como é o caso do aço, em que a falha é governada pelo cisalhamento, porém também pode ser aplicado para avaliação de efeitos cisalhantes em outros materiais.

Baseado nesse conceito, é possível simular e entender o comportamento do elemento quando submetido a cargas estáticas, proporcionando a possibilidade de fazer alterações no projeto de acordo com os resultados obtidos para o design antes de partir para a etapa de produção do elemento de estudo.

Objetivo

O objeto de estudo deste projeto se trata de painéis que utilizem tábuas de madeira *Pinus spp.* como vedação. O objetivo geral desta pesquisa é a análise do comportamento estrutural ao cisalhamento dos painéis de madeira com envelopamento em tábuas de pinus quando submetidos a esforços laterais assim como encontrar a melhor combinação dentre as soluções estruturais propostas.

Método

Esta pesquisa tem como metodologia:

- (d) realizar modelagens e simulações computacionais de painéis estruturais com base na validação de dados obtidos em outros estudos; e
- (e) estudar a influência dos novos arranjos geométricos no desempenho estrutural do painel.

Conforme mencionado, a espécie considerada na pesquisa foi o *Pinus spp.*, a mesma utilizada no trabalho de Paixão (2018). Esse material, que compõe as peças serradas do quadro e do envelopamento, foi estocado e acondicionado nas instalações do laboratório de estruturas da Universidade Estadual de Londrina visando obter dados que não constam no trabalho de Paixão (2018), tais como a densidade da madeira utilizada e o módulo de elasticidade das peças.

Foi realizada a separação das peças de madeira por grupos a partir da classificação visual e mecânica. Para cada peça foram medidas as dimensões de comprimento, largura e altura em três pontos, início, meio e fim. Posteriormente as peças foram pesadas, aferidas em teor de umidade com auxílio do aparelho *Digisystem*

DL2000 e tiveram os Módulos de Elasticidade (MOE) obtidos pelo sistema de ultrassom com medições da velocidade das ondas aferidas pelo aparelho de Ultrassom *Agricef USLab*.

Com o intuito de avaliar o comportamento estrutural dos painéis em madeira, a modelagem numérica se mostrou uma ferramenta altamente eficiente. A modelagem é uma estratégia de aproximação do elemento estudado, que permite diminuir a vasta gama de possibilidades de ensaio experimental, focar no objeto de estudo e, desde que embasado em ensaios prévios e respectivos dados, obter também resultados numéricos sem a necessidade de novos ensaios. Nesta pesquisa, são utilizados os *softwares SolidWorks* (Hirschtick, 2020) para concepção de projeto e análises prévias e *Ansys* (Swanson, 2021) para as análises finais e refinadas.

Foi alterado o componente de vedação do sistema construtivo *light woodframe* tradicional em OSB e isto implicou em analisar, via modelagem digital, também os demais componentes do painel. Assim sendo, é necessário também estudar as configurações dos componentes internos (montantes e travessas) que influenciam na resistência estrutural do conjunto.

A fim de se analisar o comportamento dos painéis serrados de madeira quando submetidos a esforços horizontais, foram utilizadas nesta pesquisa simulações numéricas baseadas em dados obtidos em laboratório e em literatura, como os de Paixão (2018) e Pizzini (2017).

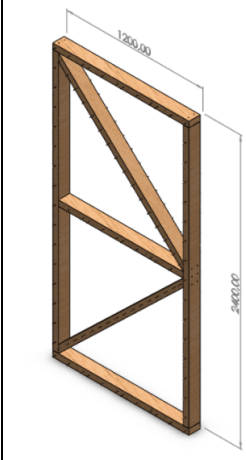
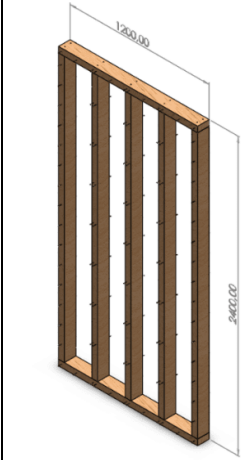
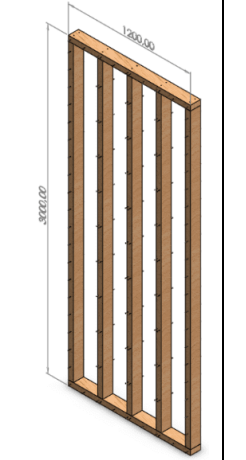
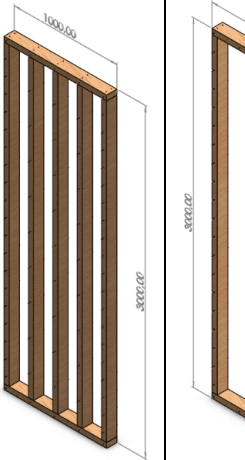
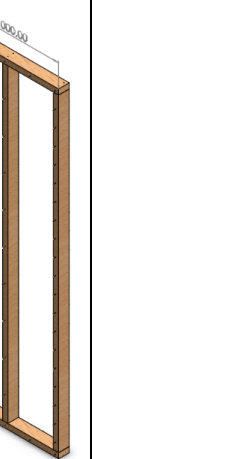
Para as simulações, foram propostos cinco modelos diferentes de painéis compostos por um quadro montado por peças de madeira sólida e envelopamento realizado por tábuas de madeira serrada, conforme consta no Quadro 1. Os painéis são submetidos a um carregamento virtual pontual na extremidade superior (paralelo ao plano do painel), a fim de se avaliar a resistência do conjunto (painel como um todo), e as diferenças de resistência entre os modelos propostos.

Foram adotadas dimensões de 1,20 m x 2,40 m para os Modelos 1 e 2 por serem medidas globais de uso comercial no âmbito dos painéis OSB. Já para os Modelos 3, 4 e 5, adotou-se uma altura maior dos frames atendendo à necessidade de uma altura entre pavimentos (pé direito) de 3,00 m, que permite rebaixamento do teto, uso do forro, e eventual passagem de duto de instalação predial. Nesses três modelos não foi necessário adequar o frame às medidas dos painéis OSB.

O Modelo 1 tem as mesmas características e dimensões que aquele sugerido por Paixão (2018). O Modelo 02 consiste na substituição de diagonais do Modelo Inicial tal qual concebido pela autora, por mais montantes: o Modelo 03 consiste em uma versão do Modelo 02, porém com 3,00 m de altura contra 2,40 m do original. O Modelo 04 apresenta encaixes a meia seção entre tábuas de envelopamento e o Modelo 05 é a versão com menor número de montantes do Modelo 04.

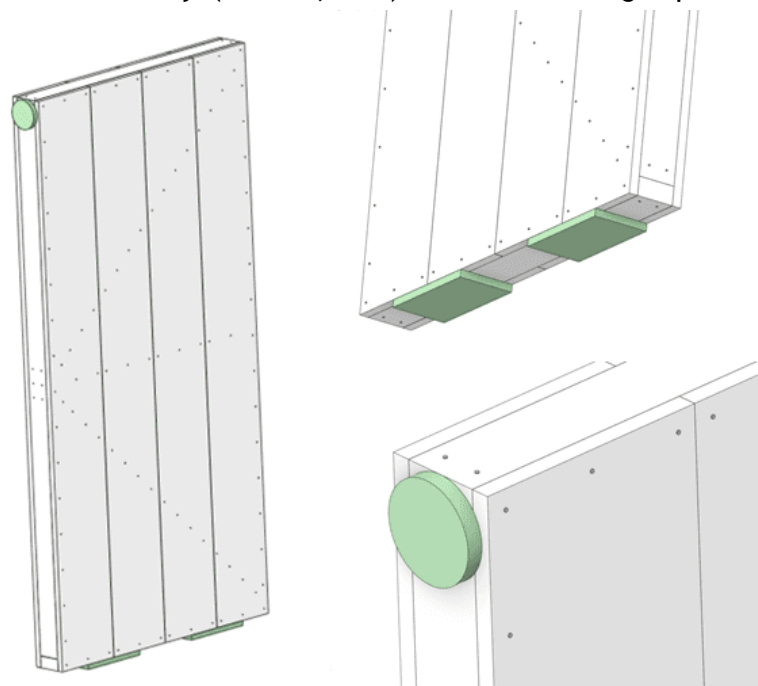
Os *softwares SolidWorks* (Hirschtick, 2020) e *Ansys* (Swanson, 2021) foram utilizados neste processo, possibilitando modelar digitalmente as peças dos quadros, as tábuas do fechamento, os elementos de ligação (pregos), as ligações entre peças e os engastes na base, assim como a aplicação de carregamento. Na Figura 4 é demonstrado como aparenta o modelo criado nos *softwares* com ênfase nas placas metálicas (representadas pela cor verde), onde se dão as forças de ação e reação no modelo.

Quadro 1 - Ossatura dos Modelos de Projeto 01 a 05 no software SolidWorks

Modelo 1 Paixão (2018)	Modelo 2 RUIZ	Modelo 3 RUIZ	Modelo 4 RUIZ	Modelo 5 RUIZ
				

Fonte: Hirschtick (2020).

Figura 4 - Modelo 01 no software Ansys (Swanson, 2021) com cilindro de carga e placas de apoio



Os modelos considerados na simulação numérica foram avaliados segundo as mesmas condições de carregamento pontual na extremidade superior, simulando o ensaio realizado por Paixão (2018), estando a base do painel engastada ao solo por outras placas.

Foi necessário também calibrar o modelo com dados pré-existentes. Esta calibração se baseou em medições realizadas em laboratório (para valores de densidade e peso das peças) e em duas pesquisas prévias: o experimento realizado por Paixão (2018) e de Pizzini (2017) da Tabela 1, que foram inseridas no *software* visando obter os resultados próximos aos empíricos e validando a eficácia da simulação.

No ensaio realizado por Paixão (2018), os painéis alcançaram uma média de carregamento máximo de 22493 N (Tabela 2). No modelo replicado para calibração, portanto, simulou-se um carregamento pontual de 22500 N. Este foi aplicado sobre uma placa metálica circular de 125 mm de diâmetro (Figura 3), que simula o atuador da prensa de ensaio do laboratório. Assim, foi possível ajustar os valores no *software* até se obterem resultados semelhantes aos do ensaio. A Tabela 2 mostra a relação dos esforços nos painéis elaborados por Paixão (2018).

Variáveis de projeto

Para os dados relativos às propriedades dos materiais, os valores de Pizzini (2017), Tabela 1, para madeiras ortotrópicas tiveram de ser adaptados para cada uma das peças, uma vez que ora a maior dimensão está no eixo X, ora no eixo Y ou Z. Desse modo, foram inseridos no banco de dados do programa *Ansys* (Swanson, 2021) diferentes materiais para as tábuas, montantes, travessas e pregos, conforme Quadros 2, 3 e 4.

Foram consideradas as normas NBR 7190-5 (ABNT, 2022a) e NBR 7190 (1997) quanto as ligações entre prego e madeira e optou-se por realizar os cálculos de através da metodologia da NBR 7190 (1997) a fim de verificar se o estado limite último na ligação se daria pelo escoamento dos pregos ou por fendilhamento das peças de madeira.

Os Modelos 04 e 05 sugerem encaixes a meia seção entre tábuas a fim de diminuir o número de montantes verticais presentes no interior dos painéis. Como as tábuas de pinus convencionais possuem espessura comercial variando entre 20 e 25 mm, decidiu-se tomar partido a favor da segurança e adotar como padrão a menor dimensão comercial (20 mm). Este esquema de montagem é ilustrado na Figura 5.

Para o cálculo segundo a norma, o conhecimento de algumas variáveis foi necessário. A NBR 7190 (1997) considera os pregos estruturais como tendo uma tensão de escoamento $f_{yk} = 600$ MPa. A resistência ao embutimento da peça (f_{ed}) foi obtida segundo um estudo empírico, o trabalho de Araújo *et al.* (2019), que

observou em laboratório 6 valores de resistência, variando entre 30,83 e 40,35 MPa, sugerindo a adoção de um valor médio de 35,00 MPa de resistência ao embutimento.

O procedimento de cálculo da NBR 7190 (ABNT, 1997) preconiza que se o coeficiente $\beta > \beta_{lim}$, o conector metálico atingirá a ruptura antes de a madeira ceder, segundo a expressão da Equação 2:

$$\beta = \frac{t}{d} \quad \text{Eq. 2}$$

Sendo “t” a menor espessura de ligação entre peças e “d” o diâmetro dos pregos de ligação.

Assim, é possível analisar dois casos, o primeiro utilizando o prego de 2,5 mm e o segundo com um prego de maior diâmetro, de 2,7 mm. Usando 10,0 mm de espessura de tábua na Equação 2 têm-se duas equações, a Equação 3 que dita o coeficiente β para o prego de 2,5 mm e a Equação 4 que dita o coeficiente β para o prego de 2,7 mm (Equações 3 e 4):

$$\beta_{2mm} = \frac{10}{2,5} = 4 \quad \text{Eq. 3}$$

$$\beta_{3mm} = \frac{10}{2,7} = 3,7 \quad \text{Eq. 4}$$

Segundo a NBR 7190 (ABNT, 1997) a Equação 5 determina:

$$\beta_{lim} = 1,25 \sqrt{\frac{f_{yd}}{f_{ed}}} \quad \text{Eq. 5}$$

Para a ligação em questão se obtém (Equação 6):

$$\beta_{lim} = 1,25 \sqrt{\frac{600}{35}} = 5,17 \quad \text{Eq. 6}$$

Tabela 2 - Máximo carregamento e rigidez aparente dos painéis de Paixão (2018)

Painél	Carregamento Máximo	Carga máxima por metro	40% do carregamento máximo	Deslocamento para 0,4*Fmáx	Rigidez Aparente
	Pmáx (N)	Su (N/m)	Fesc (N)	Δesc (mm)	G' (mm)
S2	23450	19542	9384	40,3	466
S3	23250	19375	9348	44,4	421
S4	24600	20500	9839	40,3	489
S5	22090	18408	8833	39,2	451
S6	24660	20550	9837	39,1	503
S7	18730	15608	7498	45,9	327
S8	20670	17225	8271	34,9	474
Média	22493	18744	9001	40,6	447
Desvio Padrão	2171	1809	865	4,0	59
COV (%)	9,65	9,65	9,65	8,95	13,26

Quadro 2 - Lista de Materiais utilizados no software Ansys (Swanson, 2021) - Montantes

Pinus Ortotrópico dos Montantes	
Modulo de Young na direção X	1049,4 MPa
Modulo de Young na direção Y	5471 MPa
Modulo de Young na direção Z	737,6 MPa
Coeficiente de Poisson XY	0,0858
Coeficiente de Poisson YZ	0,3346
Coeficiente de Poisson XZ	0,6393
Módulo de Cisalhamento XY	1,843. 10 ⁻³ MPa
Módulo de Cisalhamento YZ	307 MPa
Módulo de Cisalhamento XZ	116,3 MPa
Densidade	530 kg. m ⁻³

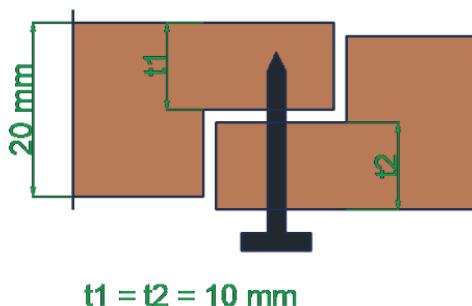
Quadro 3 - Lista de Materiais utilizados no software Ansys (Swanson, 2021) - Tábua

Pinus Ortotrópico das Tábuas	
Modulo de Young na direção X	737,6 MPa
Modulo de Young na direção Y	5471 MPa
Modulo de Young na direção Z	1049,4 MPa
Coefficiente de Poisson XY	0,0477
Coefficiente de Poisson YZ	0,3701
Coefficiente de Poisson XZ	0,4509
Módulo de Cisalhamento XY	$3,257 \cdot 10^{-3} MPa$
Módulo de Cisalhamento YZ	542 MPa
Módulo de Cisalhamento XZ	$8,598 \cdot 10^{-3} MPa$
Densidade	$530 kg \cdot m^{-3}$

Quadro 4 - Lista de Materiais utilizados no software Ansys (Swanson, 2021) - Travessas

Pinus Ortotrópico das Travessas	
Modulo de Young na direção X	5471 MPa
Modulo de Young na direção Y	1049,4 MPa
Modulo de Young na direção Z	737,6 MPa
Coefficiente de Poisson XY	0,3701
Coefficiente de Poisson YZ	0,6393
Coefficiente de Poisson XZ	0,3346
Módulo de Cisalhamento XY	542 MPa
Módulo de Cisalhamento YZ	116,3 MPa
Módulo de Cisalhamento XZ	307 MPa
Densidade	$530 kg \cdot m^{-3}$

Figura 5 - Esquema de ligações entre tábuas de fechamento nos Modelos 04 e 05



Em ambos os casos $\beta < \beta_{lim}$, portanto, a ruptura ocorrerá na madeira, com fendilhamento, e o aço do prego não escoará, mesmo com 2,5 mm. Para este caso, a norma brasileira apresenta a resistência ao cisalhamento segundo a Equação 7:

$$R_{vd,1} = 0,4 \frac{t^2}{\beta} \cdot f_{ed} \quad \text{Eq. 7}$$

Em que " R_{vd} " é a resistência ao cisalhamento para a espessura considerada, " t " a menor espessura de ligação entre peças e " d " o diâmetro dos pregos de ligação.

Realizando os cálculos para ambos os diâmetros de pregos se obtém, para o prego de 2,5 mm uma resistência máxima de 350 MPa por prego e para o prego de 2,7 mm uma resistência de 378 MPa por prego.

Assim sendo, conforme preconiza a NBR 7190 (ABNT, 1997), as ligações estarão fora do limite de segurança quando os valores de tensão se aproximarem de 378 MPa em pregos 2,7 mm ou 350 MPa em pregos 2,5 mm. Deste modo, para não atingirem o limite de escoamento, os esforços de simulação não devem ultrapassar estes valores para os carregamentos aplicados.

Resultados e discussões

Os esforços e deslocamentos apresentados na sequência foram elaborados no *software SolidWorks* (Hirschtick, 2020) e posteriormente exportados em formato *parasolid* para o *software Ansys* (Swanson, 2021), no qual foi possível editar suas propriedades.

O Modelo 01 é o ponto de partida, pois, permitiu calibrar o modelo computacional com a proposta de Paixão (2018) a partir dos valores de tensão e deslocamento observados experimentalmente. Para tanto, na modelagem considerou-se a base engastada em duas placas metálicas de 30 cm x 15 cm e a carga pontual aplicada sobre uma superfície metálica circular de 125 mm diâmetro que simula o atuador hidráulico do laboratório (Figura 4). A malha da simulação foi refinada de modo a ficar com subdivisões menores na região das ligações. As ligações entre peças se dão apenas pelos pregos de 2,5 mm x 60 mm (entre tábuas) e 2,7 mm x 75 mm (entre peças), em que se considerou uma condição de perfeita união entre a superfície dos pregos e os furos das peças de madeira.

O Modelo Inicial (Figura 6) simula as condições de laboratório da resistência do painel quando solicitado à carga pontual de 22500 N em sua extremidade superior (Figura 7). Neste caso, obteve-se um deslocamento máximo de 83,0 mm, que se aproxima dos valores médios observados experimentalmente por Paixão (2018), que obteve para uma média de força de 22490 N, 90 mm de deslocamento médio.

O trabalho de Paixão (2018) analisa os dados com os painéis submetidos a 40% do carregamento máximo, uma vez que este valor representa as condições de serviço, conforme preconizado pela norma EN 26891 (BS, 1991). Seguindo a mesma lógica, para todos os painéis desta pesquisa simulados no *Ansys* (Swanson, 2021) aplicou-se um carregamento de 9000 N, o equivalente à 40% dos 22500 N.

Na Figura 8 pode-se observar os deslocamentos e esforços cortantes no Modelo Inicial de calibração para um esforço de 9000 N, valores máximos de 35,2 mm e 281,5 MPa respectivamente.

A simulação do painel concebido por Paixão (2018) com 9000 N indicou 281,5 MPa de máximos esforços cortantes nas ligações pregadas e um deslocamento máximo de 35,2 mm, ao passo que a média observada em seu experimento foi de 40,6 mm de deslocamento, conforme Tabela 2. Visto que o programa simula as peças de madeira em condições ideais (sem empenamento ou defeitos), condições que raramente são alcançadas experimentalmente, os valores se mostraram satisfatórios e a validação se mostrou coerente.

Para o Modelo 02, as diagonais de travamento foram removidas e aumentou-se o número de montantes. Este modelo preservou a rigidez do Modelo Inicial, como se observa nas simulações com 9000 N. As características do modelo estão mostradas na Figura 9 e 10.

Figura 6 - Modelo Inicial no SolidWorks (Hirschtick, 2020) e malhas utilizadas no Ansys (Swanson, 2021)

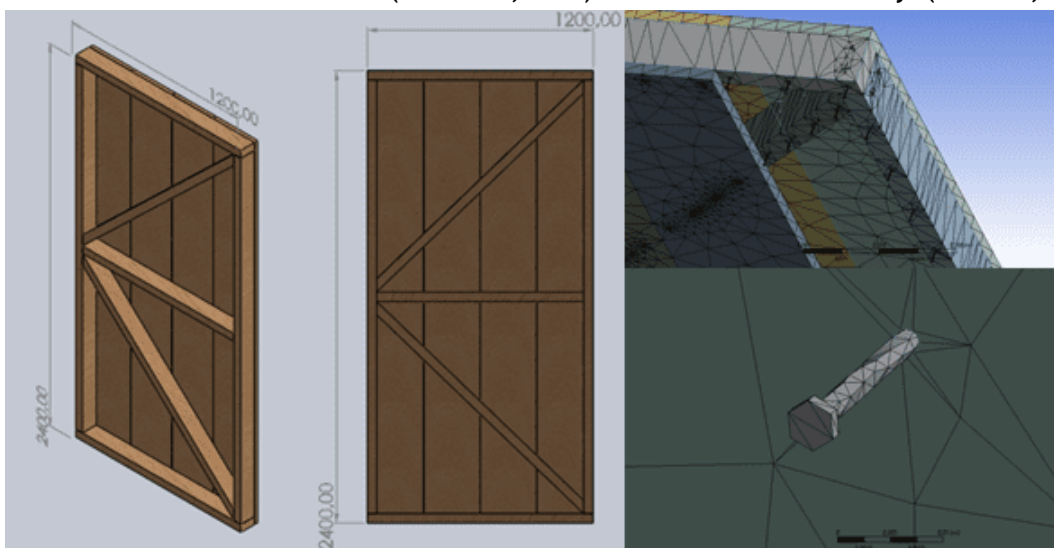


Figura 7 - Simulação do Modelo Inicial para calibração de software (22500N)

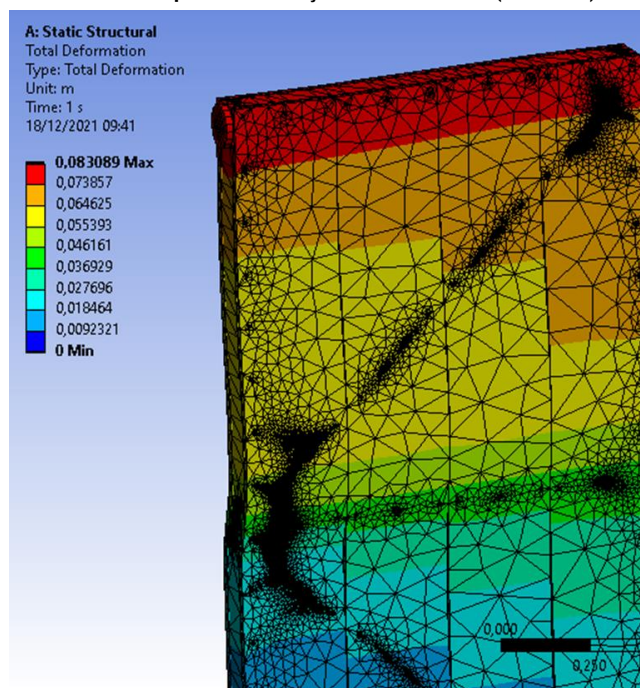


Figura 8 - Calibração de software, deslocamento e esforços cortantes para 9000 N

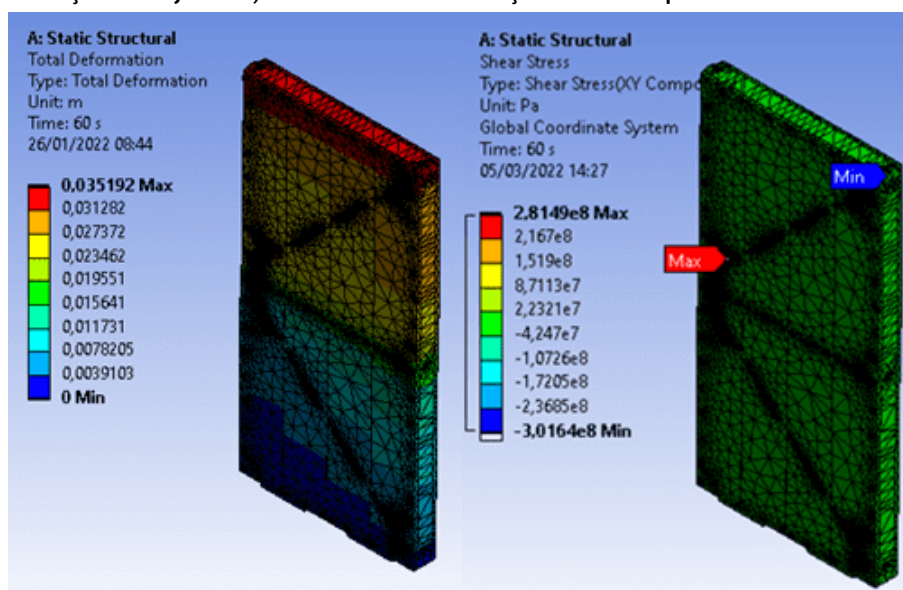


Figura 9 - Design do Modelo 02 com fechamento e simulação de deslocamento

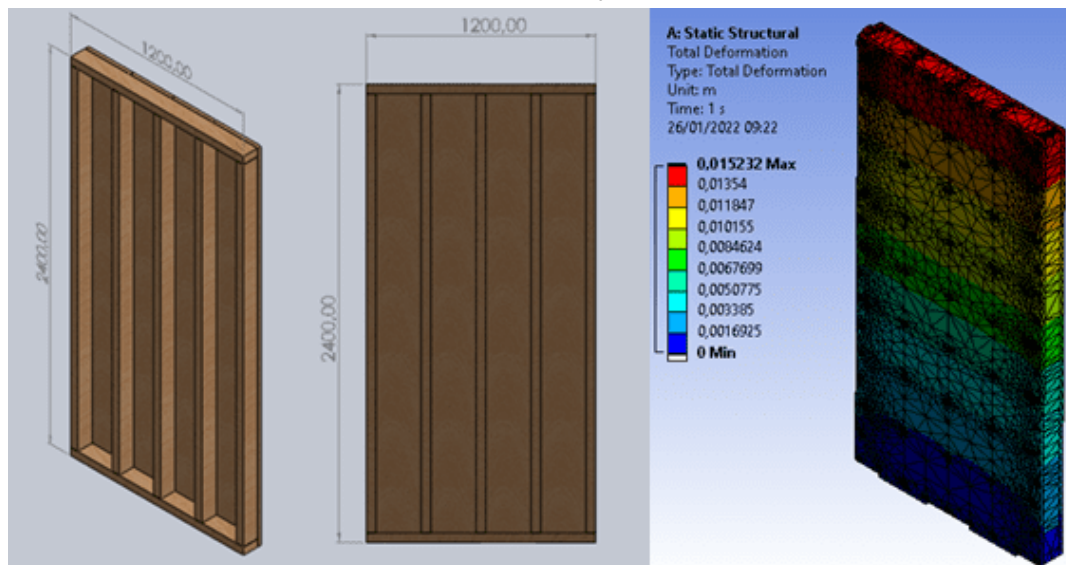
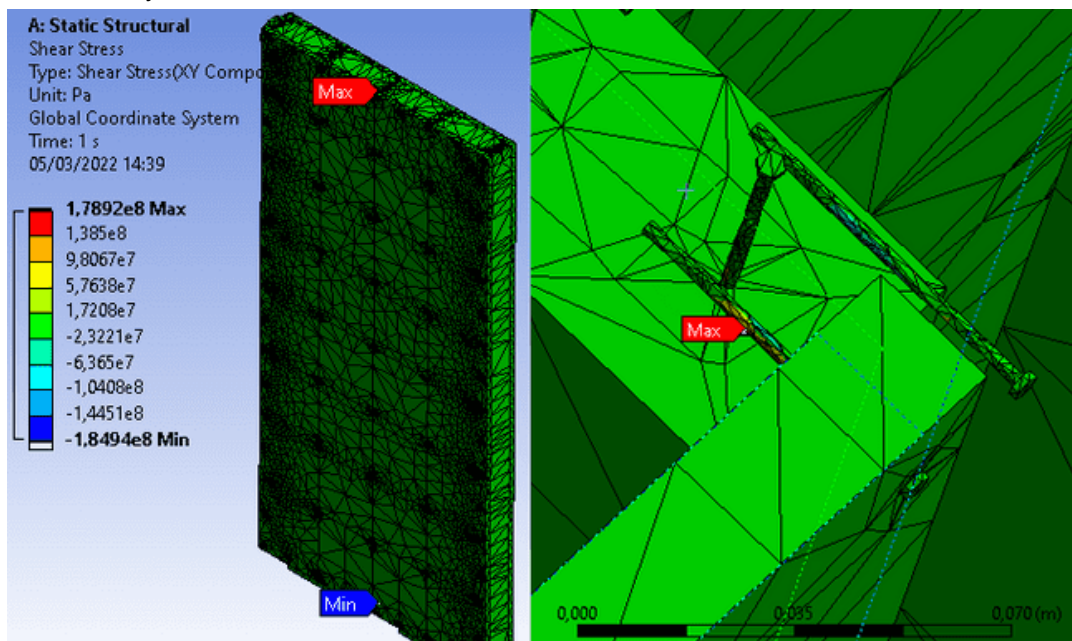


Figura 10 - Esforços no Modelo 02



O Modelo 02 se mostrou o mais resistente e mais rígido, apresentando deslocamento máximo de 15,2 mm e tensões máximas cisalhantes nos conectores de 178,9 MPa. Conforme se observa nas Figuras 9 e 10, o fechamento em tábuas combinado com a inclusão de mais montantes confere a rigidez que minimiza o deslocamento em mais de 50%, se comparado ao Modelo 01, que apresentou 35,2 mm de deslocamento. Com relação às tensões, conforme se observa na Figura 10, nos esforços cortantes máximos nos pregos observou-se uma redução drástica (281,5 MPa no Modelo Inicial e 178,9 MPa no Modelo 02), muito abaixo do valor de 378 MPa calculado segundo a norma NBR 7190 (ABNT, 1997).

O Modelo 03 é semelhante ao anterior, porém, com 3,00 metros de altura. Este modelo com maior altura foi concebido considerando possibilidades realistas na construção e a relativa baixa usabilidade de painéis com 2,40 metros de altura, além de esta dimensão ser imprópria (por questões sanitárias) por códigos de obras em diversas cidades no país, se configura em uma limitação para se construir espaços entre forros para passagem de instalações elétricas e hidráulicas. As Figuras 11, 12 e 13 mostram o *design*, deslocamento e esforços do Modelo 03.

De modo análogo à simulação do Modelo Inicial na versão de 3 metros, neste modelo, a altura do painel alterou o desempenho da estrutura como um todo, porém de modo não significativo. Observa-se pela de comparação das Figuras 9 e 12 que o deslocamento máximo aumentou de 15,2 mm para 23,0 mm, o equivalente a 50,6%.

O Modelo 04 foi elaborado a partir de encaixes tipo meia seção ou superposição entre as tábuas, utilizando-se 2,5 cm de cada lado das tábuas (Figuras 5 e 14) e fazendo com que a largura individual de cada tábua fosse reduzida de 30 cm para 25 cm reduzindo, por conseguinte, a largura total dos painéis para múltiplos de 1,00 m ao invés de 1,20 m, conforme Figuras 14 e 15 que representam o *design*, deslocamento e esforços do Modelo 04.

Conforme se observa, o acréscimo na proximidade entre montantes reduziu levemente o deslocamento e os esforços internos em comparação ao Modelo 03 anterior, de 23,0 mm e 271,3 MPa para 19,0 mm e 190,3 MPa respectivamente.

A opção por este modelo implicaria o consumo de mais madeira, uma vez que o painel se torna mais estreito, além de requerer trabalho adicional de usinagem das tábuas.

O quinto modelo apresenta a mesma premissa do anterior, diminuindo-se o número de montantes (apenas 1, neste caso), de modo que estes ficaram dispostos a cada duas juntas entre tábuas. Este modelo objetivou a redução do volume de madeira empregado no quadro, as Figuras 16, 17 e 18 demonstram seu *design* e simulação de deslocamento e esforços.

Figura 11 - Design do Modelo 03 com fechamento



Figura 12 - Simulação de deslocamento do Modelo 03

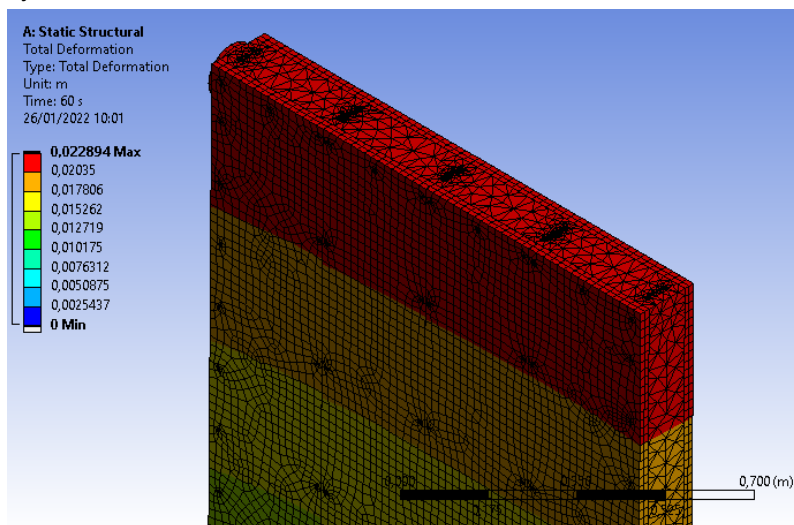


Figura 13 - Esforços no Modelo 03

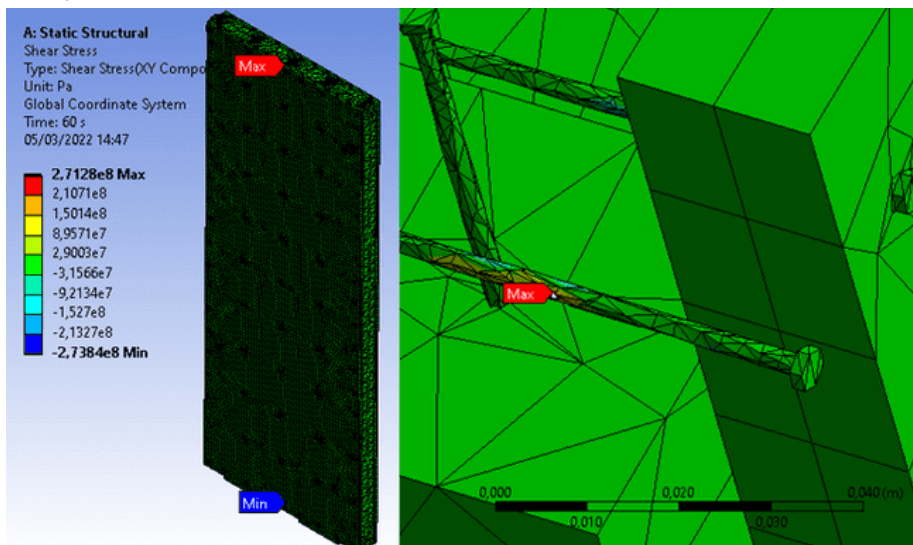


Figura 14 - Design do Modelo 04 com fechamento e simulação de deslocamento

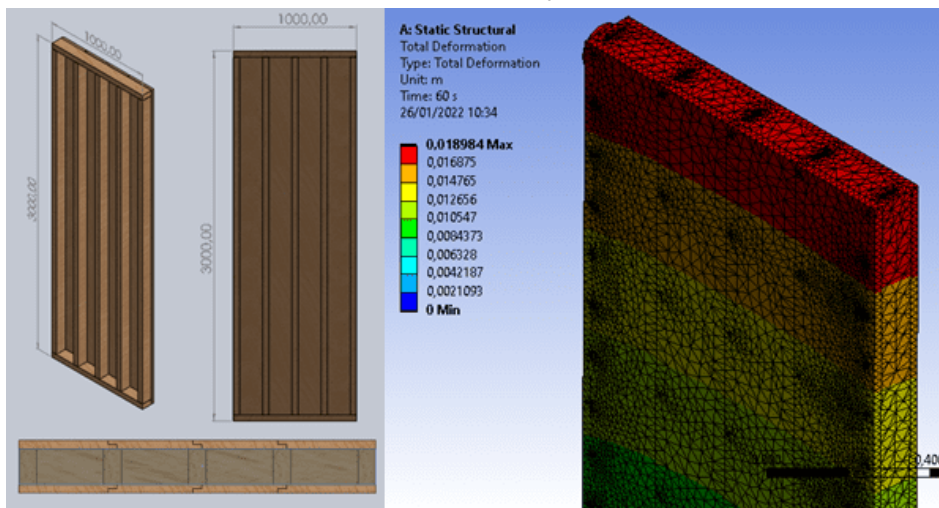


Figura 15 - Esforços no Modelo 04

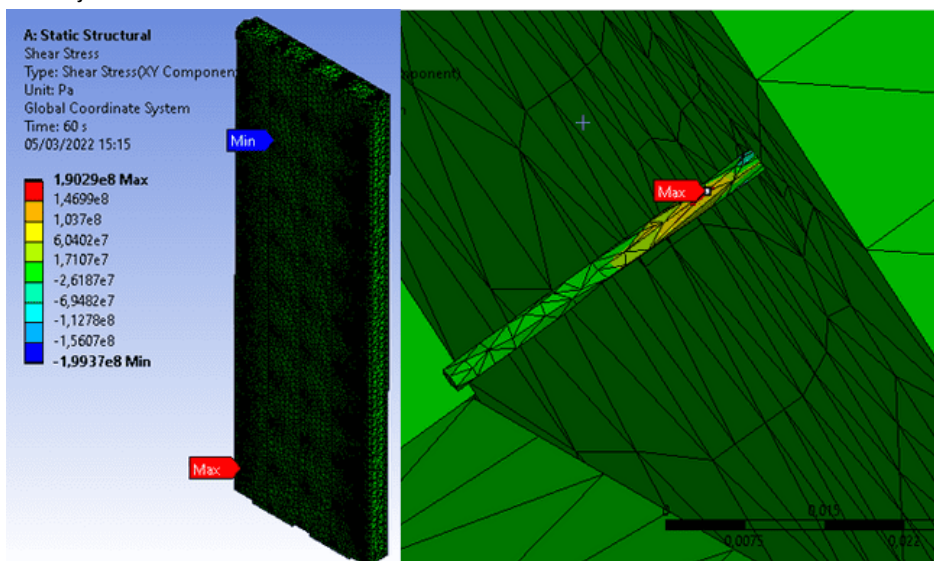


Figura 16 - Design do Modelo 05 com fechamento e simulação de deslocamento

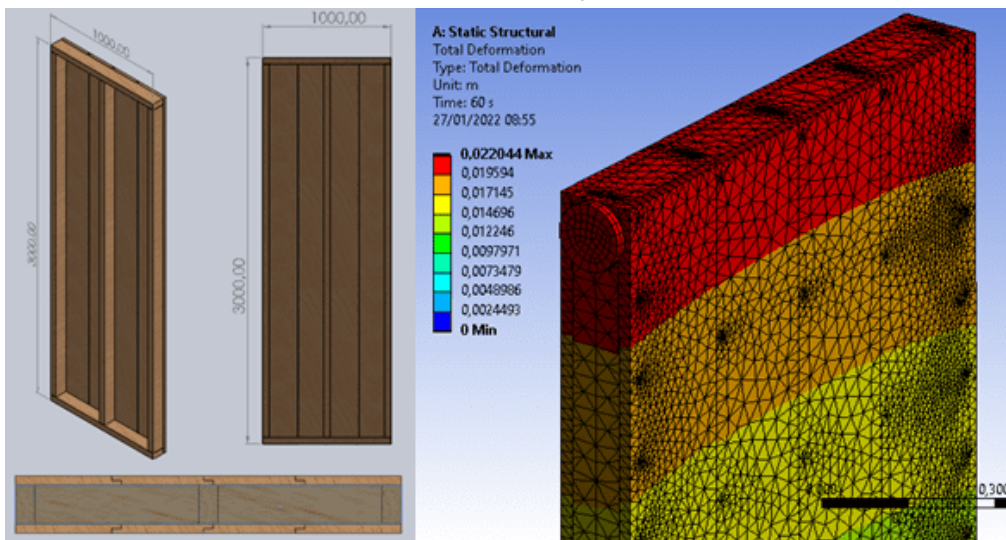


Figura 17 - Esforços no Modelo 05

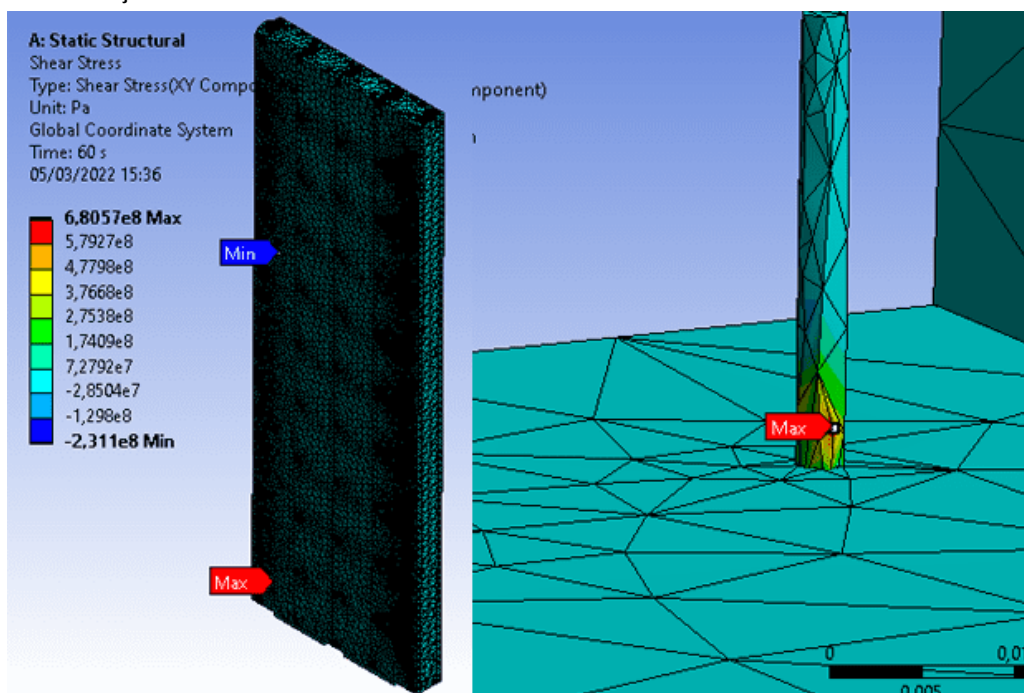
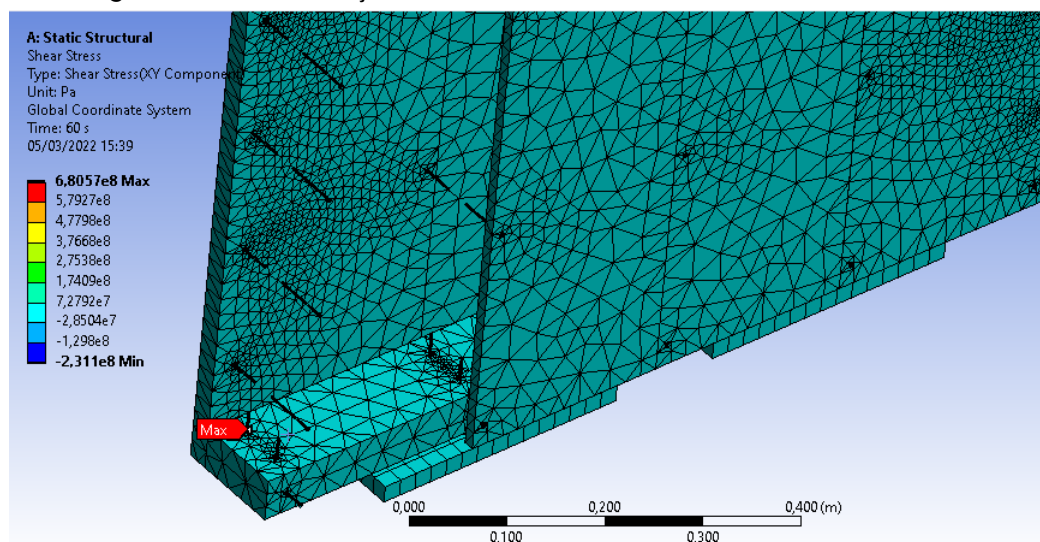


Figura 18 - Pregos na base com esforços excessivos no Modelo 05



A simulação desse modelo de gasto mínimo de material mostrou que apesar de os deslocamentos serem de ordem semelhante aos modelos anteriores, (deslocamento máximo de 22,0 mm), os esforços máximos internos foram muito elevados, com um valor de 680,6 MPa, o que supera em muito o limite de uso de 378,0 MPa calculado segundo o método da NBR 7190 (1997). Com estes valores de tensão, as ligações podem vir a ceder por escoamento dos pregos ou rachadura das tábuas, sendo essa condição a mais provável devido ao fato de a espessura ser reduzida nos entalhes e/ou por imperfeições que a peça possa vir a apresentar. Este modelo é, portanto, em condições últimas de esforços, o único não adequado/indicado ao uso em construções. Fica, no entanto, a observação que o painel quase nunca trabalha em seu estado limite último de ruína, mas no estado limite de serviço, o que poderia representar uma possibilidade de utilização deste painel.

O Modelo 03 se mostrou uma boa opção para aprofundamento em pesquisa e com isto em mente, foi elaborada uma nova versão, com a espessura reduzida das peças de envelopamento para este modelo. Os Modelos de 01 a 05 consideram a espessura das tábuas com 25,0 mm, que combinadas com os montantes de 100,0 mm, somam o equivalente à uma parede padrão de alvenaria de 150,0 mm de espessura.

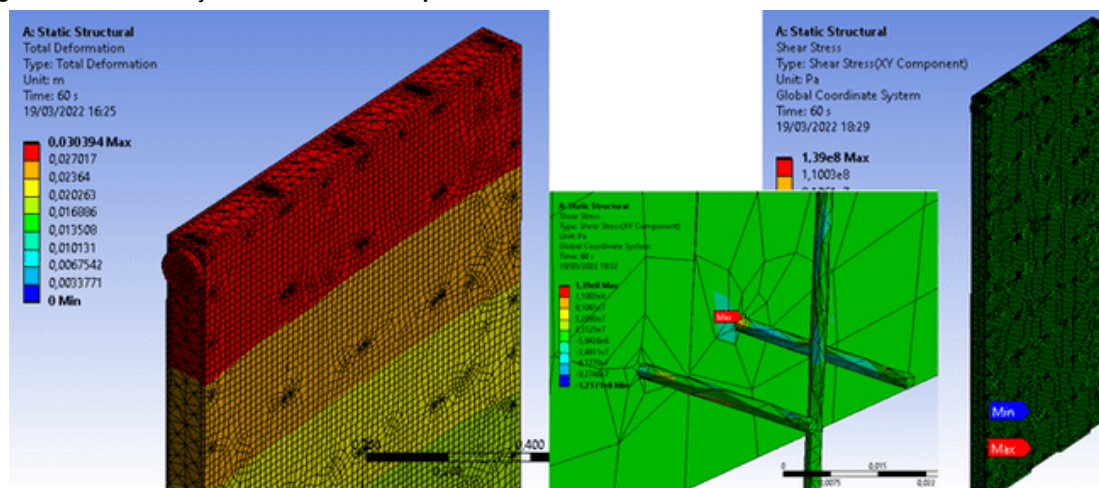
Para o Modelo 03 Reduzido considerou-se uma espessura de tábuas de 11,0 mm, um valor comparável ao de OSB utilizadas no sistema *light woodframe*, ao passo que também pode ser facilmente obtido ao se desdobrar e aparelhar/usinar tábuas comerciais de madeira da espécie *Pinus*. A Figura 19 representa os esforços e deformação do Modelo 03 com espessura reduzida.

Comparando-se os Modelos “03” e “03 Espessura Reduzida” (Figuras 12, 13 e 19), percebe-se que a redução da espessura das tábuas de vedação fez com que o deslocamento máximo aumentasse de 23,0 mm para 30,4 mm, um acréscimo de 32% e as tensões reduzissem de 271,3 MPa para 139,0 MPa, uma redução de 49%. Este valor ainda está abaixo dos de Paixão (2018) que observou 40,6 mm.

O aumento no deslocamento e redução nas tensões internas se deve ao fato de que, com menos material na vedação para resistir à carga aplicada, o corpo do painel, que é um conjunto de todas as peças se comportando como um pilar em balanço, tem menor capacidade de fornecer a força de reação para a ação da prensa simulada.

Os valores de tensão e deslocamento para todos os modelos das simulações com fechamento em madeira serrada estão dispostos no Quadro 4. É possível realizar uma análise comparativa entre modelos com base nos deslocamentos e tensões apresentadas em cada um destes.

Figura 19 - Deformação no Modelo 03 Espessura Reduzida



Quadro 4 - Comparativo de valores entre os painéis da simulação e o modelo

Modelo	Deslocamento máximo (mm)	Esforços cortantes máximos (MPa)	Rigidez Linear G' (N/mm)
01 Paixão (2018) – Modelo experimental com reforço do quadro em diagonal	40,6	(dados não disponíveis)	447
01 Simulação – Modelagem digital do Modelo 01 (Paixão, 2018) para calibração	35,2	281,5	511
02 Simulação – Dimensões de 2,40 m x 1,20 m com 3 montantes internos	15,2	178,9	1184
03 Simulação - Dimensões de 3,00 m x 1,20 m com 3 montantes internos	23,0	271,3	978
03 Espessura Reduzida Simulação – Modelo 03 com a espessura reduzida das tábuas de 25,0 mm para 11,0 mm	30,4	139,0	740
04 Simulação - Dimensões de 3,00 m x 1,00 m com 3 montantes internos e entalhes de sobreposição nas tábuas	19,0	190,3	1421
05 Simulação - Dimensões de 3,00 m x 1,00 m com 1 montante interno e entalhes de sobreposição nas tábuas	22,0	680,6	1227

Na análise computacional, foi possível estabelecer algumas relações ao se compararem os painéis entre si. O Modelo 02 se assemelhou ao modelo de Paixão (2018) em termos de dimensões (2,40 m x 1,20 m). Ao se comparar o Modelo “01 Simulação” com o Modelo “02 Simulação”, observa-se que houve um acréscimo na resistência estrutural do painel, uma vez que se reduziu o deslocamento máximo e os esforços cortantes máximos nas ligações. Essa redução indica que é vantajoso substituir diagonais de travamento por mais montantes verticais, uma vez que a configuração com diagonais permite maior liberdade para deslocamento/escorregamento relativo entre tábuas.

Seguindo a mesma premissa de se utilizarem mais montantes e aumentando-se a altura do painel de 2,40 m para 3,00 m propõe-se o Modelo 03. Na comparação dos Modelos “02 Simulação” e “03 Simulação” percebe-se que há um aumento no deslocamento máximo e nas tensões internas, porém, os valores ainda ficam abaixo do Modelo “01 Simulação”.

Para o Modelo 04, ao se reduzir a largura de 1,20 m para 1,00 m e considerar tábuas encaixadas entre si, tanto o deslocamento máximo quanto os esforços internos se mostraram menores do que o modelo anterior, “03 Simulação”. Isto porque o atrito existente no encaixe entre tábuas e a maior proximidade entre montantes fez com que a rigidez linear do painel aumentasse em cerca de 45%, o que é um bom resultado.

O Modelo 05 objetiva a diminuição do consumo de material ao remover alguns montantes internos uma vez que já existem ligações nos encaixes entre tábuas. Todavia, conforme demonstra a simulação, a dependência

apenas dos encaixes entre tábuas fez com que houvesse uma maior concentração de tensões em outras regiões e esforços acima dos limites normativos aparecessem em certos pontos.

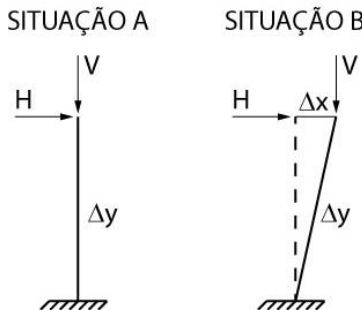
Dos novos Modelos (02 a 05), o de número 02 foi o que apresentou o melhor desempenho estrutural, porém não é o mais indicado para construções devido à sua altura se limitar a 2,40 m. O Modelo 03 se mostrou o mais vantajoso por apresentar um bom desempenho estrutural e ao mesmo tempo, também ser de fácil construção. Sob esta ótica, elaborou-se também o Modelo 03 de espessura reduzida, que apresenta bom aproveitamento de material e um bom desempenho geral além de ser de fácil execução.

Outra análise consiste no critério de norma para construções em balanço do item 9.2 da NBR 7190 (1997, p. 39), em que “A flecha efetiva u_{ef} , determinada pela soma das parcelas devidas à carga permanente u_g e à carga accidental u_q , não pode superar 1/200 dos vãos, nem 1/100 do comprimento dos balanços correspondentes [...]”. Também a análise da NBR 7190-1 (ABNT, 2022b), mais conservadora, coloca como valores-limites de deslocamentos para elementos correntes fletidos uma tolerância da flecha resultante final para vigas biapoiadas ou contínuas L/250 a L/350 e vigas em balanço valores entre L/125 e L/175.

Assim, considerando o painel similar a uma viga em balanço fixada à base, assim como demonstrado na Figura 20, ao se comparar os deslocamentos do Quadro 4 com os critérios da NBR 7190 (1997), observa-se que todos os novos modelos apresentaram um bom desempenho em termos de deslocamento, uma vez que nenhum deles excede o valor normativo para vãos em balanço, cujos deslocamentos limites (lb/100) seriam: para o Modelo 02, $2400/100 = 24,0$ mm, que apresentou 15,2 mm; para os Modelos 03, 04 e 05, $3000/100 = 30,0$ mm, que apresentaram 23,0 mm, 19,0 mm e 22,0 mm, respectivamente. Este deslocamento normativo também é de 30,0 mm para o Modelo 03 Reduzido que apresentou um valor muito próximo (30,4 mm), demonstrando um excelente desempenho segundo este critério de norma. Para a NBR 7190-1 (2022b), apenas este último (03R) extrapolaria por pequena margem o valor, sendo $L/125 = 24,0$ mm.

Através da Rigidez Linear ainda é possível realizar uma análise comparativa entre os painéis simulados e painéis de outros estudos, como os de Dias (2005) e Veloso (2003) que estudaram painéis convencionais em *light woodframe* (LWF) e Rosa (2017) que estudou painéis convencionais em *light steelframe* (LSF), suas dimensões e resultados estão dispostos na Tabela 3.

Figura 20 - Exemplo de construções em balanço da NBR 7190-1 (ABNT, 2022b)



Fonte: Moura (2020).

Tabela 3 - Comparativo de rigidez com outros estudos

Autor	Sistema	Dimensões do Painel (m)		Força de Escoamento (N)	Deslocamento de Escoamento (mm)	Rigidez Aparente G' (N/mm)
		Altura (h)	Largura (L)			
Paixão (2018)	LWF	2,40	1,20	9001	40,6	447
Rosa (2017)	LSF	2,80	1,20	6988	25,0	652
Dias (2005)	LWF	2,76	2,44	8625	17,4	561
Veloso (2003)	LWF	2,40	2,40	11172	10,0	1117
Ruiz M01	LWF	2,40	1,20	9000	35,2	511
Ruiz M02	LWF	2,40	1,20	9000	15,2	1184
Ruiz M03	LWF	3,00	1,20	9000	23,0	978
Ruiz M03 R	LWF	3,00	1,20	9000	30,4	740
Ruiz M04	LWF	3,00	1,00	9000	19,0	1421
Ruiz M05	LWF	3,00	1,00	9000	22,0	1227

A rigidez dos painéis 02, 03, 03R e 04 foram de 1184, 978, 740 e 1421 N/mm, respectivamente. Ou seja, os Modelos 02 e 04 apresentaram rigidez superior aos 4 estudos de outros autores e os Modelos 03 e 03R apenas não superaram a rigidez do estudo de Veloso (2003), que utilizou uma chapa com maior largura e menor altura (2,40 m x 2,40 m), de modo que o Modelo 03 apresentou cerca de 87,5% de sua rigidez.

Assim, por apresentarem rigidez igual ou superior, os Modelos 02, 03, 03R e 04 são passíveis de serem construídos em conformidade ao padrão normativo americano IRC (2018), de modo que o painel se enquadre na categoria “*continuous sheathing*”, ou seja, todo o painel confere resistência estrutural à fachada.

Conclusões

Objetivando uma construção em *light woodframe* mais acessível à população em geral, esta pesquisa consistiu na análise da substituição do envelopamento estrutural em chapas de OSB por tábuas de madeira serrada, sendo escolhido a espécie *Pinus* (por sua disponibilidade comercial), por meio de análise realizada com base em modelagem numérica.

Como consequência, o painel, que é um elemento único, se torna, para efeitos de cálculo, fracionado em diversos planos na sua superfície por meio da malha gerada para simulação, que, ao dividir o elemento para utilizar o método dos elementos finitos, faz com que este seja considerado uno e coeso.

Estudos anteriores priorizaram o enrijecimento da ossatura interna através da inserção de diagonais. Os resultados mostraram um escorregamento relativo excessivo entre as tábuas de fechamento, indicando que uma limitação mais efetiva deste efeito, seria a maneira mais eficiente de melhorar o comportamento do painel como um todo. Este estudo se baseou na limitação do escorregamento relativo das tábuas de envelopamento, pela substituição do travamento do quadro pela introdução de montantes adicionais posicionados sob as juntas entre tábuas com o objetivo de travar o conjunto de envelopamento.

Nesta pesquisa, foi possível perceber como o painel se comporta de acordo com os esforços horizontais, que agem na estrutura e a influência da geometria no desempenho estrutural (altura ou pé-direito, largura do painel, número de montantes e travamentos).

Os Modelos 03 e 03R possuem uma maior praticidade construtiva, não dependendo de entalhes entre tábuas, e, devido à sua também elevada resistência estrutural se comparada aos demais, são os mais indicados para a construção e para aprofundamentos em pesquisa.

Os resultados mostraram que a hipótese inicial se verificou, ou seja, o enrijecimento do envelopamento se mostrou estruturalmente mais vantajoso que aquele da ossatura interna, com ganhos de simplificação na execução dos painéis.

Como sugestão de aprofundamento em pesquisa, elenca-se os estudos de desempenho termoacústico do painel, de estanqueidade e da introdução de aberturas nos painéis, portas e janelas visando atender a expectativas e realidades nacionais, como a disponibilidade de madeiras nativas e o processo de mecanização utilizado na indústria madeireira.

Referências

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E564-06**: standard practice for static load test for shear resistance of framed walls for buildings. **Cidade**, 2018.
- AMERICAN WOOD COUNCIL. **Wood Frame Construction Manual (WFCM) for one- and two-family dwellings**. Leesburg, 2018.
- ARAÚJO, V. A. de *et al.* Can timber houses be productively faster to build than other buildings? **Revista Árvore**, Vicoso, v. 46, 2022.
- ARAÚJO, V. A. de *et al.* Lignocelulósicos em uso pelo setor produtivo de casas de madeira no Brasil. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 32, n. 2, p. 129–141, 2020.
- ARAÚJO, V. de *et al.* Disponibilidad de las técnicas constructivas de habitación en madera, en Brasil. **Revista de Arquitectura**, v. 21, n. 1, p. 68-75, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: projetos de estrutura de madeira. Rio de Janeiro, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-1**: projetos de estrutura de madeira: parte 1: critérios de dimensionamento. Rio de Janeiro, 2022b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-5**: projetos de estrutura de madeira: parte 5: métodos de ensaio para determinação da resistência e da rigidez de ligações com conectores mecânicos. Rio de Janeiro, 2022a.

BORTOLETO, L. T. **Estudo experimental de painéis wood frame com envelopamento de tábuas**. Londrina: Universidade Estadual de Londrina, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, 2019. Iniciação científica.

BRASIL. Biblioteca DATecs. **DATEC N° 020-D**: sistema estruturado em peças leves de madeira maciça serrada. Documento de Avaliação Técnica. São Paulo, 2020a. Disponível em: <https://pbqp-h.mdr.gov.br/tipo-documento/datecs/>. Acesso em: 08 abr. 2024.

BRASIL. Ministério das Cidades. Sistema Nacional de Avaliações Técnicas. **DATec n° 005**: Sistemas construtivos estruturados em peças de madeira maciça serrada, com fechamentos em chapas (Sistemas leves Light wood frame). Revisão 3. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2020b.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **EN 26891**: timber structures: joints made with mechanical fasteners: general principles for the determination of strength and deformation characteristics. London, 1991.

DIAS, G. L. **Estudo experimental de paredes estruturais de Sistema Leve em Madeira (Sistema Plataforma) submetidas a força horizontal no seu plano**. Florianópolis, 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

GOSSELIN, A. *et al.* Main motivations and barriers for using wood as a structural building material: a case study. In: INTERNATIONAL INDUSTRIAL ENGINEERING CONFERENCE, 11., Québec, 2015. **Proceedings [...]** Québec, 2015.

GREEN, D. W.; WINANDY, J. E.; KRETSCHMANN, D. E. Mechanical properties of wood. In: WOOD handbook: wood as an engineering material. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999.

GUSTAVSSON, L.; PINGOUD, K.; SATHRE, R. Carbon dioxide balance of wood substitution: comparing concrete- and wood-framed buildings. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 11, p. 667–691, 2006.

HIRSCHTICK, J. **SolidWorks**: Software de modelagem 3D. Versão SP5. Dassault Systèmes Corp., 2020. Disponível em: <https://www.solidworks.com/pt-br/product/solidworks-education-whats-new-2020>. Acesso em: 29 maio 2023.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **TR 12910**: light-frame timber construction. Switzerland, 2010.

INTERNATIONAL RESIDENTIAL CODE. **Wall bracing**: a guide for builders, designers and plan reviewers. madison: Foam Sheathing Committee, 2018.

KASAL, B. *et al.* Design models of light frame wood buildings under lateral loads. **Journal of Structural Engineering**, v. 130, n. 9, p. 1423-1432, 2004.

MELO, J. E. **Madeira**: características e aplicações. Curso para capacitação de agentes multiplicadores em valorização da madeira e resíduos vegetais. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA, Laboratório de Produtos Florestais – LPF. Brasília, 2002.

MOURA, J. **Estabilidade global simplificada**: parâmetro alfa. Agosto, 2020. Disponível em: www.guiadaengenharia.com/parametro-alfa-estabilidade-global. Acesso em: 08 abr. 24.

PAIXÃO, A. **Painel estrutural com fechamento de tábuas de madeira de Pinus spp**. Londrina, 2018. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2018.

PETERSEN, A.; SOLBERG, B. Environmental and economic impacts of substitution between wood products and alternative materials: a review of micro-level analyses from Norway and Sweden. **Forest Policy and Economics**, v. 7, n. 3, p. 249-259, 2005.

PIZZINI, P. R. **Determinação experimental das constantes elásticas da madeira de Eucalyptus grandis e chapas de OSB**. 95 f. Campo Mourão, 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2017.

- PRAZERES, F. da S.; ALBERTI, E. G.; ARAKAWA, F. S. Sistema construtivo em wood frame como alternativa inovadora para o desenvolvimento sustentável no Brasil. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 2, p. 27212-27221, fev. 2022.
- QU, M. *et al.* Experts' assessment on the development of wood framed houses in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 24, n. 1, p. 88-96, jan. 2012.
- ROSA, N. Resistência mecânica de painéis com estrutura leve em aço (LSF) sujeitos a cargas laterais. In: CONGRESSO DE CONSTRUÇÃO METÁLICA E MISTA, Coimbra, 2017. **Anais [...]** Coimbra, 2017.
- SOTSEK, N. C.; SANTOS, A. de P. L. Panorama do sistema construtivo wood frame no Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 3, p. 309–326, jul./set. 2018.
- STARK, N. M.; CAI, Z.; CARLL, C. Wood-based composite materials: panel products, glued-laminated timber, structural composite lumber, and wood-nonwood composite materials. In: **WOOD handbook: wood as an engineering material**. Centennial Edition. Madison: Forest Products Laboratory, 2010.
- SWANSON, J. **Ansys**: Software de Modelagem 3D. Versão Mechanical R2. Ansys Inc. 2021. Disponível em: <https://www.ansys.com/academic/students/ansys-student>. Acesso em: 29 maio 2023.
- TAVARES, J. F. **Introdução ao SolidWorks (X)**: análise de tensões de peças – SimulationXpress. Material Didático da Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Porto, 2014. Disponível em: https://paginas.fe.up.pt/~tavares/ensino/CFAC/Downloads/Apontamentos/SolidWorks%20X_p.pdf. Acesso em: 6 abr. 2024.
- VELOSO, L. A. C. M. **Paredes diafragmas de madeira**. 151 f. São Paulo, 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- WERNER, F. *et al.* Carbon pool and substitution effects of an increased use of wood in buildings in Switzerland: first estimates. **Annals of Forest Science**, v. 62, p. 889-902, 2005.

Jonathan Gustavo Spolador Ruiz

Conceptualização, Curadoria de Dados, Análise Formal, Investigação, Metodologia, Software, Validação, Escrita - rascunho original, Escrita - análise e edição.

Departamento de Arquitetura e Urbanismo | Universidade Estadual de Londrina | Rod. Celso Garcia Cid, PR-445, Km 380, Campus Universitário | Londrina -PR - Brasil | CEP 86057-970 | Tel.: (43) 3371-4727 | E-mail: spolador.jonathan@gmail.com

Jorge Daniel de Melo Moura

Conceptualização, Administração do Projeto, Recursos, Supervisão, Escrita - análise e edição.

Departamento de Arquitetura e Urbanismo | Universidade Estadual de Londrina | Tel.: (43) 3371-4525 | E-mail: jordan@uel.br

André Luis Christoforo

Conceptualização, Recursos, Software, Supervisão.

Departamento de Engenharia Civil | Universidade Federal de São Carlos | Rod. Washington Luís, s/n, Monjolinho | São Carlos - SP - Brasil | CEP 13565-905 | Tel.: (16) 3351-8262 | E-mail: alchristoforo@ufscar.br

Editores: **Marcelo Henrique Farias de Medeiros e Julio Cesar Molina**

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.