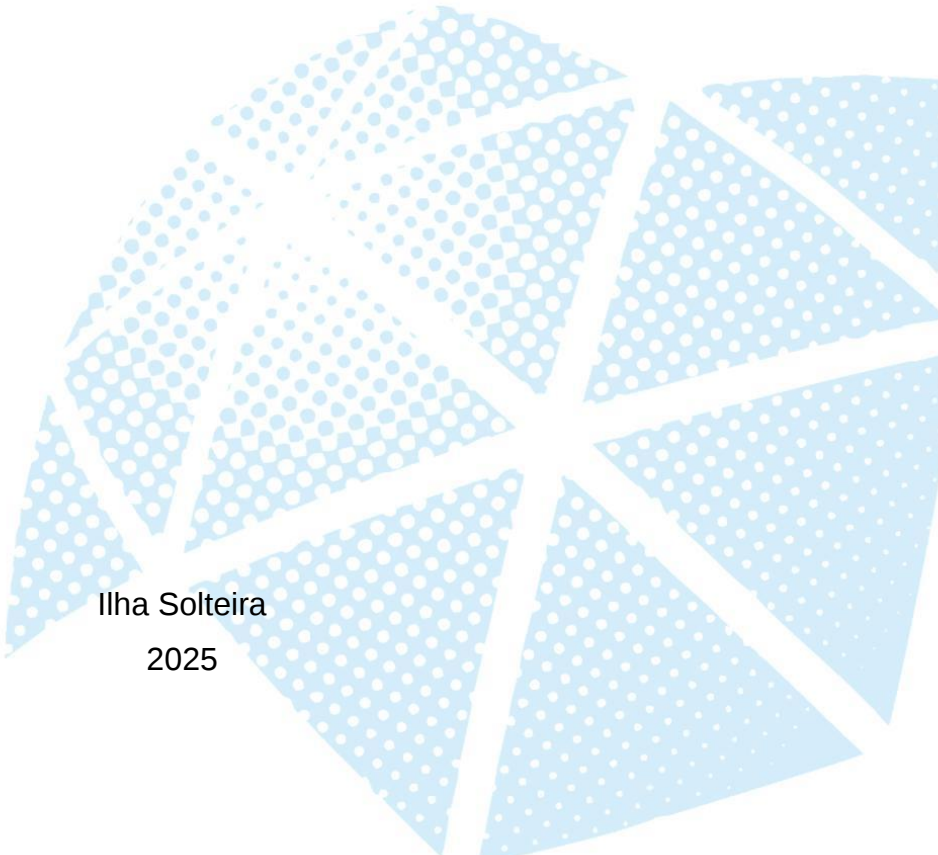


**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

ARNALDO SUZINI POLETO

**ANÁLISE NUMÉRICA DO DESEMPENHO MECÂNICO DE TELHAS
REFORÇADAS COM FIBRA DE VIDRO EM CONJUNTO COM PAINÉIS
AGLOMERADOS DE MADEIRA**



Ilha Solteira
2025

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ARNALDO SUZINI POLETO

**ANÁLISE NUMÉRICA DO DESEMPENHO MECÂNICO DE TELHAS
REFORÇADAS COM FIBRA DE VIDRO EM CONJUNTO COM PAINÉIS
AGLOMERADOS DE MADEIRA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.
Especialidade: Estruturas

Prof. Dr. André Luis Christoforo
Orientador

Prof. Dr. Herisson Ferreira dos Santos
Coorientador

Ilha Solteira

2025

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

- P765a Poletto, Arnaldo Suzini.
Análise numérica do desempenho mecânico de telhas reforçadas com fibra de vidro em conjunto com painéis aglomerados de madeira / Arnaldo Suzini Poletto. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
104 f. : il.
- Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estruturas, 2025
- Orientador: André Luis Christoforo
Coorientador: Herisson Ferreira dos Santos
Inclui bibliografia
1. Painéis aglomerados. 2. Telha PRFV. 3. Telha reforçada com fibra de vidro. 4. Simulação numérica.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

A Instrução Normativa 12, ao incentivar o uso de materiais sustentáveis como painéis aglomerados em telhas, promove a inovação e a infraestrutura sustentável (ODS 9), reforça padrões de produção e consumo responsáveis (ODS 12) e contribui para cidades mais resilientes e sustentáveis (ODS 11), alinhando-se aos desafios do clima e da engenharia moderna.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ANÁLISE NUMÉRICA DO DESEMPENHO MECÂNICO DE TELHAS REFORÇADAS COM FIBRA DE VIDRO EM CONJUNTO COM PAINÉIS AGLOMERADOS DE MADEIRA

AUTOR: ARNALDO SUZINI POLETO

ORIENTADOR: ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO

COORIENTADOR: HERISSON FERREIRA DOS SANTOS

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, área: Estruturas pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO**
Data: 27/02/2025 08:42:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO (Participação Virtual)
Engenharia Civil / Universidade Federal de São Carlos

Documento assinado digitalmente
 **SERGIO AUGUSTO MELLO DA SILVA**
Data: 27/02/2025 09:36:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Professor Doutor SERGIO AUGUSTO MELLO DA SILVA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Documento assinado digitalmente
 **DIEGO HENRIQUE DE ALMEIDA**
Data: 27/02/2025 09:30:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.Dr. DIEGO HENRIQUE DE ALMEIDA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Universidade Federal de Rondônia

Ilha Solteira, 21 de fevereiro de 2025

DEDICATÓRIA

Aos meus pais e aos meus filhos. Para sempre.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, pelo apoio incondicional e pelo incentivo constante ao longo de toda a minha jornada acadêmica. A vocês, que me ensinaram o valor do conhecimento, da perseverança e da ética, minha eterna gratidão. Este é o resultado de todo o amor, paciência e sabedoria que recebi ao longo da vida.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão ao meu orientador, Prof. Dr. André Luís Christoforo, pela orientação, paciência e valiosas contribuições durante a elaboração desta dissertação. Sua expertise e dedicação foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. Obrigado por acreditar em mim e me dar essa oportunidade.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Herisson Ferreira dos Santos por aceitar fazer parte deste trabalho. Muito obrigado.

Ao Prof. Dr. Sérgio Augusto de Mello, que lá atrás me deu a oportunidade de ingressar neste curso de pós-graduação e me incentivou a todo momento não desistir, desde a época da graduação.

Agradeço também à Unesp, por proporcionar um ambiente acadêmico de excelência, onde pude desenvolver e aprimorar meus conhecimentos.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. Sem vocês, nada disso seria possível.

“Tudo o que temos de decidir é o que fazer com o tempo que nos é dado”. Tolkien

RESUMO

Nas últimas décadas, a busca por soluções sustentáveis na construção civil tem se intensificado, impulsionada pela necessidade de mitigar os impactos ambientais decorrentes de práticas tradicionais. Este estudo aborda o desenvolvimento e análise de telhas reforçadas com fibra de vidro combinadas com painéis aglomerados de madeira, utilizando resíduos lignocelulósicos como matéria-prima. A pesquisa visa contribuir para a economia circular e promover materiais que, além de sustentáveis, apresentem propriedades mecânicas superiores às dos produtos convencionais.

O trabalho enfatiza a importância da utilização de resíduos de madeira, que anteriormente eram considerados subprodutos sem valor, na fabricação de painéis como MDF e MDP, explorando sua aplicação em telhas para melhorar sua resistência e durabilidade. A combinação com o Polímero Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV) é analisada como uma solução para aumentar a resistência mecânica e a eficiência térmica das telhas, mantendo-as leves e adequadas para diversas aplicações construtivas. A pesquisa é realizada por meio de simulações numéricas utilizando o método dos elementos finitos, onde são avaliadas diferentes espessuras e propriedades dos painéis, além das condições de apoio e carregamento, conforme as normas NBR 6120/2019 e NBR 7190/2022. As propriedades mecânicas dos painéis utilizados foram baseadas em estudos prévios, com ênfase na combinação de seringueira e pinus. Os resultados comprovam a viabilidade técnica do uso desses materiais compósitos na construção civil, oferecendo alternativas sustentáveis e economicamente viáveis que possam reduzir o impacto ambiental sem comprometer a qualidade e segurança estrutural. Além disso, os resultados demonstram que o sistema integrado de telhas e painéis aglomerados possui potencial para uso em situações que exigem alto desempenho mecânico, podendo ser empregado como elemento com função estrutural.

Palavras-chave: painéis aglomerados; telha PRFV; telha reforçada com fibra de vidro; simulação numérica.

ABSTRACT

In recent decades, the pursuit of sustainable solutions in civil construction has intensified, driven by the need to mitigate the environmental impacts of traditional practices. This study focuses on the development and analysis of fiberglass-reinforced roof tiles combined with wood composite panels, utilizing lignocellulosic waste as raw material. The research aims to contribute to the circular economy and promote materials that are not only sustainable but also exhibit superior mechanical properties compared to conventional products. The work emphasizes the importance of using wood waste, previously considered low-value by-products, in the manufacture of panels such as MDF and MDP, exploring their application in roofing to enhance strength and durability. The combination with Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) is analyzed as a solution to increase the mechanical strength and thermal efficiency of the tiles, while keeping them lightweight and suitable for various construction applications. The research is conducted through numerical simulations using the finite element method, where different panel thicknesses and properties, as well as support and loading conditions, are evaluated according to NBR 6120/2019 and NBR 7190/2022 standards. The mechanical properties of the panels used were based on previous studies, with an emphasis on the combination of rubber tree and pine. The results prove the technical feasibility of using these composite materials in civil construction, offering sustainable and economically viable alternatives that can reduce environmental impact without compromising quality and structural safety. Furthermore, the results demonstrate that the integrated system of tiles and particleboard panels has the potential for use in situations that require high mechanical performance, and can be used as an element with a structural function.

Keywords: particleboards; GFRP roof tile; fiberglass-reinforced roof tile; numerical simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Área de florestas plantadas no Brasil.....	20
Figura 2 – Comparativo da Demanda (Painéis de Madeira, Cimento, PIB, Construção Civil e Serrado) entre os anos de 1996 e 2012.....	22
Figura 3 – Comparativo da Demanda (Painéis de Madeira, Cimento, PIB, Construção Civil e Serrado) entre os anos de 1996 e 2013.....	23
Figura 4 – Histórico de produção e consumo de painéis de madeira industrializada no Brasil, 2002-2012.....	23
Figura 5 – Comparação da produção brasileira de painéis de madeira reconstituídos dos anos de 2015 e 2016.....	24
Figura 6 – Comparação da produção brasileira de painéis de madeira reconstituída dos anos de 2017 e 2018.....	25
Figura 7 – Principais etapas do processo de uma linha de produção de aglomerado.....	30
Figura 8 - Reação de formação do grupouretano.....	33
Figura 9 - Reação de polimerização do poliuretano à base de.....	33
Figura 10 - Rede de pontos nodais do Domínio, Ω e dos Subdomínios, Ω_e	39
Figura 11 - Fibras de vidro.....	44
Figura 12 - Estrutura molecular do ácido ortoftálico.....	45
Figura 13 - a) Lixeira em fibra de vidro; b) Escorredor em fibras de vidro; c) Telhas translúcidas em fibra de vidro; d) Caixas d'água feitas com fibra de vidro.....	47
Figura 14 – Telha opaca em poliéster reforçado com fibra de vidro.....	49
Figura 15 – Mercado de painéis no contexto brasileiro.....	52
Figura 16 - Malha de elementos finitos típica da microfibrila na menor escala considerada no estudo.....	59
Figura 17 - Malha de elementos finitos típica da célula de madeira na escala intermediária.....	59
Figura 18 - Distribuição de ruptura de uma viga de CLT de 5 camadas.....	61
Figura 19 – Telha trapezoidal em PRFV.....	64
Figura 20 – Aplicação de carga para telhas com 1m entre apoios.....	66

Figura 21 – Aplicação de carga para telhas com 2m entre apoios.....	67
Figura 22 – Carga localizada no 1º vão para telhas com 1m entre apoios.....	67
Figura 23 – Carga localizada no 2º vão para telhas com 1m entre apoios.....	67
Figura 24 – Carga localizada no 3º vão para telhas com 1m entre apoios.....	68
Figura 25 – Carga localizada no 1º vão para telhas com 2m entre apoios.....	68
Figura 26 – Carga localizada no 2º vão para telhas com 2m entre apoios.....	68
Figura 27 – Seção transversal do conjunto Telha + Painel.....	69
Figura 28 – Seção transversal do painel com 2 cm.....	70
Figura 29 – Peça extrudada.....	70
Figura 30 – Face inferior do núcleo particionada.....	71
Figura 31 – Seção transversal da telha.....	71
Figura 32 - Seção dos apoios.....	72
Figura 33 - Partições realizadas ao longo da peça.....	72
Figura 34 - Elementos agrupados.....	74
Figura 35 - Sets criados para leitura de dados.....	75
Figura 36 - Ligação do tipo Tie aplicada no conjunto.....	76
Figura 37 - Área de atuação da carga distribuída de 1,5 kN/m².....	77
Figura 38 - Núcleo sinalizado em amarelo.....	78
Figura 39 - Irregularidades e deformações ao longo da malha criada.....	78
Figura 40 - Partição da seção da peça utilizando a ferramenta Partition Cell.....	79
Figura 41 - Malha corrigida aplicada.....	79
Figura 42 - Malha aplicada sobre o elemento telha PRFV.....	80
Figura 43 - Malha aplicada sobre o apoio.....	80
Figura 44 - Tensões de V. Mises para o painel de 2cm.....	81
Figura 45 - Deformações máximas para o painel de 2cm.....	81
Figura 46 - Tensões de V. Mises para o painel de 3cm.....	82
Figura 47 - Deformações máximas para o painel de 3cm.....	82
Figura 48 - Tensões de V. Mises para a telha sem painel.....	83
Figura 49 - Deformações máximas para a telha sem painel.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos adesivos.....	32
Tabela 2 – Classificação dos adesivos de painéis de madeira conforme o ambiente de uso.....	32
Tabela 3 – Misturas definidas para a confecção dos painéis.....	36
Tabela 4 – Densidade dos painéis.....	36
Tabela 5 - Módulo de resistência à flexão estática (MOR).....	37
Tabela 6 - Módulo de Elasticidade (MOE).....	37
Tabela 7 - Propriedades da Fibra de Vidro.....	43
Tabela 8 - Características técnicas dos laminados.....	48
Tabela 9 – Propriedades físicas e mecânicas das telhas.....	49
Tabela 10 – Propriedades térmicas das telhas.....	49
Tabela 11 – Misturas definidas para a confecção dos painéis.....	64
Tabela 12 – Valores médios dos Módulos de Elasticidade para cada composição.....	65
Tabela 13 – Valores médios dos Módulos de Resistência a flexão estática para cada composição.....	65
Tabela 14 – Valores característicos nominais das cargas variáveis.....	66
Tabela 15 – Resultados obtidos de cada tratamento das flechas em painéis compostos de 100% Seringueira.....	84
Tabela 16 – Resultados obtidos de cada tratamento das flechas em painéis compostos de 70% Seringueira e 30% Pinus.....	85
Tabela 17 – Resultados obtidos de cada tratamento das flechas em painéis compostos de 100% Pinus.....	86
Tabela 18 – Acréscimo de carga considerando o limite normativo L/500 para painéis compostos de 100% Seringueira.....	94
Tabela 19 – Acréscimo de carga considerando o limite normativo L/500 para painéis compostos de 70% Seringueira e 30% Pinus.....	95
Tabela 20 – Acréscimo de carga considerando o limite normativo L/500 para painéis compostos de 100% Pinus.....	96
Tabela 21 – Relação Tensão atuante e MOR dos painéis para as três composições de misturas.....	97

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Flechas (mm) obtidas em painéis de 2cm compostos de 100% Seringueira e vão de 1m entre apoios.....	87
Gráfico 2 – Flechas (mm) obtidas em painéis de 2cm compostos de 100% Seringueira e vão de 2m entre apoios.....	87
Gráfico 3 – Flechas (mm) obtidas em painéis de 3cm compostos de 100% Seringueira e vão de 1m entre apoios.....	88
Gráfico 4 – Flechas (mm) obtidas em painéis de 3cm compostos de 100% Seringueira e vão de 2m entre apoios.....	88
Gráfico 5 – Flechas (mm) obtidas em painéis de 2cm compostos de 70% Seringueira e 30% Pinus e vão de 1m entre apoios.....	89
Gráfico 6 – Flechas (mm) obtidas em painéis de 2cm compostos de 70% Seringueira e 30% Pinus e vão de 2m entre apoios.....	89
Gráfico 7 – Flechas (mm) obtidas em painéis de 3cm compostos de 70% Seringueira e 30% Pinus e vão de 1m entre apoios.....	90
Gráfico 8 – Flechas (mm) obtidas em painéis de 3cm compostos de 70% Seringueira e 30% Pinus e vão de 2m entre apoios.....	90
Gráfico 9 – Flechas (mm) obtidas em painéis de 2cm compostos de 100% Pinus e vão de 1m entre apoios.....	91
Gráfico 10 – Flechas (mm) obtidas em painéis de 2cm compostos de 100% Pinus e vão de 2m entre apoios.....	91
Gráfico 11 – Flechas (mm) obtidas em painéis de 3cm compostos de 100% Pinus e vão de 1m entre apoios.....	92
Gráfico 12 – Flechas (mm) obtidas em painéis de 3cm compostos de 100% Pinus e vão de 2m entre apoios.....	92

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	OBJETIVOS.....	18
1.2	JUSTIFICATIVAS.....	18
2	ASPECTOS FUNDAMENTAIS.....	19
2.1	ASPECTOS SOBRE O SETOR FLORESTAL BRASILEIRO.....	19
2.2	SETOR INDUSTRIAL DE PAINÉIS DE MADEIRA NO BRASIL.....	21
2.3	PAINÉIS DE MADEIRA AGLOMERADA.....	26
2.3.1	Definição e características.....	26
2.3.2	Histórico.....	27
2.3.3	Utilização e vantagens.....	28
2.3.4	Classificação do MDP.....	29
2.3.5	Processo de fabricação.....	29
2.4	ADESIVOS.....	31
2.4.1	Definição, classificação e histórico.....	31
2.4.2	Resina Poliuretano PU-Mamona.....	33
2.5	MATERIAIS E RESULTADOS DA DISSERTAÇÃO DE REFERÊNCIA.....	35
2.6	SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	38
2.6.1	Equação diferencial.....	40
2.6.2	Matriz de rigidez.....	41
2.7	TELHAS REFORÇADAS COM FIBRA DE VIDRO.....	42
2.7.1	Fibras de vidro.....	42
2.7.2	Polímeros reforçados com fibras de vidro (PRFV).....	44
2.8	PRINCIPAIS NORMAS UTILIZADAS NESTE TRABALHO.....	50
2.8.1	NBR 6120/2019.....	50
2.8.2	NBR 8681/2003.....	50
2.6.3	NBR 7190/2022.....	50
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	51
3.1	APLICAÇÃO DE PAINÉIS AGLOMERADOS NA ENGEHARIA.....	52
3.2	SIMULAÇÃO NUMÉRICA EM PAINÉIS AGLOMERADOS.....	56
3.3	CONCLUSÕES ACERCA DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	61

4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	63
4.1	ESTUDO PARAMÉTRICO DOS MATERIAIS.....	63
4.1.1	Propriedades mecânicas dos materiais utilizados.....	64
4.2	SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO CONJUNTO.....	69
4.2.1	Modelo Numérico.....	69
4.2.2	Seção transversal do painel aglomerado.....	69
4.2.3	Telha reforçada com fibra de vidro.....	71
4.2.4	Elaboração dos suportes.....	72
4.2.5	Criação das propriedades dos materiais.....	73
4.2.6	Criação e aplicação das seções dos materiais.....	73
4.2.7	Preparação para a análise.....	74
4.2.8	Elaboração da etapa de carregamento.....	75
4.2.9	Ligação entre elementos.....	76
4.2.10	Condições de apoio.....	76
4.2.11	Carregamento.....	77
4.2.12	Aplicação da Malha.....	77
5	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	81
6	CONCLUSÕES.....	98
7	RECOMENDAÇÕES PARA PRÓXIMAS PESQUISAS.....	100

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos decênios, tem-se observado um incremento substancial na demanda por produtos sustentáveis, motivada pela imperiosa necessidade de preservação ambiental. Esse fenômeno reflete uma consciência global emergente sobre os impactos ambientais adversos associados às práticas industriais tradicionais. Nesse contexto, têm-se intensificado as investigações científicas e tecnológicas voltadas ao desenvolvimento de materiais alternativos, cujo objetivo principal é não apenas aprimorar a qualidade de vida das populações, mas também promover uma significativa redução dos custos de produção e minimizar o consumo de energia.

No âmbito das indústrias madeireiras, há um vigoroso incentivo à inovação e à criação de materiais que possuam uma qualidade equivalente ou até superior àqueles já estabelecidos no mercado. Esse esforço não se restringe apenas à melhoria da qualidade, mas também visa proporcionar um custo de produção e aquisição substancialmente menor. Assim, surge a necessidade de explorar novas fontes de matéria-prima e processos produtivos mais eficientes.

Dentro desse cenário, destaca-se a utilização de resíduos lignocelulósicos, particularmente os resíduos de madeira, como uma alternativa promissora. Estes resíduos, que anteriormente eram considerados subprodutos sem valor agregado, estão sendo cada vez mais aproveitados na fabricação de painéis de madeira. Tais painéis não apenas se igualam, mas muitas vezes superam as propriedades mecânicas dos materiais convencionais disponíveis no mercado. Esse reaproveitamento de resíduos não apenas contribui para a redução do impacto ambiental, ao diminuir a quantidade de resíduos descartados, mas também promove uma economia circular, onde os subprodutos são reintegrados ao ciclo produtivo.

De acordo com Caraschi *et al.* (2009), os painéis estruturais de madeira são amplamente utilizados na construção civil, especialmente nos Estados Unidos, onde essa tecnologia se desenvolveu significativamente após a Segunda Guerra Mundial. A necessidade de reduzir perdas na indústria madeireira e na exploração florestal levou ao uso de resíduos de madeira para a produção de painéis, uma prática que não só economiza recursos, mas também protege as florestas naturais.

Os painéis de madeira, como MDF (Medium Density Fiberboard), MDP (Medium Density Particleboard) e painéis aglomerados, são produtos derivados de

madeira que oferecem soluções versáteis e sustentáveis para a construção civil. O MDF, conhecido por sua densidade e uniformidade, é ideal para acabamentos e usinagem precisa. O MDP, com sua estrutura em camadas de partículas de diferentes granulometrias, é amplamente utilizado na fabricação de móveis e estruturas que requerem resistência mecânica. Já os painéis aglomerados são compostos por partículas de madeira aglutinadas com resinas, resultando em um material econômico e flexível, adequado para diversas aplicações, porém ainda sem aplicação estrutural.

No Brasil, os painéis aglomerados são tradicionalmente fabricados com partículas de pinus e eucalipto, utilizando resinas como a ureia formaldeído (UF) como aglutinante. No entanto, a crescente conscientização sobre os impactos ambientais do desmatamento e a necessidade de preservar as florestas nativas têm incentivado o uso de madeiras de reflorestamento e subprodutos agroindustriais. Espécies como teca, seringueira, acácia e figueira branca são exemplos de madeiras de reflorestamento que podem substituir espécies nobres, contribuindo para a sustentabilidade e a redução da exploração de florestas naturais (Trevisan, 2021).

Outro aspecto importante é o uso de adesivos mais ecológicos, como o Poliuretano Reativo (PUR), na fabricação de painéis aglomerados. O PUR é um adesivo bicomponente derivado de petróleo e óleo de mamona, menos tóxico e mais sustentável que os adesivos tradicionais baseados em formaldeído. A adoção de PUR não só reduz o impacto ambiental, mas também melhora a qualidade e a durabilidade dos painéis, tornando-os uma escolha mais segura para o uso em ambientes internos e externos (Trevisan, 2021).

Paralelamente, a telha é outro material extremamente utilizado na construção civil, essencial nas edificações, desempenhando um papel crucial na proteção contra intempéries, no isolamento térmico e acústico, além de contribuir para a estética das construções. Entretanto, elas apresentam desafios relacionados ao peso e ao manuseio, o que frequentemente resulta em aumento nos custos de construção devido à necessidade de estruturas mais robustas para suportar a carga adicional. Isso também pode intensificar o impacto ambiental da obra. Estudos comparativos indicam que as telhas possuem baixa resistência à tração e à flexão, características que aumentam a probabilidade de rupturas (Araújo; Moraes; Altides, 2008).

No mercado atual, existe uma variedade de tipos de telhas, cada uma com suas características específicas e aplicabilidades. As telhas cerâmicas, metálicas, de

fibrocimento e as de concreto são algumas das mais tradicionais, oferecendo opções variadas em termos de resistência, durabilidade e custo. No entanto, com o avanço tecnológico, novos materiais e composições têm sido explorados para melhorar as propriedades dos produtos tradicionais, buscando não só eficiência funcional, mas também a sustentabilidade ambiental. Entre esses novos materiais, destacam-se as telhas de PRFV (Polímero Reforçado com Fibra de Vidro).

Telhas poliméricas, como materiais compósitos, têm se destacado como uma excelente alternativa para resolver os problemas relacionados à baixa resistência à tração e à flexão. Esses materiais consistem em uma combinação de dois ou mais componentes, geralmente uma matriz e um reforço, que juntos apresentam propriedades superiores às de cada componente isolado (Pinto, 2002).

As telhas de PRFV são telhas acrílicas leves, de alta resistência e excelente qualidade, produzidas a partir de painéis de fibra de vidro e resina poliéster. Estas telhas, que também são conhecidas como telhas translúcidas, tem sido cada vez mais utilizadas para reformas e construções de grande qualidade. Entretanto, a flexibilidade desses materiais pode, em alguns casos, por sobrecargas entre outras solicitações, não ser desejável. Desta forma, o reforço desses elementos, que são esbeltos e flexíveis, com outros materiais, inclusive com materiais de baixa condutividade térmica, colaborariam não só na questão mecânica, tornando-os mais rígidos e resistentes, mas também na questão térmica, deixando os ambientes mais confortáveis.

Considerando-se os aspectos referentes ao proposto acima, este trabalho tem por finalidade a análise do desempenho mecânico de telhas reforçadas com fibra de vidro em conjunto com painéis aglomerados de madeira. A utilização de PRFV para reforço de elementos de madeira é uma alternativa promissora, pois se trata de um material resistente a corrosão, que proporciona boa economia e um pequeno aumento do peso próprio (Araújo; Martins, 2022).

Para a produção desse material, os painéis aglomerados podem ser fabricados nos moldes e medidas das telhas, ou simplesmente conformados planos e a adequação às medidas das telhas serem feitas por colagem. Neste trabalho, para testar o desempenho mecânico desse conjunto em análise linear ou não linear fez-se o uso de ferramentas numéricas como por exemplo, o método dos elementos finitos.

A análise numérica, desde que bem calibrada, poupa tempo e recursos financeiros que seriam necessários para a execução física do experimento.

1.1 OBJETIVOS

A pesquisa tem por objetivo desenvolver um estudo numérico para avaliar o desempenho mecânico de telhas reforçadas com fibra de vidro associadas à painéis aglomerados de madeira.

O estudo envolverá a análise das flechas do conjunto em diferentes condições de contorno e a comparação com os limites normativos.

1.2 JUSTIFICATIVAS

Este trabalho é justificado pela necessidade de soluções construtivas sustentáveis e econômicas. O reaproveitamento de resíduos de madeira para a produção de painéis aglomerados contribui para a redução de desperdícios e a preservação ambiental. Além disso, a utilização de telhas de PRFV e painéis de madeira com adesivos ecológicos, como o Poliuretano Reativo (PUR), representa uma alternativa eficaz para diminuir custos e melhorar o desempenho mecânico das construções. A análise numérica do desempenho desses materiais oferece uma abordagem eficiente para avaliar e validar essas soluções, reduzindo a necessidade de testes físicos e acelerando o desenvolvimento de novos produtos.

2 ASPECTOS FUNDAMENTAIS

Neste item procura-se apresentar fundamentações básicas acerca dos painéis, das simulações numéricas, das normas de referência e das telhas reforçadas com fibra de vidro, úteis para o desenvolvimento da pesquisa.

Em relação aos painéis, serão apresentados alguns aspectos sobre o setor florestal brasileiro e sobre a produção de painéis aglomerados. Especialmente relembrar, assim como já foi apontado na introdução, o que é um painel de partículas, como é produzido, qual adesivo utilizado e dar foco nos detalhes da pesquisa desenvolvida por Trevisan (2021) em que os resultados das propriedades mecânicas, em particular da rigidez serão obtidos dos compósitos fabricados pela autora.

Sobre as simulações numéricas, serão apresentados fundamentos sobre o método dos elementos finitos para análise linear, física e geométrica de materiais estruturais.

Também serão abordados conceitos sobre as telhas mais comuns utilizadas na construção civil, em especial as telhas reforçadas com fibra de vidro, que é o foco para o estudo em questão.

Por fim, serão apresentadas as normas específicas para o presente estudo, como a NBR 6120/2019 – Ações para o cálculo de estruturas de edificações, a NBR 7190/2022 – Projeto de estruturas de madeira e NBR 8681/2003 - Ações e segurança nas estruturas.

2.1 ASPECTOS SOBRE O SETOR FLORESTAL BRASILEIRO

Para compreender o tema abordado, é essencial analisar o cenário atual do setor florestal brasileiro e sua importância. O Brasil possui 64,3% de sua área coberta por vegetação, sendo 57,3% desse total composto por florestas, o que equivale a aproximadamente 487 milhões de hectares. Desse total, 98% são florestas naturais e 2% são florestas plantadas (Sistema Nacional de Informações Florestais – SNIF, 2020). No contexto global, o Brasil ocupa a segunda posição, atrás apenas da Rússia, entre os cinco países com maior área de florestas (Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura - FAO, 2015).

O setor florestal brasileiro é crucial, influenciando diversos setores, especialmente a economia, além de contribuir para a educação e pesquisa. Em 2018, o setor empregou 1,25% dos trabalhadores formais, com cerca de 30% atuando na indústria moveleira e outros 30% na produção de papel e celulose. Na área de educação e pesquisa, no mesmo ano, foram criados 11 Programas de Pós-Graduação em Engenharia Florestal e Recursos Florestais, distribuídos em 43 cursos em 23 Instituições de Ensino Superior (SNIF, 2019).

A atividade florestal e sua cadeia produtiva, incluindo o cultivo de árvores para fins industriais, impulsionam a economia e outros setores no Brasil. Florestas plantadas geram uma variedade de produtos, como madeira serrada, papel, celulose, painéis de madeira e carvão vegetal. Além de serem matérias-primas recicláveis, essas florestas também fornecem energia para as indústrias (IBÁ, 2019).

No total de áreas de árvores plantadas, o eucalipto e o pinus são as espécies mais representativas, constituindo aproximadamente 76% e 20%, respectivamente (SNIF, 2020). Outras espécies, como seringueira, acácia e teca, contribuem em menor escala (IBÁ, 2019).

A Figura 1 apresenta graficamente a variação na área de florestas plantadas entre os anos de 2018 e 2019. Em 2019, a área total de florestas plantadas alcançou 9 milhões de hectares, representando um incremento de 2,4% em comparação aos 8,79 milhões de hectares registrados em 2018. Desse total, 77% são constituídos pelo cultivo de eucalipto, enquanto 18% correspondem ao cultivo de pinus. Adicionalmente, há uma parcela menor, totalizando 0,39 milhão de hectares, destinada ao plantio de outras espécies, como seringueira, acácia, teca e paricá (IBÁ, 2020).

Figura 1 – Área de florestas plantadas no Brasil



Fonte: IBÁ, 2020

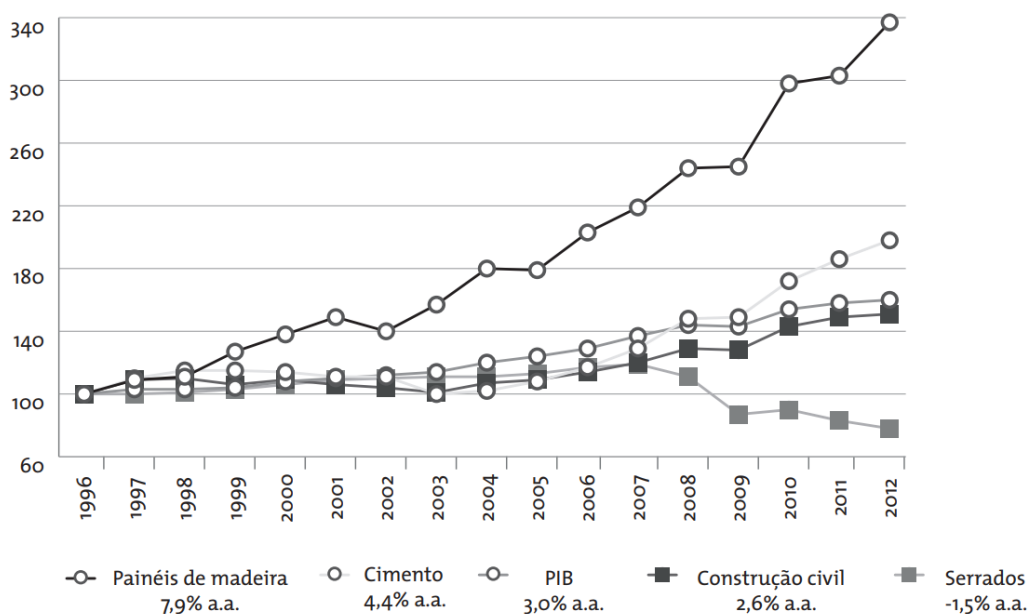
Assim, o setor de árvores plantadas tem sido considerado de grande relevância e um indicador significativo de desenvolvimento econômico, social e ambiental no país. Dada a importância desse setor para a economia, que é capaz de promover mudanças econômicas locais, criar oportunidades de emprego e gerar renda para a população, é essencial destacar a necessidade de estudar alternativas que possam fortalecer e expandir esse setor, especialmente diante dos desafios enfrentados pelo país (Trevisan, 2021).

2.2 SETOR INDUSTRIAL DE PAINÉIS DE MADEIRA NO BRASIL

O mercado de painéis de madeira no Brasil tem demonstrado um crescimento significativo e está em expansão nos últimos anos. As indústrias produtoras desses painéis desempenham um papel crucial como fornecedoras de materiais para diversos setores, incluindo a indústria de móveis e a construção civil. Esse setor tem passado por transformações importantes, impulsionadas por diversos fatores, especialmente na busca por alternativas à madeira maciça. Os painéis de madeira são excelentes substitutos, oferecendo qualidade comparável ou até superior. Entre as principais opções disponíveis no mercado estão o aglomerado MDP, MDF, OSB, chapa de fibra e compensado (Mattos *et al.*, 2008; ABRAF, 2013).

Durante o período de 1996 a 2012, o mercado nacional de painéis de madeira apresentou um crescimento anual de demanda de 7,9%, enquanto o mercado de cimento cresceu 4,4%, o PIB aumentou 3%, a construção civil registrou um crescimento de 2,6%, e o mercado de madeira serrada apresentou um decréscimo de -1,5%, conforme ilustrado na Figura 2. Esse crescimento na demanda por painéis de madeira pode ser atribuído principalmente ao aumento do poder aquisitivo da população (Vidal; Hora, 2014).

Figura 2 – Comparativo da Demanda (Painéis de Madeira, Cimento, PIB, Construção Civil e Serrado) entre os anos de 1996 e 2012



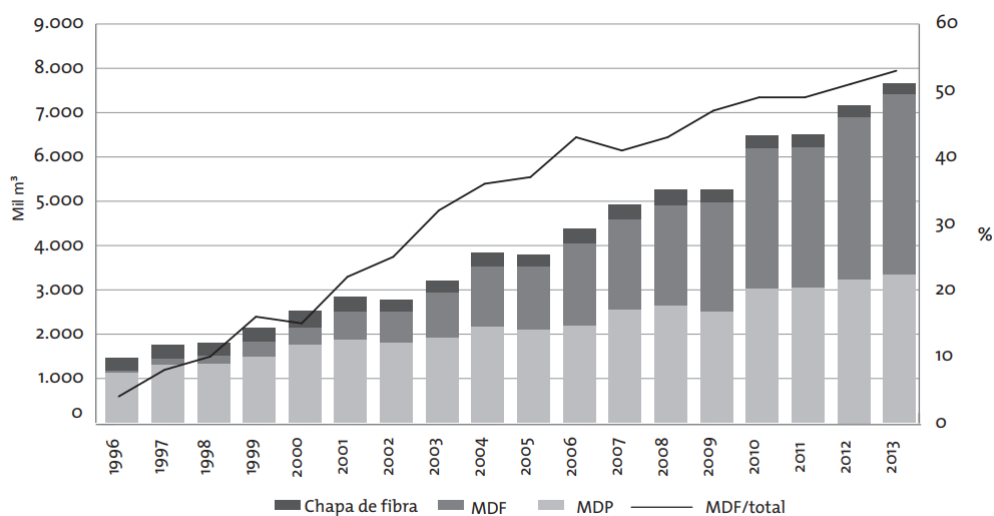
Fonte: Vidal e Hora (2014).

O consumo de painéis de madeira reconstituída cresceu a uma taxa média anual de 10,2% entre 1996 e 2013. Em 2012, esses painéis representavam 82% das vendas de todos os tipos de painéis de madeira consumidos no Brasil, conforme mostrado na Figura 3. De acordo com dados da Associação Brasileira da Indústria de Painéis de Madeira (ABIPA), o MDF foi o produto que mais cresceu em termos de consumo no período analisado (Vidal; Hora, 2014).

Vidal et al. (2014) fornecem algumas explicações para o aumento do consumo de MDF e a redução do consumo de MDP, ao analisar essas informações.

Algumas das razões para o crescimento do MDF em comparação ao MDP incluem: (i) uma gama mais ampla de aplicações, como em pisos; (ii) substituição de madeira serrada e chapa de fibra; (iii) maior capacidade de usinagem e facilidade de trabalho, tornando-o preferido por marceneiros; e (iv) uma estratégia de marketing bem-sucedida que posicionou o MDF como "superior" ao MDP em todas as aplicações, apesar de sua principal vantagem ser a capacidade de usinagem.

Figura 3 – Comparativo da Demanda (Painéis de Madeira, Cimento, PIB, Construção Civil e Serrado) entre os anos de 1996 e 2013



Fonte: Vital e Hora (2014).

De acordo com o anuário estatístico de 2013 da Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF), a produção anual de painéis de madeira aumentou de 3,1 milhões de toneladas para 7,3 milhões entre 2002 e 2012, apresentando um crescimento médio anual de 8,9%. Como resultado, o consumo anual de painéis de madeira também aumentou. Em 2012, por exemplo, a produção de painéis cresceu 12,3%, enquanto o consumo aumentou 10,8%, conforme ilustrado na Figura 4.

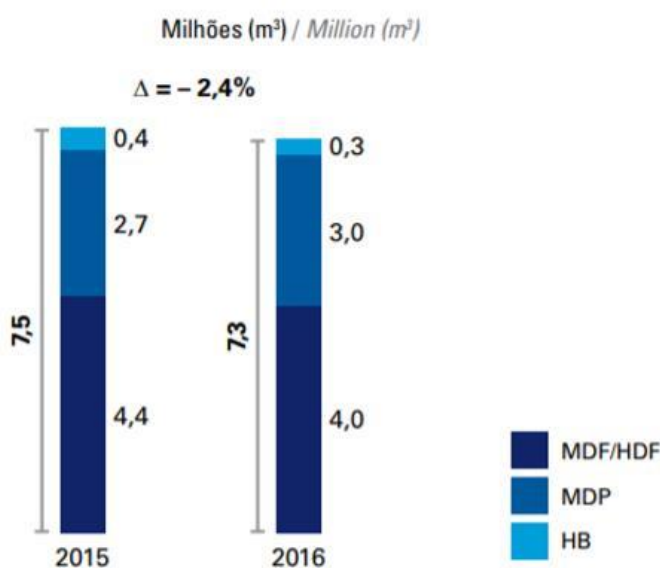
Figura 4 – Histórico de produção e consumo de painéis de madeira industrializada no Brasil, 2002-2012



Fonte: Anuário Estatístico ABRAF (2013).

Em 2016, de acordo com a Indústria Brasileira das Árvores (IBA), houve uma redução de 2,4% na produção de painéis de madeira reconstituída em comparação a 2015, totalizando 7,3 milhões de m³ produzidos no final do ano. Conforme mostrado na Figura 5, observou-se uma queda na produção de painéis do tipo MDF/HDF e HB. Em contrapartida, a produção de MDP aumentou 8,9%.

Figura 5 – Comparação da produção brasileira de painéis de madeira reconstituídos dos anos de 2015 e 2016



Fonte: Relatório anual IBÁ (2017).

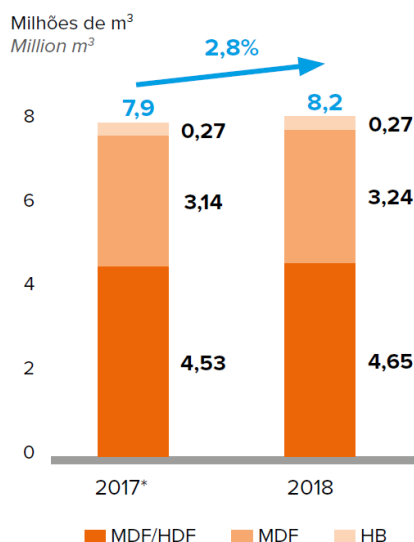
Essa queda pode ser atribuída a vários fatores, incluindo a redução do consumo das famílias, o que levou a uma diminuição na compra desses produtos. Esse fenômeno é explicado pela deterioração da confiança na economia brasileira, juntamente com mudanças nos programas governamentais de incentivo ao consumo durante o período em questão (IBÁ, 2017).

Além disso, em 2016, o Brasil ocupou o 8º lugar no ranking mundial dos maiores produtores de painéis de madeira reconstituída. As unidades produtoras de painéis no país estão concentradas nas regiões Sul e Sudeste (IBÁ, 2017).

Em 2018, a Indústria Brasileira das Árvores (IBA) informou que a produção brasileira de painéis de madeira reconstituída atingiu 8,2 milhões de m³, mantendo o país no 8º lugar no ranking mundial. Nesse ano, houve um aumento de 2,8% em relação a 2017. Conforme ilustrado na Figura 6, houve um aumento na produção de diversos tipos de painéis, incluindo um crescimento de 3,4% na produção de MDP. Os

sinais de evolução e melhora nos últimos anos podem ter uma influência positiva na economia brasileira, incentivando o consumo no mercado interno (IBÁ, 2019).

Figura 6 – Comparação da produção brasileira de painéis de madeira reconstituída dos anos de 2017 e 2018



Fonte: Relatório anual IBÁ (2017).

Um dos fatores competitivos que contribuiu para o desenvolvimento da indústria brasileira de painéis de madeira são os constantes investimentos em modernização na produção de MDP e MDF. Esses investimentos permitiram à indústria reduzir os custos de produção na década de 1990, especialmente com a introdução de prensas contínuas. Outro investimento significativo que impulsionou o desenvolvimento do setor é o Parque Industrial Brasileiro, considerado um dos mais avançados do mundo (Biazus; Hora; Leite, 2010).

Contudo, apesar do crescimento desse mercado e da facilidade de acesso, um fator impediu que o crescimento histórico fosse ainda mais acentuado: a dificuldade em integrar o processo de produção. Isso se deve à indisponibilidade de terras, à falta de tecnologia adequada e à complexidade da logística de suprimento e fornecimento de matérias-primas para sustentar o processo produtivo (Biazus; Hora; Leite, 2010).

2.3 PAINÉIS DE MADEIRA AGLOMERADA

2.3.1 Definição e características

Os painéis de madeira aglomerada são definidos como chapas formadas por partículas de madeira seca, aglutinadas com um adesivo sintético termofixo (Molesmi, 1974; Tsoumis 1991 *apud* Guimarães, 2008). Após a avaliação de suas propriedades mecânicas e físicas, esses materiais podem ser utilizados em diversos setores da construção civil, como em forros e componentes estruturais (Cravo et al., 2017).

Existem diversos tipos de chapas no que se refere a painéis de madeira. Originalmente, podem ser fabricados a partir de madeira maciça ou processada. No caso da madeira processada, o grau de processamento pode variar, permitindo a produção de painéis com lâminas, partículas ou fibras de madeira. Exemplos conhecidos incluem o painel laminado (LVL), painel de tiras orientadas (OSB), painel de partículas de média densidade (MDP) e painel de fibras de média densidade (MDF) (Thoemen *et al.*, 2010).

Os painéis aglomerados podem ser produzidos a partir de qualquer material lignocelulósico, devido à composição similar à da madeira (Fiorelli *et al.*, 2012). Recursos alternativos, como resíduos de colheita, cascas de arroz, papel reciclado, palha de trigo, cascas de coco, entre outros, têm sido utilizados como substitutos da madeira na produção de painéis aglomerados. Essa substituição é motivada pelo esgotamento dos recursos florestais, trazendo benefícios econômicos e ambientais (Ciannamea, 2010).

Além disso, painéis aglomerados de madeira podem ser produzidos a partir de uma ou mais espécies de madeira, incluindo resíduos industriais, madeira de exploração florestal, madeira de qualidade inferior, madeira de florestas plantadas ou madeira reciclada (Mattos *et al.*, 2008).

No Brasil, a indústria de painéis de madeira aglomerada utiliza principalmente madeiras de reflorestamento, como o pinus e algumas espécies de eucalipto, para garantir uma chapa de melhor qualidade devido ao controle da homogeneidade da matéria-prima (Fiorelli *et al.*, 2012). Outra madeira utilizada é a da seringueira, que,

após o fim de sua vida útil para extração de látex, pode ser aproveitada para a fabricação de móveis e produção de painéis (Gonçalves, 2002).

O aglomerado, conhecido internacionalmente como Medium Density Particleboard (MDP), é definido pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT 14810-1, 2018a) como um painel com densidade entre 551 kg/m³ e 750 kg/m³, consolidado por meio de calor e pressão, com partículas aglutinadas por resina sintética termofixa. A conformação das partículas é realizada através de uma prensa que aplica pressão e temperatura contínua. A resina é um componente crucial, responsável por aglutinar as partículas e conferir resistência ao painel (Araujo *et al.*, 2019).

Os adesivos à base de ureia-formaldeído e fenol-formaldeído são amplamente utilizados na indústria de painéis aglomerados devido à sua homogeneidade. No entanto, há um crescente interesse em utilizar produtos biodegradáveis, não poluentes e que não prejudiquem o meio ambiente e a saúde humana, incentivando pesquisas sobre alternativas, como o adesivo PUR (Fiorelli *et al.*, 2012).

2.3.2 Histórico

O desenvolvimento dos painéis aglomerados teve início durante a Segunda Guerra Mundial, na década de 1940, na Alemanha, devido à dificuldade em obter madeiras de alta qualidade. Na época, a utilização de resíduos de madeira para a produção de painéis compensados foi vista como uma solução para a escassez de materiais provocada pela guerra (Guimarães, 2008; Iwalkiri, 2005; Caraschi, 2009).

No Brasil, os painéis de madeira aglomerada começaram a se desenvolver no início dos anos 60 (Caraschi, 2009). Inicialmente, o material enfrentou dificuldades no mercado devido a limitações técnicas, como alta absorção de água e inchamento de espessura. Contudo, com o avanço da tecnologia, esses problemas foram sendo minimizados, tornando o aglomerado um produto importante para o setor moveleiro do país (Melo, 2009).

A partir dos anos 90, houve um aumento nos investimentos em tecnologia de produção de painéis no Brasil. As fábricas se modernizaram e ampliaram sua capacidade, o que estimulou o consumo de MDP no mercado brasileiro. A evolução dos painéis aglomerados no país foi impulsionada pela crescente conscientização dos

consumidores sobre a qualidade do material, que se mostrou adequado para uso em móveis e na indústria da construção (Mattos *et al.*, 2008).

2.3.3 Utilização e vantagens

A principal aplicação dos painéis de madeira está nos setores de móveis e construção civil. Suas limitações são geralmente relacionadas às propriedades físicas e mecânicas, como estabilidade dimensional, uniformidade da superfície e resistência mecânica, que podem restringir o uso desse material (ABIMCI, 2009 *apud* Weber; Iwakiri, 2015).

Segundo Mattos *et al.* (2008), o uso do MDP é especialmente recomendado para móveis retilíneos, como tampos de mesas, laterais de armários, estantes e divisórias, sendo utilizado secundariamente na construção civil. Para a fabricação de móveis que requerem maior versatilidade, utiliza-se o MDF, que é fabricado com um processo similar ao do MDP, mas utilizando fibras de madeira, o que resulta em um material com maior grau de desagregação.

Os painéis aglomerados apresentam várias vantagens em comparação à madeira maciça. A principal é a eliminação do efeito da anisotropia (Melo, 2009; DIAS, 2005), o que significa que esses painéis têm propriedades físicas e mecânicas consistentes, independentemente da direção de análise.

Outros benefícios do uso de aglomerados incluem a eliminação de fatores que reduzem a resistência, como nós, inclinação de grãos e lenho juvenil; controle das propriedades físico-mecânicas por meio das variáveis de produção, como resina e geometria das partículas; e menor custo de produção e mão de obra (Melo, 2009; Bodig; Jayne, 1982 *apud* Dias, 2005).

A madeira maciça apresenta limitações quanto ao diâmetro e comprimento das toras, o que impede a obtenção de peças de grandes dimensões. Por outro lado, os painéis aglomerados permitem a produção de peças maiores, eliminando essa restrição e possibilitando um aproveitamento mais eficiente do material lenhoso de uma árvore (Espósito, 2007 *apud* Muzel, 2013).

Assim, a utilização de painéis aglomerados resulta em impactos positivos nos âmbitos técnico, econômico, social e ambiental. Segundo Macedo (2008, p. 2), esses

painéis oferecem uma alternativa de reciclagem, agregação de valor e destinação adequada dos resíduos, mitigando riscos à saúde pública e ao meio ambiente.

Em resumo, os painéis aglomerados proporcionam uma solução sustentável para o aproveitamento de resíduos de madeira e derivados, contribuindo para o desenvolvimento técnico, socioeconômico e socioambiental, além de promover o desenvolvimento sustentável (Trevisan, 2021).

2.3.4 Classificação do MDP

De acordo com os parâmetros físicos e mecânicos analisados, os painéis de madeira podem ser classificados para diferentes tipos de uso. Os principais fatores físicos avaliados incluem espessura, largura, comprimento, densidade, teor de umidade e inchamento após 24 horas de imersão em água.

Os principais parâmetros relacionados às características mecânicas dos painéis analisados são o módulo de resistência à flexão estática (MOR), o módulo de elasticidade (MOE), a resistência à tração perpendicular ou adesão interna (TP) e a resistência ao arrancamento de parafusos.

Segundo a NBR 14810-2 da ABNT (2018b), com base na análise desses parâmetros, os painéis de média densidade (MDP) podem ser classificados em seis tipos de acordo com seu uso estrutural ou não estrutural em determinados ambientes:

- a. P2 – Painéis não estruturais para uso interno em condições secas;
- b. P3 – Painéis não estruturais para uso em condições úmidas;
- c. P4 – Painéis estruturais para uso em condições secas;
- d. P5 – Painéis estruturais para uso em condições úmidas;
- e. P6 – Painéis estruturais para uso em condições severas de carga, em ambientes secos;
- f. P7 – Painéis estruturais para uso em condições severas de carga, em ambientes úmidos.

2.3.5 Processo de fabricação

A fabricação de um painel de madeira aglomerada começa com a produção e preparação das partículas através do processamento da madeira. As fontes para

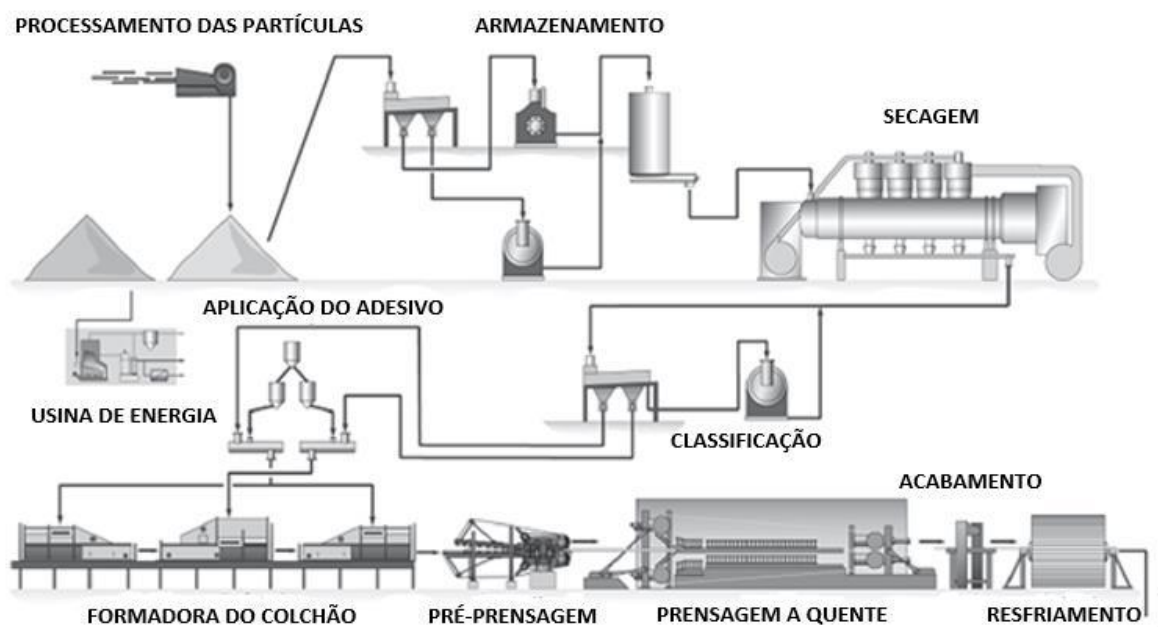
obtenção dessas partículas são variadas, incluindo florestas plantadas e resíduos de indústrias madeireiras (Iwakiri, 2005).

Após o processamento inicial, as partículas são secas e classificadas por tamanho, com a remoção de impurezas e "finos". Em seguida, é aplicado um adesivo na superfície das partículas, formando um colchão de partículas impregnado com o adesivo (Iwakiri, 2005).

Esse colchão é então pré-prensado para reduzir sua altura e o tempo necessário para a prensagem a quente (Thoemen *et al.*, 2010). A etapa final envolve a prensagem a quente do colchão de partículas, utilizando uma prensa hidráulica para aplicar pressão e temperatura contínuas. Após a prensagem, o painel é resfriado por um mínimo de 72 horas e, em seguida, as chapas são lixadas para ajustes nas dimensões. O painel pode ser pintado ou revestido conforme necessário (Iwakiri, 2005).

A Figura 7 ilustra as principais etapas do processo de fabricação industrial dos painéis aglomerados.

Figura 7 – Principais etapas do processo de uma linha de produção de aglomerado



Fonte: Adaptado de Thoemen *et al.*, 2010.

2.3 ADESIVOS

O adesivo é um componente crucial no desenvolvimento de produtos derivados da madeira, pois facilita a adesão eficaz entre as partículas de madeira através de reações químicas. Isso garante a coesão e integridade estrutural dos painéis, resultando em produtos de alta qualidade e desempenho.

A utilização de adesivos na produção de produtos derivados da madeira oferece várias vantagens. Ela permite a união de diferentes materiais, aumenta a resistência do produto às agressões ambientais e contribui para a redução de custos. Essas vantagens são possíveis graças às reações químicas que promovem forças interfaciais, podendo ser de natureza mecânica, eletromagnética, molecular, termodinâmica ou por difusão (MANO, 1991).

2.3.1 Definição, classificação e histórico

De acordo com a ABNT 14810-1 (2018a), adesivo ou resina é definido como qualquer substância utilizada para aderir partículas de madeira em um painel, podendo ser de origem orgânica ou inorgânica. Iwakiri (2005) define adesivo como um material com propriedades aderentes características, capaz de manter unidos outros materiais em suas superfícies.

A utilização de adesivos é uma prática antiga, que remonta a tempos remotos. A principal evolução nessa área ocorreu durante a Primeira Guerra Mundial, quando o uso de adesivos derivados de proteínas animais era predominante. Novas alternativas começaram a surgir, incluindo adesivos que podiam ser usados em temperatura ambiente e eram resistentes à água. Na década de 1930, as primeiras resinas à base de formaldeído foram introduzidas no mercado, especialmente para a produção de móveis e madeira compensada para interiores (Dias, 2005).

A Tabela 1 apresenta a classificação de Iwakiri (2005) para os adesivos de colagem de madeiras, incluindo alguns exemplos. Já a Tabela 2 (Prata, 2010) demonstra a classificação dos adesivos, o ambiente de uso e os respectivos tipos.

Tabela 1 – Classificação dos adesivos

Classificação	Exemplos
Naturais	Derivados de origem animal (couro, pele, ossos, leite, albumina do sangue); derivados proteicos de origem vegetal (soja); borracha natural
Sintéticos Termoplásticos	Polivinil/acetato; polietileno; poliestirol; borracha sintética
Sintéticos Termoendurecedores/termofixos	Uréia-formaldeído; Melamina-formaldeído; Fenol-formaldeído

Fonte: Iwalkiri (2005) adaptado.

Tabela 2 – Classificação dos adesivos de painéis de madeira conforme o ambiente de uso

Classificação dos adesivos	Ambiente de uso	Tipos de Adesivos
ESTRUTURAL	Exterior	Fenol-formaldeído (FF) Resorcinol-formaldeído (RF) Fenol-resorcinol-formaldeído (FRF)
		Emulsão polímero/isocianato
		Melamina-formaldeído (MF) Melamina-uréia-formaldeído (MUF)
	Exterior Limitado	Isocianato Epóxi
SEMIESTRUTURAL	Interior	Ureia-formaldeído (UF) Caseína
	Exterior Limitado	Polivinil acetato “crosslinking” Poliuretano
		Polivinil acetato (PVAc)
NÃO ESTRUTURAL	Interior	Animal Soybean “Hot-melt” Amido

Fonte: Prata (2010) *apud* Molleken (2017)

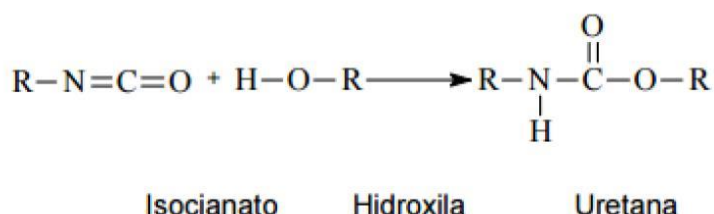
Novas tecnologias, desenvolvidas após a Segunda Guerra Mundial, possibilitaram a criação dos primeiros adesivos de poliuretano, liderados pela empresa Bayer na Alemanha. Na década de 1980, o Departamento de Química e Física Molecular do Instituto de Química de São Carlos da USP contribuiu para a expansão dessa tecnologia no Brasil. Essa colaboração resultou no desenvolvimento

da resina PUR (poliuretano), que apresenta diversas vantagens, como a manipulação em temperatura ambiente, resistência à água e resistência mecânica. Além disso, essa resina é derivada de recursos naturais e renováveis (Jesus, 2000).

2.3.2 Resina Poliuretano PU-Mamona

O polímero poliuretano é formado através de uma polimerização por condensação, onde grupos hidroxilas reagem com isocianatos. De acordo com a Figura 8, o poliuretano pode ser definido como um grupo de uretano presente na cadeia principal da molécula, caracterizando-se pela sua versatilidade e variedade de aplicações.

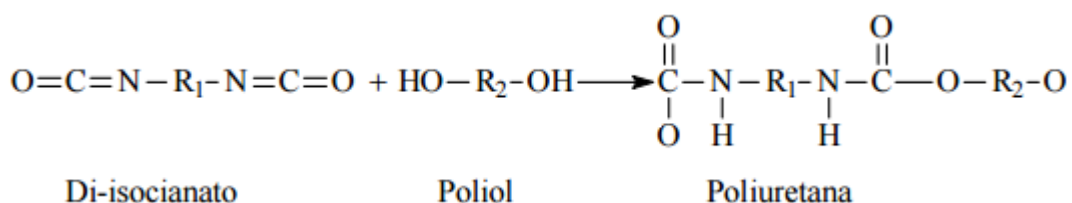
Figura 8 - Reação de formação do grupo uretano



Fonte: Vilar (2010) *apud* Molleken (2017)

A resina PUR (poliuretano) é obtida através de uma reação química entre um polioli e um isocianato, resultando na formação do adesivo poliuretano (Molleken, 2017). Essa reação é ilustrada na Figura 9, onde se observa a combinação dos dois componentes para formar o produto final, o adesivo de poliuretano.

Figura 9 - Reação de polimerização do poliuretano à base de óleo de mamona



Fonte: Vilar (2010) *apud* Molleken (2017)

O adesivo mais comumente utilizado como componente aglutinante nas indústrias de painéis é a resina sintética ureia-formaldeído, seguida pelas resinas fenol-formaldeído e melanina-formaldeído. Alguns desses adesivos têm

desvantagens, como baixa resistência à umidade, curta estabilidade e tempo de armazenagem reduzido. Além disso, quando aquecidos, liberam formaldeído, o que pode ser prejudicial ao meio ambiente (Araujo *et al.*, 2019; Zau *et al.*, 2014).

Devido aos problemas associados ao formaldeído presente nos adesivos tradicionais, há uma busca por alternativas que sejam menos prejudiciais ao ser humano e ao meio ambiente. A resina PUR (poliuretano) é uma opção potencial para substituição, oferecendo várias vantagens em relação aos adesivos sintéticos à base de formaldeído. Além de ser derivada de biomassa, a resina PUR apresenta benefícios como menores temperaturas de prensagem, o que reduz os custos de energia, não emana formaldeído e proporciona um produto com alta resistência à umidade (Bertolini, 2014; Dias, 2005).

O óleo de mamona é um líquido viscoso extraído das sementes da planta *Ricinus communis*, que pertence à família das euforbiáceas. No Brasil, essa planta é conhecida como mamona ou caturra, enquanto no exterior é chamada de "Castor Oil". A mamona cresce predominantemente em regiões tropicais e subtropicais, sendo encontrada em abundância no Brasil (Dias, 2005).

Os polióis são produzidos a partir do óleo de mamona, enquanto o pré-polímero é derivado de produtos químicos menos agressivos derivados do petróleo. A combinação desses componentes resulta na formação do poliuretano. Quando os dois constituintes são misturados a frio, ocorre uma reação de polimerização que conduz à formação da resina de poliuretano. A dureza da resina pode ser ajustada variando-se a porcentagem de polióis adicionados. Além disso, a quantidade de adesivo utilizada é um fator crucial na fabricação de painéis aglomerados, devendo ser determinada com base no peso seco das partículas, podendo variar entre 5% e 10% (Dias, 2005).

Dias (2005) estudou a utilização de resina de poliuretano na fabricação de painéis compensados e aglomerados, utilizando espécies de reflorestamento como *Pinus elliottii*, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. A quantidade de resina utilizada foi de 10% em relação à massa seca das partículas. O desempenho dos painéis foi avaliado por meio de ensaios físicos e mecânicos, comparando-se com os padrões da ABNT. Os resultados indicaram que a resina PUR é uma alternativa promissora para a produção de painéis aglomerados.

Müzel (2013) utilizou resinas à base de ureia-formaldeído e poliuretano derivado do óleo de mamona, sendo a última na proporção de 12% em relação à massa seca, na produção de painéis aglomerados de *Hevea brasiliensis*. Além de demonstrar a viabilidade do uso de partículas de seringueira como matéria-prima para painéis aglomerados, o adesivo poliuretano mostrou-se mais adequado para a produção de chapas em camadas, proporcionando melhores características físico-mecânicas.

Gilio (2020) utilizou a resina PUR nas proporções de 5% e 10% na produção de painéis aglomerados com as espécies *Hevea brasiliensis* e *Tectona grandis*. Os resultados que apresentaram melhor desempenho foram os painéis produzidos com 10% de PUR. Segundo a autora, esses bons resultados se devem ao maior recobrimento das partículas pela resina.

Varanda (2018) produziu painéis de partículas homogêneas de alta densidade com resíduos de *Pinus elliottii* e casca de *Avena sativa* (aveia), utilizando dois tipos de adesivo: PUR e melamina-formaldeído. Na produção dos painéis, foram utilizadas variações de 11% e 13% na proporção de adesivo em relação às partículas secas. Concluiu-se que os painéis produzidos com o adesivo PUR apresentaram melhor desempenho físico em comparação com os painéis produzidos com adesivo melamina-formaldeído.

2.4 MATERIAIS E RESULTADOS DA DISSERTAÇÃO DE REFERÊNCIA

As propriedades mecânicas dos painéis utilizadas neste estudo, após revisão bibliográfica, foram baseadas na dissertação de mestrado de Trevisan (2021), que investigou três tratamentos distintos: 100% seringueira, 100% pinus e uma combinação de 70% seringueira e 30% pinus. O estudo foi escolhido, dentre dezenas de outros trabalhos em revisão bibliográfica, por realizar ensaios experimentais com resultados específicos de cada mistura, contribuindo para a aplicação da simulação numérica.

Neste item, serão apresentados os resultados obtidos da dissertação. Propriedades como densidade, Módulo de resistência à flexão estática (MOR) e Módulo de Elasticidade (MOE) estarão abaixo detalhadas.

Na produção dos painéis, foram utilizadas misturas de partículas de seringueira e pinus, aglutinadas com adesivo.

Foram definidas três misturas, conforme apresentado na Tabela 3 por Trevisan, 2021, com o objetivo de avaliar a variável tipo de madeira.

As misturas foram compostas por 100% de cada espécie de madeira e uma combinação de 30% e 70% de cada tipo. A porcentagem de adesivo foi fixada em 10% em relação ao peso das partículas secas para todos os painéis.

Tabela 3 – Misturas definidas para a confecção dos painéis

Misturas	Seringueira (%)	Pinus (%)	PUR (%)
M _{100%S}	100	0	10
M _{70%S30%P}	70	30	10
M _{100%P}	0	100	10

Fonte: Trevisan (2021)

As densidades foram medidas usando 10 corpos de prova de três painéis de cada mistura. Os resultados mostrados na Tabela 4 representam os valores médios de densidade e a variação percentual (D%), com uma precisão de 1%, conforme indicado pela ABNT (2018).

Tabela 4 – Densidade dos painéis.

Misturas	M_{100S}		M_{70S30P}		M_{100P}	
	D Média (g/cm³)	D (%)	D Média (g/cm³)	D (%)	D Média (g/cm³)	D (%)
Valor Mínimo	0,894	1	0,861	4	0,860	4
Valor Máximo	0,923	2	0,918	3	0,939	5
Média	0,905	-	0,894	-	0,893	-
Desvio Padrão	0,0095	-	0,017	-	0,0269	-
CV (%)	1,10	-	2,00	-	3,13	-

Fonte: Trevisan (2021)

A Tabela 5 resume os resultados obtidos nos ensaios, incluindo os valores de MOR dos corpos de prova, o desvio padrão e o coeficiente de variação. Além disso, a

tabela apresenta as classificações dos painéis de acordo com as normas brasileira e americana.

Tabela 5 - Módulo de resistência à flexão estática (MOR)

Misturas	M_{100S}	M_{70S30P}	M_{100P}
	MOR (MPa)	MOR (MPa)	MOR (MPa)
Valor Mínimo	11,66	12,86	14,09
Valor Máximo	16,39	17,05	20,51
Média	13,53	14,44	16,89
Desvio Padrão	1,24	1,29	2,16
CV (%)	9,18	8,91	12,82
Classificação NBR	P2	P2	P2, P3, P4
Classificação ANSI	M-0, M-1, M-S, M-2	M-0, M-1, M-S, M-2	M-0, M-1, M-S, M-2, M-3, H-1

Fonte: Trevisan (2021)

Os resultados médios obtidos com o ensaio para determinação do MOE, estão apresentados na Tabela 6, com suas respectivas classificações.

Tabela 6 - Módulo de Elasticidade (MOE)

Misturas	M_{100S}	M_{70S30P}	M_{100P}
	MOE (MPa)	MOE (MPa)	MOE (MPa)
Valor Mínimo	1969	2061	2201
Valor Máximo	2322	2495	2558
Média	2174	2306	2352
Desvio Padrão	106,94	156,57	99,47
CV (%)	4.92	6.79	4.23
Classificação NBR	P2, P3	P2, P3, P4	P2, P3, P4, P5
Classificação ANSI	M-0, M-1, M-S, M-2, H-1, H-2	M-0, M-1, M-S, M-2, H-1, H-2	M-0, M-1, M-S, M-2, H-1, H-2

Fonte: Trevisan (2021)

A escolha do trabalho de Trevisan (2021) como referência deve-se aos resultados obtidos através de ensaios experimentais.

2.5 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A resolução de problemas de engenharia, de forma generalizada, pode ser realizada através de três abordagens principais: métodos analíticos, métodos experimentais e métodos numéricos. Os métodos analíticos envolvem soluções baseadas em fórmulas matemáticas, geralmente desenvolvidas de forma manual. Os métodos experimentais dependem da construção de protótipos físicos do equipamento ou produto, que podem ser em escala real ou reduzida. Por fim, a solução por meio de métodos numéricos envolve o desenvolvimento de um protótipo virtual do produto de interesse, representado por um sistema de equações fundamentadas em uma teoria matemática (Silva, 2017),

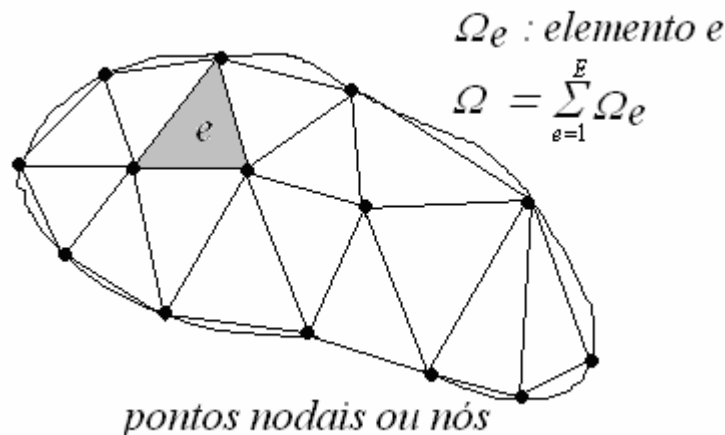
Entre os métodos numéricos, destaca-se a análise por elementos finitos, que tem sido amplamente aplicada em diversas áreas da engenharia.

Acerca do Método dos elementos finitos, procura-se apresentar, em linhas gerais, a fundamentação que leva à solução de uma estrutura no âmbito da análise linear, física e geométrica.

O método dos elementos finitos (MEF), também conhecido como análise de elementos finitos (AEF), é um método numérico geral utilizado para a aproximação de soluções de equações diferenciais ordinárias e parciais. É amplamente empregado para obter soluções aproximadas em diversos problemas de engenharia (Molina, 2010). Ele permite a simulação de situações reais em um espaço discreto, onde o limite infinitesimal tende ao contínuo. A visualização computacional tem acompanhado a implementação dos cálculos realizados por esse método, permitindo uma análise visual das situações determinadas por meio do cálculo numérico (Alves, 2007).

A ideia básica do Método dos Elementos Finitos consiste em subdividir o domínio do problema em subdomínios de dimensões finitas, de modo que o conjunto de todos os subdomínios seja igual ao domínio original. Em cada subdomínio, isoladamente, adota-se um comportamento aproximado e local para as incógnitas do problema. Esta abordagem é ilustrada na Figura 10.

Figura 10 - Rede de pontos nodais do Domínio, Ω e dos Subdomínios, Ω_e .



Fonte: Alves (2007)

Em geral, esse comportamento local é descrito utilizando funções simples. A principal característica desse procedimento é o uso de aproximações locais nos subdomínios em que o domínio original foi dividido, em vez de utilizar aproximações de caráter global. Para obter respostas mais precisas, aumenta-se o número de subdomínios, mantendo o mesmo comportamento local em cada um, ao invés de adotar funções de ordem maior para uma aproximação global. Esses subdomínios são denominados elementos finitos (Alves, 2007).

Os elementos finitos são definidos por sua forma geométrica, pelas funções de aproximação adotadas e pelos tipos de problemas para os quais foram desenvolvidos. Cada elemento possui um número determinado de pontos nodais, ou nós, que podem ser internos ou externos. Os nós externos são responsáveis por conectar o elemento aos elementos vizinhos (Alves, 2007).

Nos nós comuns a diferentes elementos, o valor das variáveis do problema é idêntico, independentemente do elemento considerado.

Após a definição da malha de elementos finitos e do tipo de elemento (linear, triangular, quadrático, etc.), as matrizes características correspondentes a cada elemento são formadas e, em seguida, agrupadas para formar o sistema global de equações. A solução desse sistema fornece os valores das incógnitas nos pontos nodais. Com base no comportamento aproximado local, as incógnitas do problema em qualquer ponto do elemento são calculadas a partir dos valores nodais das mesmas incógnitas nos pontos nodais conhecidos. Em outras palavras, as

aproximações locais atuam como funções de interpolação, permitindo calcular os valores das incógnitas em qualquer ponto do elemento finito com base nos valores nodais (ALVES, 2007).

2.5.1 Equação diferencial

Consideremos uma equação diferencial parcial de segunda ordem em uma dimensão, que é comum em problemas de condução de calor ou deslocamentos em estruturas elásticas:

A equação diferencial parcial em uma dimensão é:

$$\frac{d}{dx} \left(k(x) * \frac{du}{dx} \right) + f(x) = 0 \quad (1)$$

onde:

- $u(x)$ é a função incógnita, que pode representar, por exemplo, deslocamento, temperatura, etc;
- $k(x)$ é uma função que representa propriedades do material ou do sistema (como rigidez ou condutividade térmica);
- $f(x)$ é uma função de força externa ou fonte.

Para aplicar o MEF, transformamos a equação diferencial em uma formulação fraca. Isso envolve multiplicar a equação por uma função teste ($v(x)$) e integrar sobre o domínio:

$$\int \left(v(x) * \left(\frac{d}{dx} \left(k(x) * \frac{du}{dx} \right) + f(x) \right) dx \right) = 0 \quad (2)$$

Usando integração por partes e assumindo que ($v(x)$) se anula nas fronteiras, a integral do termo derivado é simplificada:

$$\int \left(k(x) * \left(\frac{du}{dx} \right) * \left(\frac{dv}{dx} \right) dx \right) = \int (v(x) * f(x) dx) \quad (3)$$

A função teste ($v(x)$) e a função incógnita ($u(x)$) são aproximadas por uma combinação linear de funções de base ou interpolação.

O domínio contínuo (Ω) é dividido em subdomínios menores, chamados elementos finitos. Dentro de cada elemento, ($u(x)$) é aproximado por uma combinação linear de funções de forma ($N_i(x)$) associadas a nós específicos:

$$u(x) \approx \sum (N_{i(x)} * u_i) \quad (4)$$

2.5.2 Matriz de rigidez

Substituindo as aproximações na formulação fraca, obtemos um sistema de equações lineares:

$$\sum_j \left(\int \left(k(x) * \left(\frac{dN_i}{dx} \right) * \left(\frac{dN_j}{dx} \right) dx \right) * u_j \right) = \int (N_{i(x)} * f(x) dx) \quad (5)$$

Forma matricial:

$$Ku = F \quad (6)$$

onde:

- K é a matriz de rigidez;
- u é o vetor de deslocamentos;
- F é o vetor de forças.

Para um elemento com dois nós:

$$K^e = \left(\frac{k}{l} \right) * [1 \ -1; -1 \ 1] \quad (7)$$

onde k é uma constante de rigidez e l é o comprimento do elemento.

A matriz de rigidez global e o vetor de forças são montados somando as contribuições de cada elemento, considerando a conectividade dos nós. Isso resulta

em um sistema de equações globais que pode ser resolvido para encontrar os valores nodais u .

O sistema de equações lineares ($Ku = F$) é resolvido numericamente, fornecendo os valores aproximados da função incógnita ($u(x)$) nos nós. Métodos como eliminação de Gauss, decomposição LU ou métodos iterativos são usados para resolver o sistema.

Após resolver o sistema, os valores nodais (u) podem ser usados para reconstruir a solução aproximada em qualquer ponto do domínio, interpolando entre os valores nodais. Isso permite a análise detalhada do comportamento do sistema físico modelado.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é especialmente útil para resolver problemas complexos em engenharia, onde soluções analíticas são inviáveis. Este método permite a análise detalhada de estruturas, transferência de calor, fluxo de fluidos, entre outros problemas. Ao dividir um sistema complexo em elementos menores e mais simples, o MEF facilita a obtenção de soluções aproximadas para problemas que seriam difíceis de resolver de outra forma. Isso o torna uma ferramenta poderosa para projetistas e engenheiros na modelagem e simulação de comportamentos físicos em diversas aplicações.

2.6 TELHAS REFORÇADAS COM FIBRA DE VIDRO

Neste item, serão discutidos os conceitos e características das fibras de vidro, bem com sua aplicação para o reforço de telhas, abordando a composição dos materiais, os processos de fabricação, as propriedades específicas conferidas pelo reforço com fibras de vidro, como resistência a impacto, resistência à tração e resistência à corrosão.

2.6.1 Fibras de vidro

As fibras sintéticas são amplamente utilizadas como reforço em matrizes poliméricas, com o objetivo de obter propriedades mecânicas significativamente superiores. Existem vários tipos de fibras sintéticas, sendo as mais comuns e utilizadas as fibras de vidro, de aramida e de carbono, devido às excelentes

características que apresentam quando combinadas com as matrizes. Na escolha da fibra como reforço, são considerados aspectos importantes como o custo do material, suas propriedades, os desempenhos desejados, a interação fibra/matriz e as técnicas de fabricação utilizadas (Almeida, 2012).

As fibras de vidro são as fibras sintéticas mais utilizadas entre todas, devido a suas características significativas, como baixo custo, alta resistência à tração e excelente resistência química. No entanto, também apresentam algumas desvantagens, como um módulo de tração relativamente baixo em comparação com outras fibras (Guth, 2018). A Tabela 7 apresenta algumas propriedades da fibra de vidro.

Tabela 7 - Propriedades da Fibra de Vidro.

Propriedades	Valor	Unidade de Medida
Densidade área	300	g/m ²
Densidade	2,5	g/cm ³
Coefficiente de Poisson	0,21-0,23	-
Módulo de elasticidade de cisalhamento	30-36	GPa
Alongamento	2,5-3,0	%
Resistência à tração	2.000 a 3.500	MPa
Condutividade térmica	1,3	W/m/°C

Fonte: Abd El-Baky *et al.* (2021)

A fibra de vidro foi inicialmente descoberta em escavações arqueológicas no Egito, onde foi encontrada junto a materiais cerâmicos em vasos, templos e outros locais históricos. As tecnologias de fabricação de fibras de vidro não tiveram sucesso na época, e apenas no início do século XX foram iniciadas pesquisas que criaram as condições necessárias para o início da produção de fibras de vidro (Marinucci, 2011).

A fibra de vidro, mostrada na Figura 11, é composta por materiais químicos obtidos diretamente da natureza, incluindo areia, óxido de alumínio, óxido de magnésio e calcário. Essas misturas, quando administradas nas proporções corretas, resultam em vários tipos de vidro e, por conseguinte, na fibra de vidro. O processo de fabricação requer que o material fundido passe por pequenos orifícios em uma máquina, resultando em feixes de filamentos que são amplamente utilizados como reforço estrutural (Ortenzi Júnior, 2007).

Figura 11 - Fibras de vidro.



Fonte: Araújo e Martins (2021)

As fibras de vidro geralmente possuem diâmetro entre 5 e 20 microns, e suas superfícies não são livres de falhas, além de estarem associadas a irritações na pele humana (Wambua *et al.*, 2003). Essas fibras são amplamente utilizadas para reforçar matrizes poliméricas, resultando em compósitos estruturais e componentes moldados. Os compósitos de matriz plástica reforçada com fibras de vidro (figura 1) apresentam várias características favoráveis, como elevado quociente entre resistência e peso, boa estabilidade, resistência ao calor, umidade e corrosão, facilidade de fabricação e custo relativamente baixo. Por esses motivos, as fibras de vidro são, de longe, o reforço mais utilizado (Barcellos, 2009).

2.6.2 Polímeros Reforçados com Fibras de Vidro (PRFV)

Os polímeros reforçados com fibras de vidro (PRFV) são compósitos avançados projetados para reforçar, recuperar e substituir estruturas. Eles são formados pela combinação de fibras sintéticas, como vidro, carbono (ou grafite) e aramida (nome comercial Kevlar®), que podem assumir diferentes formas. As fibras são responsáveis pela resistência do compósito, enquanto a matriz polimérica serve para manter as fibras unidas, transferir forças para elas e protegê-las contra efeitos ambientais. Esses compósitos apresentam propriedades mecânicas de resistência e

elasticidade superiores às propriedades dos materiais individuais. Segundo Norris e Saadatmanesh (1994), as fibras são as principais responsáveis pela resistência do compósito, enquanto a matriz atua unindo as fibras e transmitindo os esforços entre elas.

Segundo Pinto e Miranda (1999), os polímeros podem ser classificados em duas categorias principais:

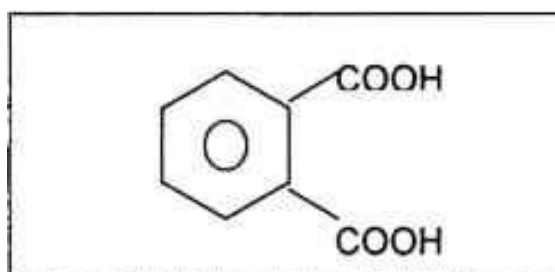
Termoplásticos: São polímeros que, ao serem aquecidos até o ponto de fusão, podem fluir. Eles possuem uma cadeia polimérica linear ou ramificada.

Termofixos: Estes polímeros sofrem uma reação química que forma ligações cruzadas, resultando em uma estrutura tridimensional. A cura desses polímeros pode ocorrer a frio ou a quente. Uma vez conformados, eles não podem ser aquecidos e reconformados.

Entre os polímeros, o mais utilizado na produção de peças em compósitos de matriz polimérica é o poliéster insaturado. Este é um polímero termofixo e possui uma estrutura química diferente dos poliésteres termoplásticos, pois, além das típicas ligações éster, ele contém duplas ligações insaturadas capazes de reagir com monômeros vinílicos. As duplas ligações da resina e do monômero são quebradas pela ação de um catalisador (como peróxido orgânico, calor ou radiação) e reagem novamente entre si, formando um polímero tridimensional com características termofixas, sendo infusíveis e irreversíveis (Kelly, 2002).

O poliéster insaturado pertence às resinas ortoftálicas, representadas pela Figura 12, isoftálicas, bisfenólicas e tereftálicas (Wambua et al., 2003).

Figura 12 - Estrutura molecular do ácido ortoftálico.



Fonte: Pinto (2002)

As resinas ortoftálicas possuem baixa resistência em determinados ambientes, como meios ácidos e alcalinos, além de serem suscetíveis ao calor. No entanto,

quando devidamente formuladas, apresentam boas propriedades mecânicas. Entre todas as variedades de resinas de poliéster, as ortoftálicas são as mais utilizadas, incluindo em aplicações estruturais (Pinto; Miranda, 1999).

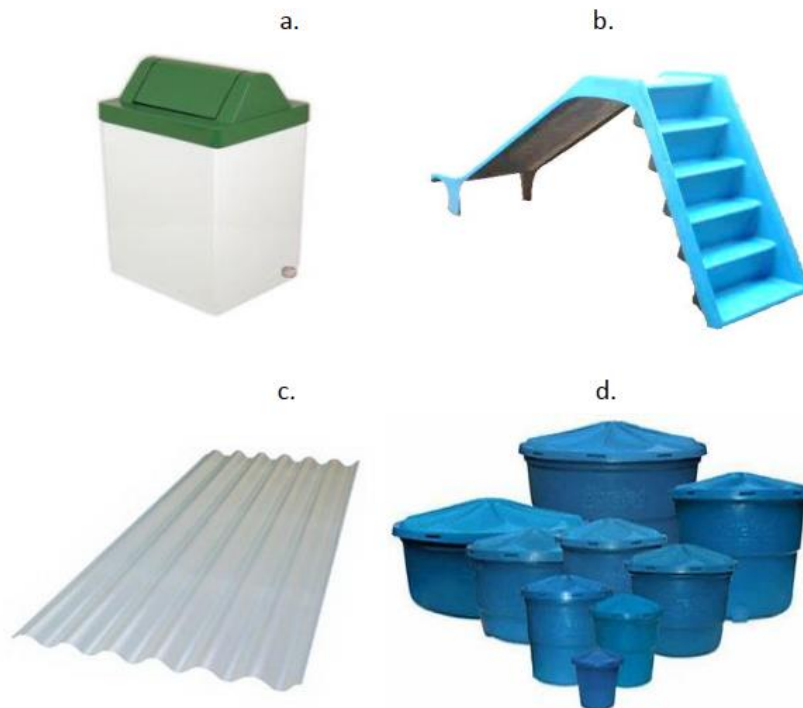
As matrizes poliméricas consistem basicamente de uma resina polimérica como fase matriz e fibras como meio de reforço. As fibras de vidro são as mais utilizadas para o reforço de plásticos devido a características como baixo coeficiente de dilatação, resistência ao impacto e baixo custo (Araújo *et al.*, 2003).

A utilização de polímeros reforçados com fibras de vidro (PRFV) para recuperação e reforço estrutural é um campo extenso e tecnologicamente avançado, que oferece economia de tempo e materiais na construção civil. Além disso, a facilidade de associação com outros materiais, o baixo aumento no peso próprio da estrutura, o significativo aumento da resistência e da rigidez, e a boa aceitação do produto no mercado mundial, podem tornar essas fibras um material amplamente utilizado na recuperação e reforço de elementos estruturais (Fiorelli, 2002).

A combinação de um reforço (como fibra de vidro) com uma matriz polimérica (como resina poliéster ou outro tipo de resina) e uma substância catalisadora de polimerização resultando no (PRFV) permite a produção de peças em uma ampla variedade de formatos e tamanhos, como piscinas, caixas d'água, cascos e hélices de barcos, carrocerias de veículos, entre outros (Orth *et al.*, 2012), inclusive para a produção de telhas reforçadas, que é o foco deste trabalho.

Na figura 13, são apresentados exemplos de produtos que utilizam fibra de vidro como matéria prima.

Figura 13 - a) Lixeira em fibra de vidro; b) Escorredor em fibras de vidro; c) Telhas translúcidas em fibra de vidro; d) Caixas d'água feitas com fibra de vidro.



Fonte: www.metalpan.com.br.

As telhas, elementos essenciais na construção civil, são responsáveis por formar o conjunto de componentes da cobertura, contribuindo para o desempenho térmico e acústico do ambiente. Elas devem ter alta resistência às intempéries e proteger o ambiente contra infiltrações e a deterioração causada por agentes naturais. No entanto, as telhas apresentam algumas desvantagens, como baixa resistência à tração e à flexão, além de serem pesadas, o que pode aumentar significativamente o custo da obra. Além disso, elas podem gerar uma quantidade considerável de resíduos poluentes que degradam o meio ambiente (Silva; Farias; Antunes, 2017).

As telhas poliméricas são materiais compósitos que combinam dois ou mais componentes, geralmente uma matriz e um reforço, resultando em propriedades superiores às que teriam individualmente. Essas características tornam as telhas poliméricas uma excelente alternativa para solucionar problemas relacionados à baixa resistência à tração e à flexão, pois apresentam boas características físicas e mecânicas, além de serem leves, duráveis e mais resistentes ao impacto. O uso desses materiais compósitos tem crescido gradativamente na indústria da construção

civil, sendo aplicados não apenas em telhas, mas também em outros materiais, como tijolos, blocos estruturais e concreto (Júnior, 2004).

Segundo a ABNT NBR 16753 (2019), que estabelece os requisitos e métodos de ensaios para telhas de poliéster reforçadas com fibras de vidro, o produto formado por compósitos poliméricos é definido como laminado e classificado de acordo com o tipo, podendo ser translúcido e/ou opaco. Além disso, a norma classifica os laminados com base na resposta à ação do fogo e à ação do meio ambiente. O grau 1 caracteriza-se por possuir no mínimo duas camadas protetoras resistentes às intempéries, enquanto o grau 2 possui apenas uma camada protetora. A norma também especifica as características técnicas que os laminados devem apresentar ao serem submetidos a ensaios de tração, flexão e absorção de água, considerando a utilização de 25% de teor de fibra de vidro, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 - Características técnicas dos laminados.

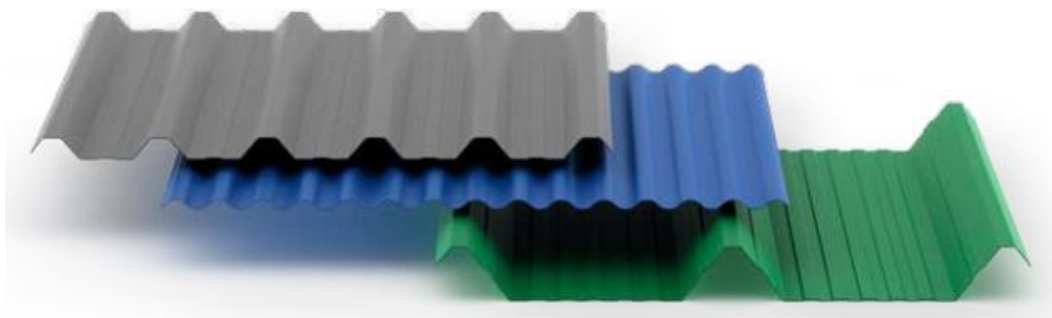
Característica	Valor Mínimo/ Máximo	Valor	Unidade de Medida
Teor de Fibra de Vidro	Mínimo	25,0	%
Alongamento na Ruptura	Mínimo	1,20	%
Resistência à Tração	Mínimo	70,0	MPa
Módulo de Elasticidade na Tração	Mínimo	5.000	MPa
Resistência à Flexão	Mínimo	145,0	MPa
Módulo de Elasticidade na Flexão	Mínimo	5.000	MPa
Absorção de Água	Máximo	1,0	%

Fonte: ABNT NBR 16753 (2019)

Ainda segundo a ABNT NBR 16753 (2019), as telhas de poliéster reforçadas com fibras de vidro, ao serem confeccionadas, não podem apresentar trincas, manchas ou áreas sem resina poliéster. Além disso, não deve haver ondulações que alterem as dimensões especificadas nas normas, nem rugas superficiais, para garantir uma instalação adequada.

A Figura 14 abaixo, mostra alguns modelos de telhas opacas em poliéster reforçado com fibra e vidro, apresentados no Manual Técnico do fabricante (PLANEFIBRA).

Figura 14 – Telha opaca em poliéster reforçado com fibra de vidro.



Fonte: Manual Técnico PLANEFIBRA.

O Manual Técnico do fabricante também especifica as propriedades físicas e mecânicas das telhas, conforme apresentado na Tabela 9, e das propriedades térmicas, definidas na Tabela 10.

Tabela 9 – Propriedades físicas e mecânicas das telhas.

Características	Método de Ensaio	Unidade de medida	Especificação
Teor de fibra de vidro	NBR 13.275	% da massa	30 % (mínimo)
Alongamento	ASTM D 638	%	1 a 2
Resistência à tração	ASTM D 638	Mpa	100 a 120
Módulo de elasticidade na tração	ASTM D 638	Mpa	5.500 (mínimo)
Resistência à flexão	ASTM D 790	Mpa	130 (mínimo)
Módulo de elasticidade na flexão	ASTM D 790	Mpa	5.000 (mínimo)
Absorção de água	ASTM D 570	% da massa	1 (máximo)
Dureza Barcol	ASTM D 2583	0 a 100	40 a 50

Fonte: Manual Técnico PLANEFIBRA.

Tabela 10 – Propriedades térmicas das telhas.

Características	Método de Ensaio	Unidade de medida	Especificação
Transmissão de luz	ASTM E903	%	0,00
Transmitância térmica (coeficiente U)	NBR 15.220	W / m²K	4,47
Resistência térmica (coeficiente R)	NBR 15.220	m²K / W	0,01
Capacidade térmica (CT)	NBR 15.220	kJ / (m²K)	3,31
Condutividade Térmica (λ)	NBR 15.220	W / mK	0,17

Fonte: Manual Técnico PLANEFIBRA.

2.7 PRINCIPAIS NORMAS UTILIZADAS NESTE TRABALHO

Neste item, serão apresentadas as normas técnicas aplicáveis, além de um aprofundamento nos principais itens relacionados às análises propostas.

2.7.1 NBR 6120/2019 – Ações para o cálculo de estruturas de edificações

Esta norma define critérios e diretrizes para o cálculo das ações decorrentes do peso próprio e das cargas acidentais em estruturas de edificações.

Entre os principais itens abordados estão os carregamentos de coberturas, placas de aquecimento solar e cargas específicas variáveis de manutenção.

2.7.2 NBR 8681/2003 - Ações e segurança nas estruturas

Esta norma visa os requisitos exigíveis na verificação da segurança das estruturas usuais da construção civil e estabelece as definições e os critérios de quantificação das ações e das resistências a serem consideradas no projeto das estruturas de edificações.

Em específico, este trabalho abordará as combinações de ações para o Estado Limite de Serviço para o cálculo final das flechas, considerando os efeitos da fluência a longo prazo.

2.7.3 NBR 7190/2022 – Projeto de estruturas de madeira

É a norma que estabelece os critérios para o projeto de estruturas de madeira. Essa norma é essencial para garantir a segurança, durabilidade e funcionalidade das construções de madeira, fornecendo diretrizes detalhadas sobre o uso de materiais, cálculos estruturais e métodos construtivos.

Para as verificações, serão utilizados os valores limites de flechas (deflexões) indicados nesta norma. Esses valores são essenciais para garantir que as estruturas e componentes, como telhas reforçadas com fibra de vidro, estejam dentro dos padrões de segurança e desempenho especificados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O propósito da escrita deste capítulo tem por síntese a busca de trabalhos da literatura correlata em que os painéis foram aplicados em situações diversas, procurando identificar dentre as várias aplicações, aquelas em que esses materiais foram utilizados na condição de telhas. Pretende-se evidenciar a pequena aplicação dos painéis de partículas para este uso.

Adicionalmente, além da revisão acerca dos painéis de partículas na engenharia, procurou-se averiguar também os trabalhos em que o método dos elementos finitos foi utilizado na simulação de estruturas feitas a base de painéis de partículas, com o propósito de evidenciar a potencialidade dessa ferramenta.

Para realizar as revisões bibliográficas foram utilizadas palavras-chave combinadas, tanto no Portal de Periódicos da CAPES quanto no Google Acadêmico. Para verificar como diferentes pares de termos são tratados na literatura, as palavras-chave foram combinadas duas a duas. Para refinar ainda mais a pesquisa, também foram combinadas três a três, de modo a afunilar o conteúdo encontrado e justificar a pequena quantidade de estudos sobre esse assunto.

Para tal, utilizou-se as seguintes palavras-chave: *Painéis Aglomerados, Telha Reforçada com Fibra de Vidro, Simulação Numérica.*

Das dezenas de trabalhos encontrando especificamente em relação aos painéis aglomerados, sete apresentaram contribuição na aplicação prática desses materiais, sendo que dois foram escolhidos para mostrar a viabilidade da utilização dos painéis de partículas dentro do contexto da engenharia, principalmente na engenharia civil.

Combinando as palavras-chave duas a duas, foram encontrados alguns trabalhos referentes a fabricação de telhas com resíduos de madeira, e também sobre simulação numérica envolvendo painéis em geral. Mais detalhes serão apresentados nos itens subsequentes.

A pesquisa não encontrou estudos envolvendo as três palavras-chave, evidenciando a inexistência da aplicação dos painéis aglomerados em conjunto com telhas reforçadas com fibra de vidro. Dessa forma, essa pesquisa pretende apresentar uma contribuição inédita para o meio acadêmico e conseqüentemente, sua aplicação na engenharia.

3.1 APLICAÇÃO DE PAINÉIS AGLOMERADOS NA ENGEHARIA

Os painéis de madeira aglomerada começaram a ser produzidos no Brasil em 1966 pela empresa Placas do Paraná S.A., localizada em Curitiba, Paraná. Sendo um produto novo no mercado brasileiro, o aglomerado enfrentou desafios iniciais, especialmente em relação a limitações técnicas, como alta absorção de água, inchamento em espessura, usinabilidade de bordas e problemas na fixação de parafusos. Com o tempo, novas tecnologias foram introduzidas, como o uso de parafina, controle do gradiente de densidade e sistemas de aparafusamento mais eficientes, visando minimizar esses problemas. Atualmente, o aglomerado é uma das principais matérias-primas do setor moveleiro brasileiro, com uma produção de 1.808.000 m³ em 2003 (ABIPA, 2002).

Apesar da utilização dos aglomerados estar diretamente ligada à fabricação de móveis, vários outros setores, como o da construção civil e embalagens podem empregá-los, conforme aponta a Figura 15, desde que sejam observadas suas características e restrições.

Figura 15 – Mercado de painéis no contexto brasileiro.

PAINÉIS DE MADEIRA		USOS E APLICAÇÕES		
PAINÉIS DE MADEIRA RECONSTITUÍDA		Construção Civil	Pisos, paredes, vigas I, escadas, forros, coberturas, tapumes, divisórias, barracões, lambris, portas e outros	
Painéis de Partículas				
	Aglomerado	Móveis	Estruturas e armações de poltronas, laterais, tampos, prateleiras, portas, mesas, estantes, carteiras escolares, armários de cozinha, divisórias, encostos, assentos, fundos de gavetas/armários, camas e outros	
	OSB			
		MDP	Embalagens	Caixaria em geral, plataformas para pallets, carretéis industriais, caixas e gabinetes para a indústria de eletro-eletrônicos, instalações comerciais e industriais, caixas e gabinetes pintados ou revestidos
		Waferboard	Outros	Auto-falantes, embalagens em geral, painéis para decoração, stands, brinquedos, placas, painéis, biombos e outros

Fonte: ABIMCI (2014).

Algumas indústrias de aglomerados estão explorando a possibilidade de produzir painéis alternativos para pisos laminados. Para essa aplicação, é necessário considerar diversos fatores, como a alta densidade do painel, o uso de partículas menores para um melhor acabamento superficial e a utilização de resinas resistentes à umidade (Andrade, 2005).

A pesquisa de Iwakiri et al., elaborada em 2005, foi desenvolvida com objetivo de avaliar a influência da densidade do painel e da resina melamina-uréiaformaldeído (MUF) sobre as propriedades do painel aglomerado visando aplicações semiestruturais. Os painéis foram produzidos com densidade nominal de 0,65 g/cm³ e 0,90 g/cm³ e foram prensados a uma temperatura de 140°C, com pressão específica de 40 kgf/cm² e tempo de prensagem de 8 minutos.

Foram produzidos 15 painéis com dimensões nominais de 50 x 50 x 1,5 cm, sendo três por tratamento. Após o acondicionamento dos painéis em uma câmara climática, com temperatura de 20 ± 2°C e umidade relativa de 65 ± 3%, foram confeccionados corpos de prova para ensaios de flexão estática, ligação interna, absorção de água e inchamento em espessura após 2 e 24 horas de imersão em água, com 4, 5 e 2 corpos de prova, respectivamente.

Os resultados demonstraram aumento na estabilidade dimensional e propriedades mecânicas dos painéis com o aumento na densidade e teor de resina MUF. Os autores, após a caracterização dos ensaios dos painéis, concluíram que as partículas finas destinadas às camadas externas de painéis aglomerados no processo industrial podem ser utilizadas para produção de painéis homogêneos de alta densidade para aplicações semiestruturais, tais como piso para habitações.

Outra pesquisa de Zuchinalli, Antunes, de 2015, apresenta o estudo da utilização de painéis aglomerados para fôrmas de elementos estruturais de concreto armado. Para tal, analisou-se o desempenho do painel em relação ao esforço de tração, comportamento frente à presença de umidade e resistência das ligações.

Para a fabricação dos painéis aglomerados foram utilizadas partículas de madeira de *Pinus Elliottii* e *Eucalyptus Grandis*. Após os ensaios mecânicos de tração perpendicular, inchamento e resistência ao arrancamento de parafuso, os autores concluíram que esses painéis podem ser utilizados para o uso proposto.

Blecha et al. (2013) confeccionaram aglomerados utilizando partículas provenientes de podas de árvores das espécies Jatobá e Canelinha. Foram

analisadas três composições: 100% Jatobá, 100% Canelinha e uma mistura de 50% Jatobá + 50% Canelinha. A resina utilizada foi poliuretana bicomponente derivada de mamona.

O processo de manufatura foi realizado com uma pressão de compactação de 3,5 MPa por 10 minutos, a uma temperatura de 90 °C. As partículas tinham uma umidade de 5%, e 16% de resina foi usado como adesivo. Os painéis foram avaliados quanto ao módulo de elasticidade na flexão, resistência à flexão, adesão interna, densidade aparente, teor de umidade e inchamento em espessura após 2 horas de imersão em água, conforme a norma brasileira NBR 14810.

Os resultados mostraram que os painéis confeccionados apresentaram densidade aparente variando entre 856 e 969 kg/m³, classificando-os como de alta densidade. Todas as placas atenderam aos requisitos de teor de umidade, com valores entre 5% e 11%, e exibiram inchamento em espessura após 2 horas de imersão em água abaixo de 8%. A adesão interna foi superior a 0,4 MPa, e o módulo de resistência à flexão foi acima de 16,8 MPa. No entanto, os valores de resistência à flexão no módulo de elasticidade ficaram abaixo dos exigidos pelas normas. A inclusão de maiores proporções de resina pode melhorar esses valores.

Concluiu-se que é viável a produção de painéis de partículas utilizando resíduos de podas de árvores urbanas, inclusive com a combinação das espécies Jatobá e Canelinha.

Iwakiri *et al.* (2012) avaliaram a qualidade de painéis produzidos com resíduos de serrarias das espécies cardeiro, caucho, castanha-de-paca, copaíba, louro, louro-espinho, piquiarana, tauari e virola. Os painéis foram confeccionados utilizando 8% de adesivo de ureia-formaldeído, com uma pressão de 4,0 MPa, temperatura de 160 °C por 8 minutos, e partículas com 3% de umidade, resultando em uma densidade de 750 kg/m³ (média densidade).

Os resultados de inchamento em espessura e absorção de água apresentaram variações dentro dos limites determinados pela norma e foram inferiores aos valores observados em outras pesquisas. Os ensaios mecânicos de tração perpendicular, módulo de elasticidade (MOE) e módulo de resistência à flexão (MOR) foram compatíveis com os dados da literatura e atendem à norma europeia EN 312:1993. Um ponto interessante destacado no estudo é que não houve comprovação da influência direta da maior razão de compactação sobre as propriedades físicas e

mecânicas, contrariando os conceitos apresentados por Maloney (1993) e Molesmi (1974).

Os resultados indicam a viabilidade do uso das nove espécies amazônicas na produção de painéis de madeira, destacando a espécie Caucho (*Ecclimusa guianensis* Eyma) por suas melhores propriedades físico-mecânicas.

Muitas outras pesquisas indicam o uso dos painéis aglomerados de forma não estrutural para a confecção de elementos da engenharia civil, como móveis, pisos, forros, acabamento de interiores, etc., porém não foram encontrados estudos da aplicação dos painéis em conjunto com telhas reforçadas com fibra de vidro.

Poleto (2020) sugeriu em sua pesquisa de doutorado a fabricação de telhas com resíduos de madeira de reflorestamento de *Pinus* sp., para o emprego na construção civil.

A autora considerou a viabilidade técnica do painel aplicado como revestimento, buscando analisar o comportamento e eficiência do painel de partículas como telha. Ressalta-se, que no processo de fabricação da telha foi utilizado, como adesivo, a resina poliuretana à base de óleo mamona. Foram realizados ensaios físico-mecânicos e analisado o desempenho térmico da telha, inclusive a sua absorção. Também foram feitos ensaios qualitativos após intemperismo das telhas. Os resultados obtidos confirmaram a viabilidade do emprego das telhas de no mercado de coberturas e no segmento da construção civil.

Já Pimentel (2000) estudou em sua pesquisa, a dosagem adequada de compósito madeira-cimento utilizando resíduos de *Pinus caribaea* visando a produção de telhas moldadas por vibração.

A incompatibilidade química entre o resíduo de *Pinus caribaea* e o cimento foi avaliada por meio de curvas de hidratação, que revelaram um efeito inibitório desse material no processo de hidratação do cimento. Para determinar a influência de diferentes fatores na obtenção de compósitos de maior resistência à compressão, foram realizados ensaios de compressão simples em corpos de prova cilíndricos. Os fatores considerados incluíram o tipo de cimento (CP V e CP II), proporção dos materiais, uso de aceleradores de pega (cloreto de cálcio e sulfato de alumínio), tipo de cura (úmida e a vapor) e origem da matéria-prima (serragem e parafinado). Além disso, foram avaliadas características físicas como capacidade de absorção de água e variação dimensional dos compósitos.

Após definida a dosagem mais adequada para a produção de telhas pelo sistema especificado foram produzidas duas séries de telhas, uma com o material parafinado e outra com o material serragem, foi também produzida uma série de telhas com micro concreto que serviu de referência para avaliação das características físicas (resistência mecânica, permeabilidade, e capacidade de isolamento térmico).

Os resultados indicaram que o uso de resíduos de *Pinus caribaea* na produção de telhas é viável, já que as telhas fabricadas com esses resíduos apresentaram resistência mecânica compatível com as especificações internacionais e atenderam aos requisitos dos testes de permeabilidade. Embora a capacidade de isolamento térmico não tenha sido confirmada pelo ensaio realizado, as telhas feitas com partículas de *Pinus caribaea* oferecem uma vantagem significativa em relação às telhas de concreto, sendo aproximadamente 40% mais leves. Essa redução de peso resulta em uma menor carga estrutural, o que pode diminuir os custos com a estrutura do telhado.

Nota-se pelas pesquisas relatadas que nenhuma se refere ao conjunto de painéis aglomerados de madeira e telhas reforçadas com fibra de vidro. A utilização de novos materiais para o uso de chapas de madeira aglomerada está progredindo significativamente, destacando a necessidade de mais estudos.

Este trabalho contribui para essa tendência ao explorar a produção de painéis de madeira aglomerada em conjunto com as telhas reforçadas com fibra de vidro. Esse novo produto mostra potencial para ser utilizado para coberturas mais reforçadas com grande capacidade de suportar cargas específicas de uso.

3.2 APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA EM PAINÉIS AGLOMERADOS

Considerando a complexidade dos modelos matemáticos que representam as estruturas, a obtenção de soluções analíticas é frequentemente inviável. O avanço na capacidade dos computadores possibilitou o uso da modelagem numérica para representar o comportamento de problemas estruturais de forma mais precisa (Justo, 2010).

Assim, a modelagem numérica tornou-se uma ferramenta vantajosa na engenharia moderna, oferecendo uma aproximação realista e agilidade no processo

de análise. As análises numéricas, realizadas por meio de simulações computacionais, são essenciais para garantir a otimização e a confiabilidade estrutural. Elas são desenvolvidas com o objetivo de fornecer uma compreensão detalhada da estrutura, considerando aspectos como geometria, propriedades dos materiais, cargas aplicadas e identificação de possíveis falhas (Castro *et al.*, 2019).

Entre as técnicas de modelagem numérica aplicadas à análise estrutural, destacam-se o método das diferenças finitas (MDF), o método dos elementos de contorno (MEC) e o método dos elementos finitos (MEF) (Véras, 2018). O MEF é amplamente reconhecido como o método mais difundido atualmente. Devido à sua natureza repetitiva e complexa, a aplicação do MEF requer o uso de softwares especializados disponíveis no mercado, como SAP2000, ANSYS e ABAQUS. A maioria desses softwares foi aprimorada com base no MEF para aplicações em áreas específicas, como infraestrutura de transporte, obras industriais, movimentação de terra, geração de energia e análise sísmica. Portanto, é crucial avaliar o material e os objetivos de utilização estrutural antes de escolher o software mais adequado (Calil Neto *et al.*, 2017).

Não foram encontradas pesquisas específicas sobre a aplicação de análise numérica em painéis de partículas aglomeradas de madeira, possivelmente devido à classificação desses painéis como materiais ou elementos não estruturais. Dessa forma, a utilização de simulações numéricas para avaliar a capacidade estrutural desses materiais pode não ser considerada relevante, o que justifica a escassez de literatura a respeito. No entanto, a análise da combinação desses painéis aglomerados com telhas reforçadas com fibra de vidro é viável, pois as telhas podem fornecer as propriedades mecânicas necessárias para aumentar a rigidez e resistência do conjunto. Portanto, a simulação numérica neste contexto é justificada e constitui o objetivo deste trabalho.

A seguir, serão apresentadas algumas pesquisas relacionadas à simulação numérica em painéis estruturais. Essas pesquisas têm como objetivo destacar a potencialidade e a eficácia dessa ferramenta na análise e otimização do comportamento de painéis sob diferentes condições de contorno. Através da simulação numérica, é possível prever o desempenho estrutural e identificar possíveis melhorias nos materiais e nos processos de fabricação, evidenciando sua importância no campo da engenharia estrutural.

Na pesquisa desenvolvida por Chen e Lan (2013), foi avaliado o desempenho de sistemas de madeira laminada cruzada (CLT) em formato de caixa, destinados à aplicação como vigas caixão. Esses sistemas apresentam uma redução de peso estrutural sem comprometer significativamente a resistência ou a rigidez, especialmente em algumas situações de carregamento, como a flexão fora do plano. Nesse contexto, o principal objetivo do estudo foi desenvolver e validar modelos tridimensionais utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF), que podem ser empregados para analisar o desempenho à flexão de sistemas CLT em formato de caixa sob carregamento fora do plano.

Antes da montagem dos painéis, o módulo de elasticidade (MOE) das peças de madeira foi determinado por meio do ensaio de vibração transversal. Para a pesquisa, foram fabricados quatro tipos de vigas, variando em propriedades do material, número de camadas e orientação das fibras em cada camada individual. Cada tipo de viga teve dez réplicas. As vigas de CLT foram coladas utilizando o adesivo fenol-resorcinol-formaldeído (PRF) e foram testadas através do ensaio de flexão estática em quatro pontos.

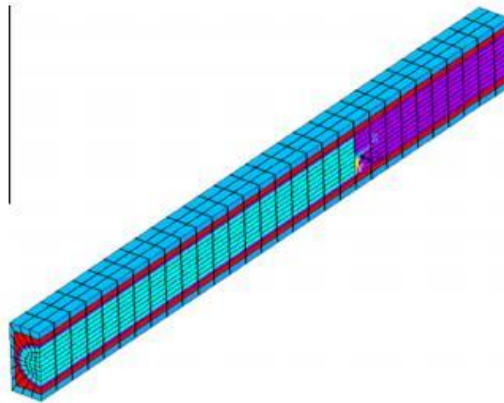
O modelo numérico, desenvolvido no software ANSYS, foi discretizado como um bloco estrutural tridimensional, definido por elementos com oito nós, cada um com três graus de liberdade. Para inserir o MOE no ANSYS, os pesquisadores ajustaram os resultados utilizando um fator de correção de 0,95, que considera a diferença entre os resultados dos testes de vibração transversal (dinâmicos) e os testes estáticos. Segundo os resultados obtidos, Chen e Lan (2013) concluíram que o modelo numérico desenvolvido é aplicável para o cálculo de deformação de carga de painéis de CLT com diferentes propriedades.

O comportamento mecânico de painéis de CLT foi investigado utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) numa abordagem complexa conhecida como estrutura de multi-escala (FLORES *et al.*, 2015). Este procedimento considera a madeira em diferentes escalas: menor (ou ultraestrutural, na ordem dos nanômetros), intermediária (ou celular, na ordem dos micrômetros) e maior (ou estrutural, na ordem de metros). Os modelos numéricos foram desenvolvidos no software ANSYS, e a modelagem em nível ultraestrutural foi realizada com uma malha contendo 4495 nós e 3960 elementos hexaédricos, conforme Figura 16. Nessa escala, cada elemento

finito representa o comportamento mecânico das microfibrilas. As propriedades inseridas no modelo foram baseadas na espécie *Pinus Radiata*.

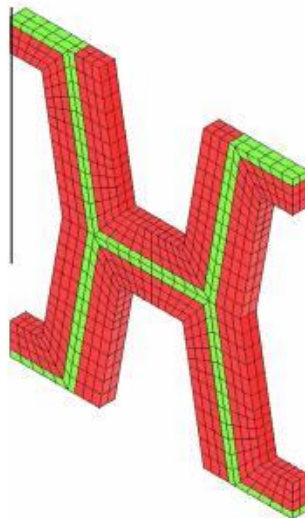
Posteriormente, Flores et al. (2015) criaram uma malha de elementos finitos para modelar a célula da madeira, composta por 1917 nós e 1088 elementos, como mostra a Figura 17. A repetição periódica desse modelo celular foi utilizada para formar o material em escala estrutural, especificamente o painel de CLT. O painel foi discretizado em uma malha contendo 379.093 nós e 345.600 elementos, de acordo com a Figura 18.

Figura 16 - Malha de elementos finitos típica da microfibrila na menor escala considerada no estudo



Fonte: Flores *et al.* (2015).

Figura 17 - Malha de elementos finitos típica da célula de madeira na escala intermediária



Fonte: Flores *et al.* (2015).

Para a caracterização do material, foram realizados ensaios de flexão em vigas de madeira serrada e ensaios em placas de CLT, submetidas a esforços de flexão, cisalhamento no plano e compressão. O estudo utilizou 162 vigas de madeira para determinar o módulo de elasticidade (MOE) através do ensaio de flexão em três pontos. Durante essa fase, a densidade das peças foi medida em vários pontos para obter uma densidade média representativa da madeira utilizada.

Para validar o modelo de escala múltipla, os autores compararam as previsões numéricas com os resultados experimentais obtidos para o MOE e a densidade das vigas de madeira serrada. Segundo Flores *et al.* (2015), houve uma boa concordância entre os valores numéricos e experimentais. Após essa etapa, foram realizadas simulações de teste de flexão em painéis de CLT para comparar com os resultados experimentais, focando na comparação dos deslocamentos experimentais com os valores numéricos previstos.

Além das simulações de flexão, foram realizadas simulações para os ensaios de cisalhamento e compressão. A comparação entre os valores numéricos e os resultados experimentais desses ensaios também mostrou uma boa concordância, reforçando a validade do modelo numérico utilizado.

Um outro modelo numérico utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) foi desenvolvido para verificar as propriedades dos painéis CLT fabricados no Uruguai, utilizando as espécies *Pinus taeda* e *Pinus elliotii* (Baño; Godoy; Vega, 2016). Para comparação, painéis de CLT foram fabricados em laboratório, colados com adesivo de isocianato, enquanto as bordas foram coladas com adesivo não estrutural. Quatro corpos de prova foram retirados desses painéis e submetidos a ensaios de flexão em quatro pontos até a ruptura.

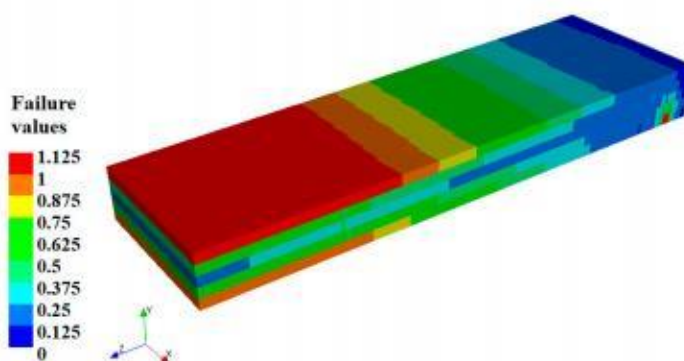
Os resultados obtidos para o módulo de elasticidade (MOE) e o módulo de ruptura (MOR) foram usados como dados de entrada no modelo numérico, desenvolvido no software COMSOL Multiphysics. De acordo com os autores, os valores numéricos apresentaram uma boa concordância com os resultados experimentais. Além disso, os modelos desenvolvidos podem ser aplicados a outras configurações de camadas e espessuras de painéis de CLT, demonstrando sua versatilidade e precisão.

No trabalho de Martinez-Martinez *et al.* (2018), o Método dos Elementos Finitos (MEF) foi utilizado para analisar o comportamento estrutural de vigas de CLT

submetidas a esforços de flexão fora do plano. A modelagem numérica foi desenvolvida no software ANSYS, onde a viga foi representada como um material compósito composto por cinco camadas. O modelo utilizou elementos sólidos de 8 nós, representando cada camada como um elemento espesso em três dimensões. As propriedades mecânicas utilizadas para representar a viga foram obtidas da literatura existente.

Foi considerado um regime não linear, com grandes deslocamentos, para simular o comportamento das vigas de CLT. Os resultados numéricos obtidos foram comparados com os resultados dos ensaios laboratoriais. Segundo Martinez-Martinez et al. (2018), o modelo em MEF apresentou resultados que concordaram com os dados experimentais, indicando que a modelagem é adequada para o estudo de critérios de ruptura para cada camada da viga de CLT.

Figura 18 - Distribuição de ruptura de uma viga de CLT de 5 camadas



Fonte: Martinez-Martinez *et al.* (2018).

3.3 CONCLUSÕES ACERCA DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica, buscou-se apresentar as pesquisas relacionadas à aplicação de painéis aglomerados no contexto da engenharia, destacando sua utilização como elementos não estruturais. Foram também abordadas as pesquisas que investigaram a utilização de painéis aglomerados para a fabricação de telhas, especificamente em combinação com telhas reforçadas com fibra de vidro.

Além disso, foram apresentadas pesquisas sobre a simulação numérica de painéis, com foco em painéis aglomerados, para evidenciar a importância dessa

ferramenta na engenharia moderna. No entanto, não foram encontradas pesquisas que explorem a combinação de painéis aglomerados com telhas reforçadas com fibra de vidro utilizando-os para fins estruturais em diversas aplicações. Também não há estudos na literatura que abordem a simulação numérica de painéis aglomerados, destacando a relevância e a contribuição potencial deste trabalho para o campo da engenharia.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo descreve as abordagens e procedimentos utilizados para realizar a pesquisa, que teve como objetivo avaliar o desempenho mecânico de telhas reforçadas com fibra de vidro em conjunto com painéis aglomerados de madeira, por meio de um estudo numérico. A análise focou em variáveis como as espessuras e propriedades físicas e mecânicas dos painéis, além das diferentes condições de apoio do conjunto. O objetivo principal foi verificar se, sob diferentes carregamentos variáveis — incluindo o peso de placas de aquecimento solar ou fotovoltaicas, conforme especificado pela NBR 6120/2019 —, as flechas máximas obtidas respeitam os limites estabelecidos pela NBR 7190/2022.

As propriedades mecânicas das telhas de poliéster reforçadas com fibra de vidro foram retiradas do Manual Técnico de telhas em PRFV do fabricante (PLANEFIBRA).

As propriedades mecânicas dos painéis utilizadas neste estudo foram baseadas na dissertação de mestrado de Trevisan (2021), que investigou três tratamentos distintos: 100% seringueira, 100% pinus e uma combinação de 70% seringueira e 30% pinus.

Este capítulo detalhará todo o processo da simulação numérica, apresentando a definição dos materiais e elementos utilizados, os métodos de coleta de dados, e as técnicas de análise, assegurando uma descrição clara e precisa para garantir a replicabilidade e validação dos resultados obtidos. O software utilizado foi o Abaqus, um pacote comercial para análise por elementos finitos desenvolvido pela Rhode Inc, comercializado pela SIMULIA da Dassault Systemes S.A.

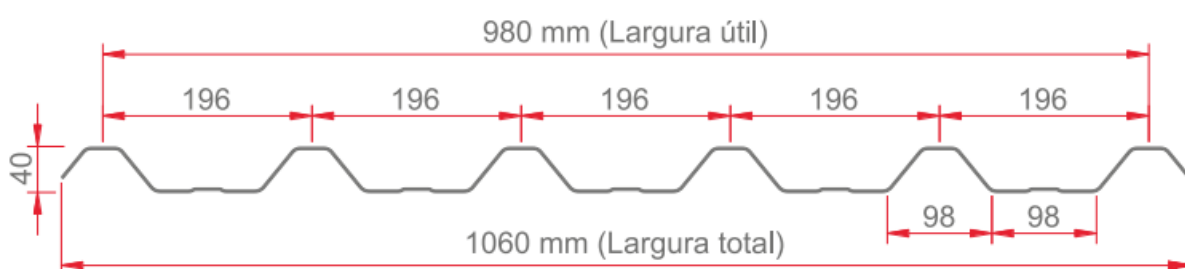
4.1 ESTUDO PARAMÉTRICO DOS MATERIAIS

Neste item, serão detalhados os materiais empregados nesta pesquisa, juntamente com suas propriedades específicas e as diferentes combinações utilizadas entre eles para as análises. Serão abordadas as propriedades mecânicas das telhas reforçadas com fibra de vidro e dos painéis aglomerados, os carregamentos normativos aplicados, as condições de apoio estabelecidas e as espessuras definidas das telhas em associação com os painéis.

4.1.1 Propriedades mecânicas dos materiais utilizados

As telhas reforçadas com fibra de vidro são resultado da combinação de resina poliéster com fibra de vidro resultando em um material compósito conhecido como Poliéster Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV). A Figura 19 apresenta as características geométricas da telha utilizada, de acordo com o Manual Técnico do fabricante (PLANEFIBRA).

Figura 19 – Telha trapezoidal em PRFV



Fonte: Manual Técnico PLANEFIBRA.

De acordo com o Manual Técnico do fabricante, o Módulo de deformação longitudinal das telhas em PRFV tem valor mínimo de 5.000 Mpa de acordo com os métodos de ensaio da norma ASTM D790. O coeficiente de Poisson do material é 0,32 como indicado na pesquisa de Mazer, 2017.

Ainda em relação às telhas, foi considerada uma espessura de 0,8 mm para a simulação.

Em relação aos painéis aglomerados, fabricados com as madeiras Pinus e Seringueira, foram analisadas as três composições ensaiadas por Trevisan (2021), de acordo com a Tabela 11 abaixo. Lembrando que as misturas foram compostas por 100% de cada espécie de madeira e uma combinação de 30% e 70% de cada tipo.

Tabela 11 – Misturas definidas para a confecção dos painéis

Misturas	Seringueira (%)	Pinus (%)	PUR (%)
M _{100%S}	100	0	10
M _{70%S30%P}	70	30	10
M _{100%P}	0	100	10

Fonte: Trevisan (2021)

Na Tabela 12 encontram-se os valores médios dos módulos de elasticidade (deformação longitudinal) obtidos na pesquisa.

Tabela 12 – Valores médios dos Módulos de Elasticidade para cada composição

Misturas	M_{100%S}	M_{70%S30%P}	M_{100%P}
	MOE (MPa)	MOE (MPa)	MOE (MPa)
Média	2174	2306	2352

Fonte: Adaptado de Trevisan (2021)

Na Tabela 13 encontram-se os valores médios dos módulos de resistência a flexão estática obtidos na pesquisa.

Tabela 13 – Valores médios dos Módulos de Resistência a flexão estática para cada composição

Misturas	M_{100%S}	M_{70%S30%P}	M_{100%P}
	MOR (MPa)	MOR (MPa)	MOR (MPa)
Média	13,53	14,44	16,89

Fonte: Adaptado de Trevisan (2021)

Com relação ao Coeficiente de Poisson, utilizou-se a média entre o coeficiente relacionado ao Adesivo Poliuretano derivado do óleo de mamona (PUR) obtido de Filho, 2001, sendo esse o valor de 0,37, e o coeficiente adotado para madeiras de baixa densidade de acordo com Sonelastic (www.sonelastic.com), com valor de 0,40. Dessa forma, o coeficiente de Poisson adotado nesta pesquisa foi de 0,385.

Também foram analisadas duas composições de espessuras dos painéis para avaliação da capacidade estrutural dos mesmos, sendo uma espessura de dois centímetros e outra de três centímetros.

Tanto os painéis quanto as telhas foram simulados com as medidas comerciais de um metro de largura e seis metros de comprimento.

Os carregamentos aplicados na simulação numérica foram obtidos da NBR 6120/2019 - Ações para o cálculo de edificações, considerando as telhas como elemento estrutural para coberturas. Na Tabela 13 são apresentados os valores considerados.

Tabela 14 – Valores característicos nominais das cargas variáveis

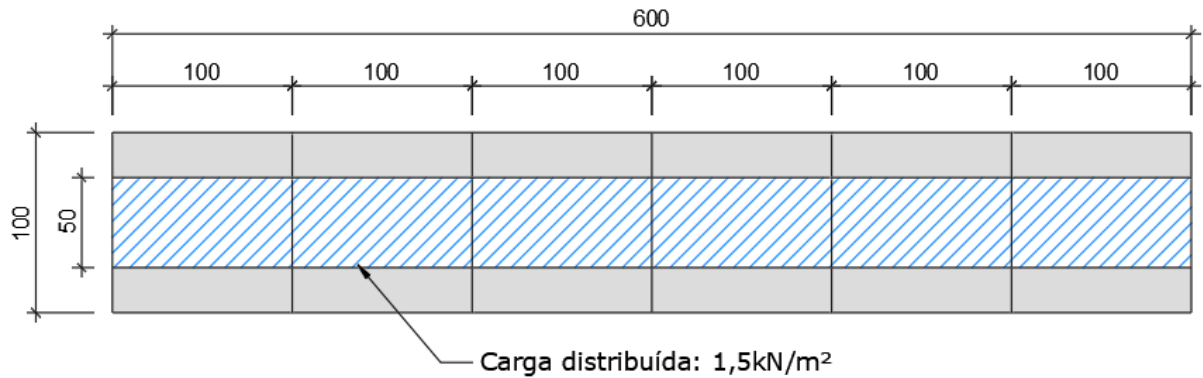
Local		Carga uniformemente distribuída kN/m ²
Coberturas	Com acesso apenas para manutenção ou inspeção	1
	Com placas de aquecimento solar ou fotovoltaicas	1,5

Fonte: Adaptado da NBR 6120/2019

Em relação às condições de apoio, foram adotadas duas disposições de vãos entre terças, consideradas como apoios. No primeiro conjunto de análises foi adotada a distância de um metro entre apoios e a as demais análises com a distância de dois metros entre apoios.

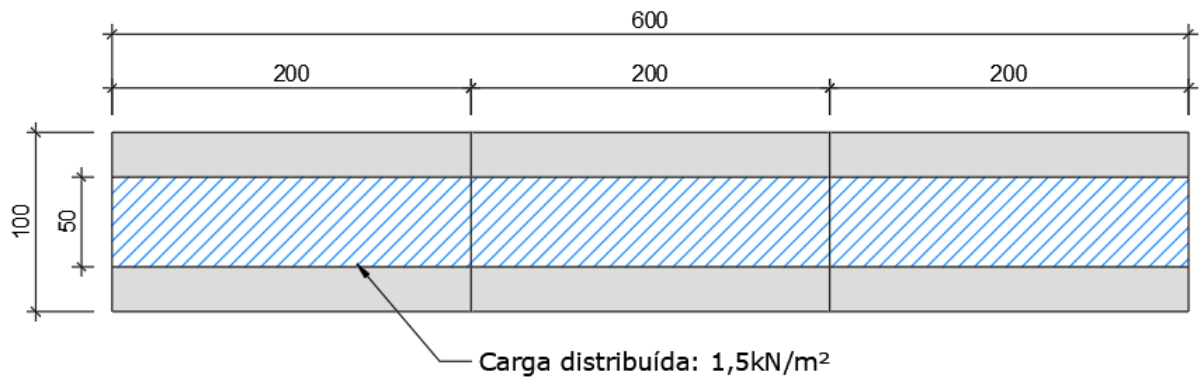
Para levar em conta as piores situações de projeto, foram consideradas situações onde há a presença de aquecimento solar, portanto, para esta pesquisa a carga distribuída adotada foi de 1,5 kN/m² aplicada sobre as telhas de duas formas distintas. A primeira aplicação, considerou-se o carregamento distribuído numa faixa central de 50cm ao longo do comprimento da telha, conforme a figuras 20 e 21 a seguir.

Figura 20 – Aplicação de carga para telhas com 1m entre apoios



Fonte: do próprio autor (2024)

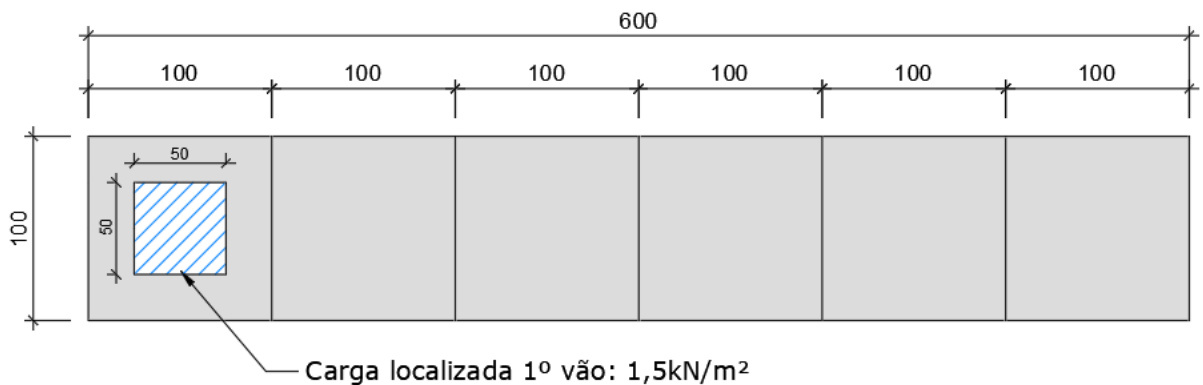
Figura 21 – Aplicação de carga para telhas com 2m entre apoios



Fonte: do próprio autor (2024)

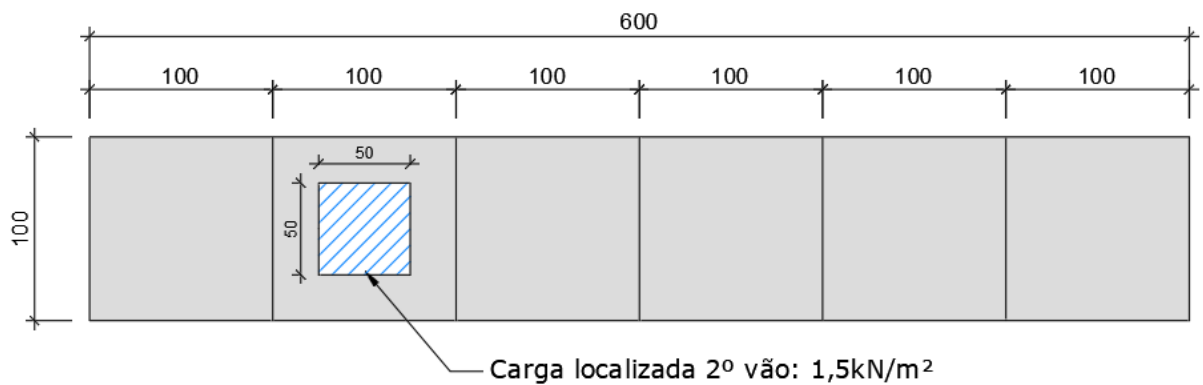
Na segunda aplicação de cargas, foi considerado um carregamento localizado em uma área central de 50x50cm em cada vão, conforme figuras a seguir.

Figura 22 – Carga localizada no 1º vão para telhas com 1m entre apoios



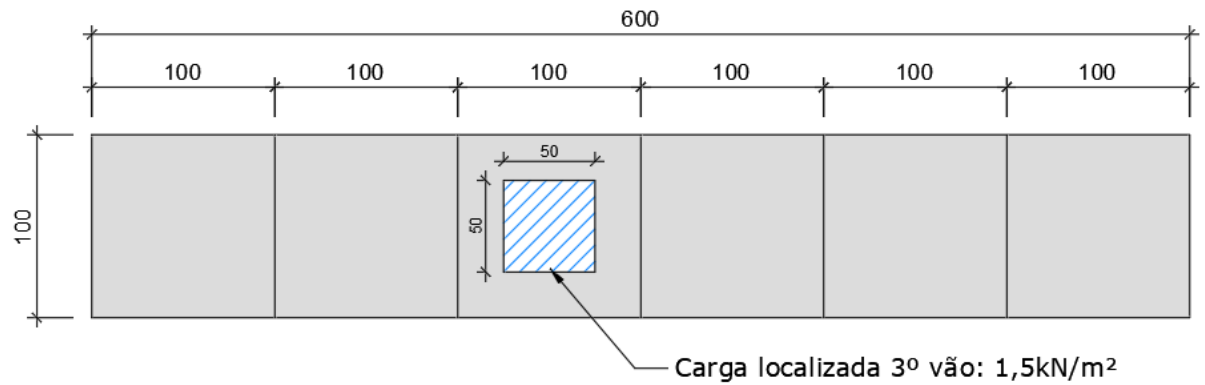
Fonte: do próprio autor (2024)

Figura 23 – Carga localizada no 2º vão para telhas com 1m entre apoios



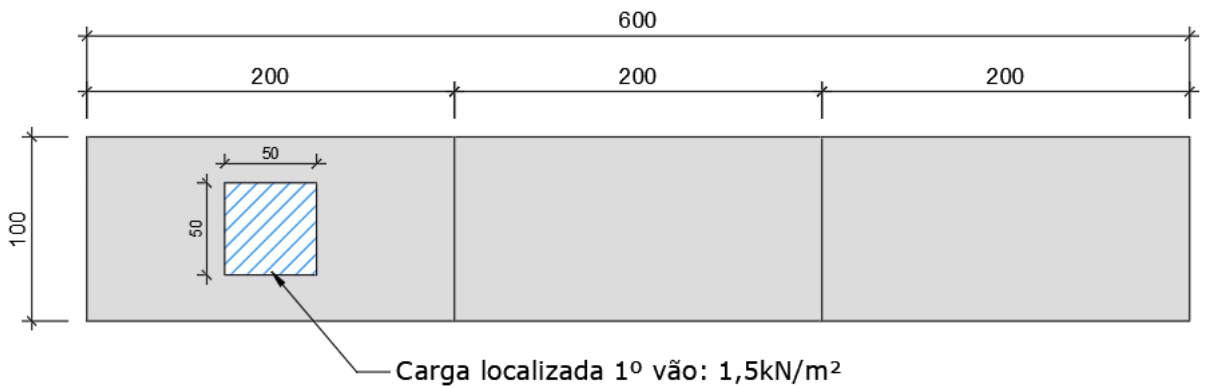
Fonte: do próprio autor (2024)

Figura 24 – Carga localizada no 3º vão para telhas com 1m entre apoios



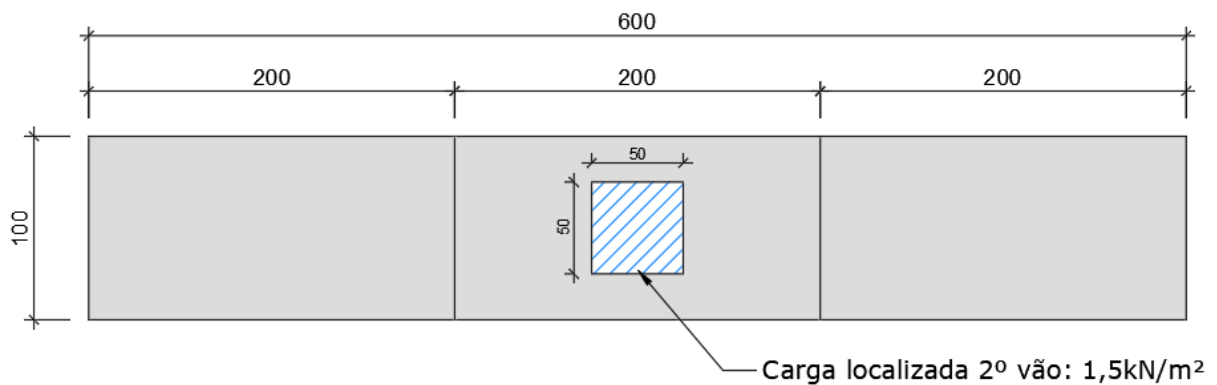
Fonte: do próprio autor (2024)

Figura 25 – Carga localizada no 1º vão para telhas com 2m entre apoios



Fonte: do próprio autor (2024)

Figura 26 – Carga localizada no 2º vão para telhas com 2m entre apoios



Fonte: do próprio autor (2024)

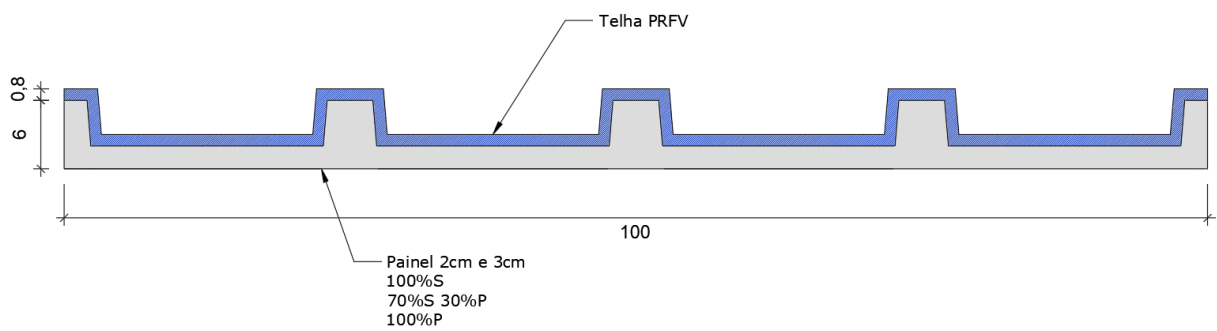
Para verificação dos valores limites normativos das flechas, será adota a relação $L/500$ de maneira conservadora tendo em vista a fragilidade dos materiais, em

especial, os painéis aglomerados, além das propriedades geométricas do conjunto, sem comportando como placa, semelhante à uma laje.

4.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO CONJUNTO TELHA – PAINEL AGLOMERADO

Nesta etapa serão descritos os procedimentos da simulação numérica. Serão abordados os parâmetros e metodologias utilizados para configuração e posterior análises no software Abaqus. Será apresentada uma análise como exemplo.

Figura 27 – Seção transversal do conjunto Telha + Pannel



Fonte: do próprio autor (2024)

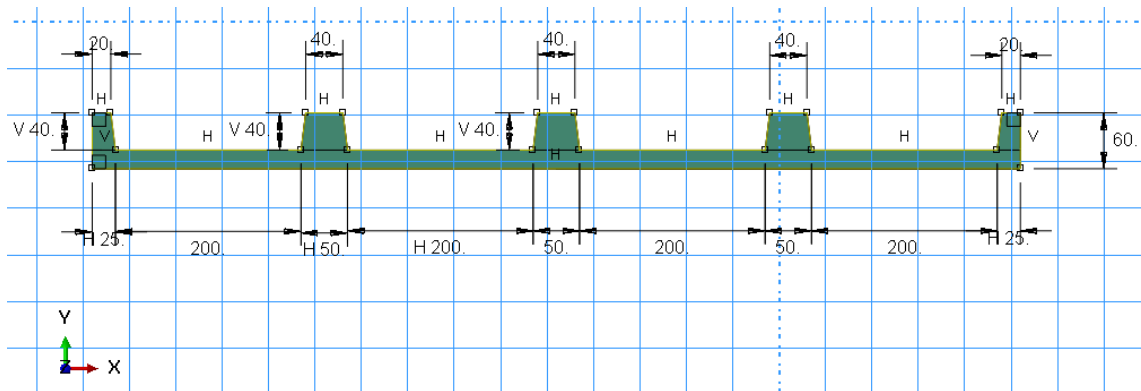
4.2.1 Modelo Numérico

No modelo numérico desenvolvido buscou-se a representação de uma telha reforçada do tipo trapezoidal, seguindo as dimensões de 1000 mm de largura e 6000 mm de comprimento, a fim de seguir dimensões encontradas no mercado. Todos os elementos foram criados a partir da subdivisão Create Part, localizado na categoria Part.

4.2.2 Seção transversal do painel aglomerado

Na Figura 28 estão representadas as medidas em milímetros utilizadas para elaboração do painel aglomerado.

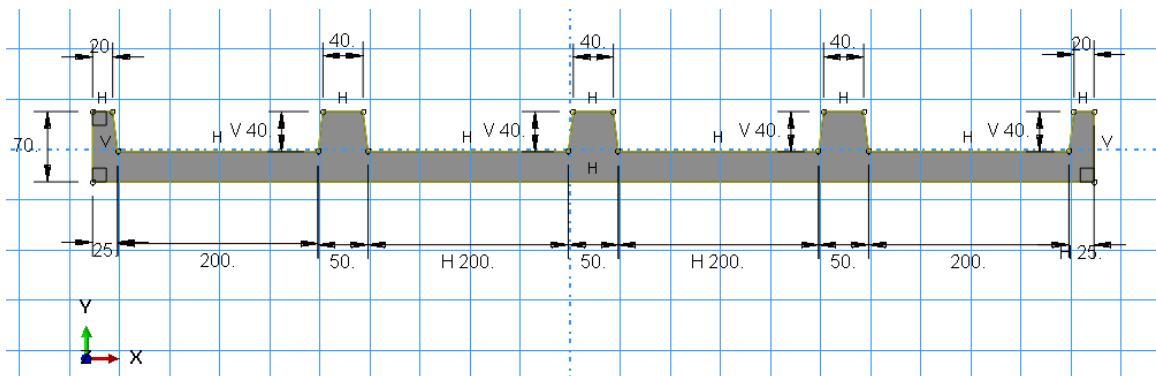
Figura 28 – Seção transversal do painel com 2 cm



Fonte: do próprio autor (2024)

O núcleo de painel aglomerado foi considerado como sendo sólido deformável. A peça foi extrudada em 6000 mm, de acordo com a Figura 29. Foram realizados os testes comparativos de espessura para o painel, considerando inicialmente 2 cm e posteriormente analisado com 3 cm.

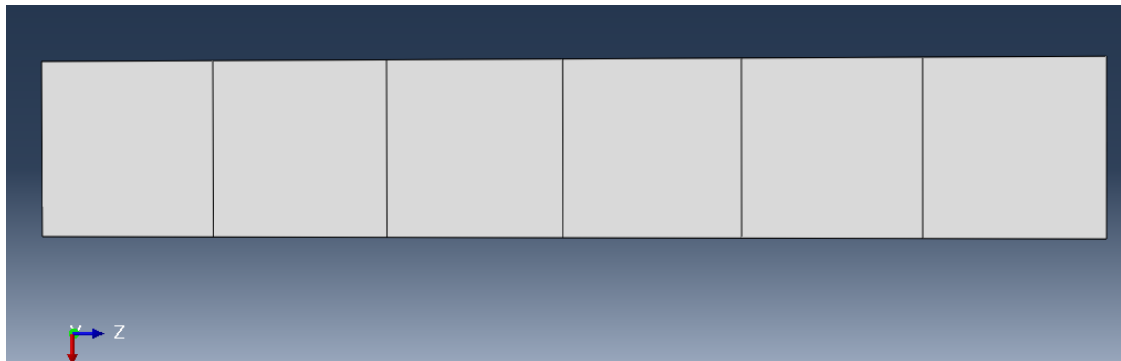
Figura 29 – Peça extrudada



Fonte: do próprio autor (2024)

Com a peça extrudada foi feita a partição da face inferior para que se possa posicionar posteriormente os apoios e a leitura dos deslocamentos. A divisão da face foi realizada com o auxílio da ferramenta Partition Face: Sketch, onde as linhas foram desenhadas na face e posicionadas a cada 1000 mm, como ilustrada na Figura 30.

Figura 30 - Face inferior do núcleo particionada.



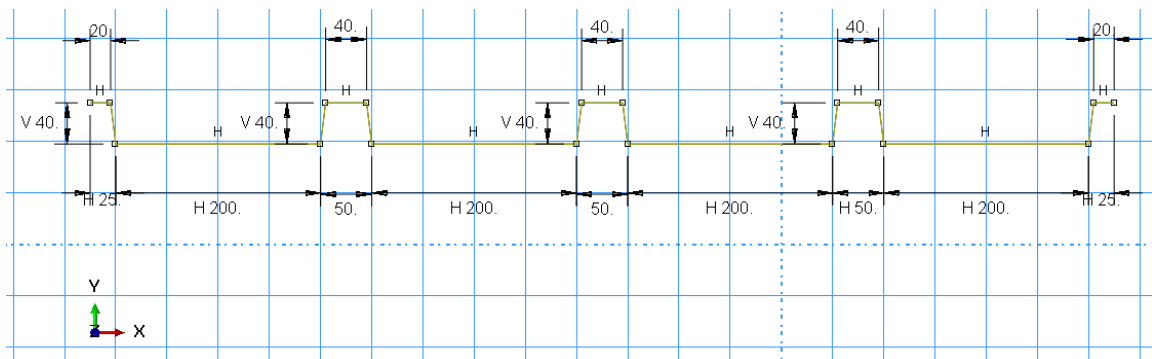
Fonte: do próprio autor (2024)

Para a posterior seleção de pontos que permitam fazer a leitura de dados, criou-se a partição das linhas posicionadas a 1000, 3000 e 5000 mm utilizando a ferramenta Partition Edge.

4.2.3 Telha reforçada com fibra de vidro

Para a seção da telha de fibra de vidro que atuará em conjunto com o painel, seguiram-se as medidas em mm exibidas na Figura 31.

Figura 31 - Seção transversal da telha



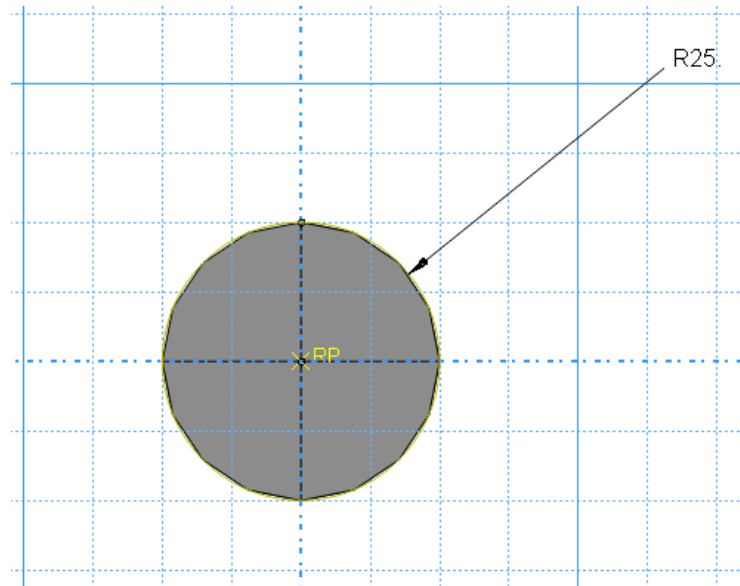
Fonte: do próprio autor (2024)

A telha de fibra de vidro foi considerada como sendo do tipo casca (Shell) e deformável. A análise foi realizada considerando-se cantos vivos nas dobras que formam os trapézios e enrijecedores do perfil. Após definida a seção, a peça foi extrudada em 6000 mm.

4.2.4 Elaboração dos suportes

Para os suportes seguiram-se as dimensões exibidas na Figura 32.

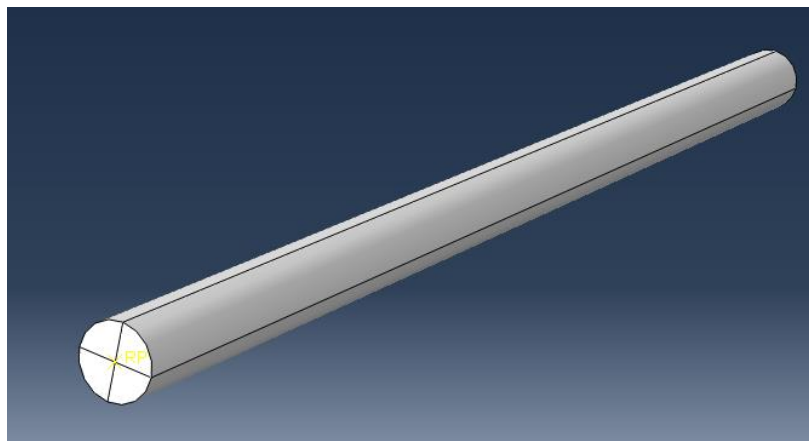
Figura 32 - Seção dos apoios



Fonte: do próprio autor (2024)

O apoio foi considerado inicialmente em sua confecção como sendo do tipo sólido e indeformável. Após a extrusão de 1000 mm da peça, a mesma foi convertida para casca (Shell), utilizando a ferramenta Create Shell: from Solid. Com o elemento formado, foram criadas partições das faces para facilitar a posterior criação da malha, como pode ser observado na Figura 33.

Figura 33 - Partições realizadas ao longo da peça



Fonte: do próprio autor (2024)

4.2.5 Criação das propriedades dos materiais

Por meio da aba Tools no subitem Reference Point aplicou-se sobre a intersecção das retas, localizado no centro do círculo da seção do suporte um ponto de referência que facilitará a aplicação de propriedades sobre a peça.

Os materiais foram criados utilizando a subdivisão Create Material localizado na categoria Property.

4.2.5.1 Propriedades do material do Painel Aglomerado

O material nomeado de Núcleo do Painel Aglomerado foi confeccionado seguindo as propriedades mecânicas, em específico a Elasticidade, fazendo-se necessário inserir os dados referentes ao Módulo de Young e o Coeficiente de Poisson. Para o Modulo de Young fez-se uso dos dados obtidos através da caracterização dos painéis aglomerados do traço M100%S (100% Seringueira) por meio do MOE, sendo $E = 2174 \text{ MPa}$. Com relação ao Coeficiente de Poisson, utilizou-se o coeficiente 0,385, indicado anteriormente.

4.2.5.2 Propriedades do material da Telha de fibra de vidro

O elemento nomeado como Telha PRFV (poliéster reforçadas com fibra de vidro) foi elaborado utilizando as propriedades elásticas por meio dos dados do Módulo de Young, sendo $E = 5.000 \text{ MPa}$ e Coeficiente de Poisson de 0,32, ambos obtidos na literatura.

4.2.6 Criação e aplicação das seções dos materiais

Após o desenvolvimento das propriedades dos materiais, parte-se para a elaboração das seções por meio da ferramenta Create Section, devendo selecionar a categoria e o tipo de seção. Para a aplicação da seção ao elemento correspondente utilizou-se a ferramenta Assign Section.

4.2.6.1 Seção do Núcleo do Painel Aglomerado

Para o núcleo a seção foi designada como sendo da categoria sólida e do tipo homogênea e selecionado o material correspondente, com espessura de 2cm e 3cm.

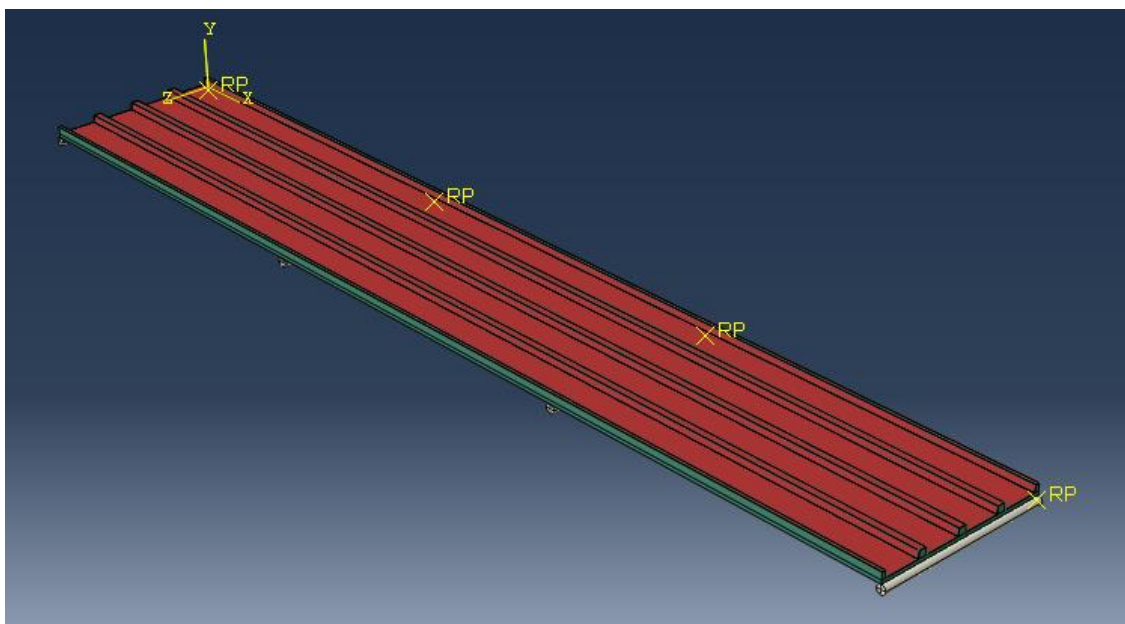
4.2.6.2 Seção da Telha de PRFV

A seção foi criada como sendo da categoria casca (Shell) e do tipo homogênea. Foi utilizado 0,8 mm de espessura (Shell Thickness) e selecionado o material correspondente.

4.2.7 Preparação para a análise

Para iniciar o preparo do conjunto a ser testado utilizou-se a ferramenta Create Instance localizada na categoria Assembly. Essa ferramenta nos permite chamar todos os elementos para compor um conjunto. Na Figura 34 pode ser visto todos os elementos já agrupados e posicionados.

Figura 34 - Elementos agrupados



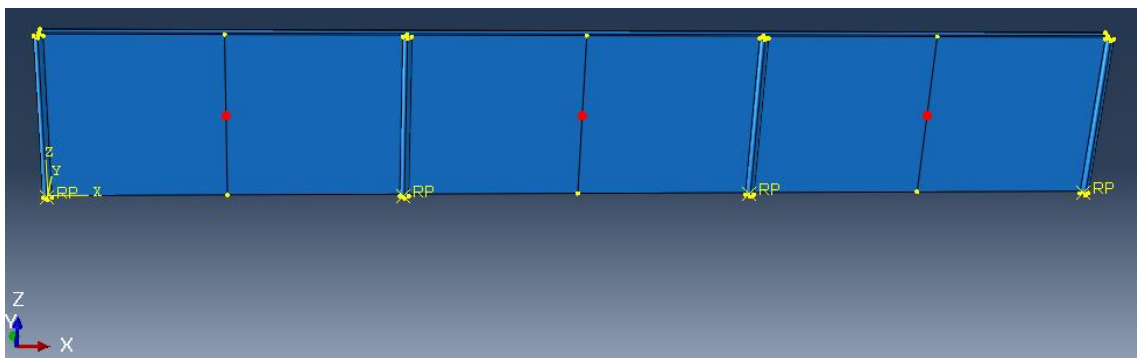
Fonte: do próprio autor (2024)

Os elementos foram posicionados com o auxílio da ferramenta Translete Instance, que concede mover as partes utilizando um ponto de referência entre elas. Houve a necessidade de fazer a rotação de algumas peças, para isso utilizou-se a ferramenta Rotate Instance que proporciona a rotação do elemento selecionado por meio de pontos ou retas como referência e inserindo um ângulo de rotação desejado.

Os apoios foram colocados a cada 2000 mm e posicionados sobre as arestas laterais e as partições criadas anteriormente.

Na categoria Step no menu Tools no subitem Set foi criado pontos para leitura dos deslocamentos que serão gerados pela carga que a peça estará submetida. Foram selecionados os nós estabelecidos anteriormente, como ilustrado na Figura 35. Cada Set foi criado e nomeado separadamente para leitura individualizada dos pontos.

Figura 35 - Sets criados para leitura de dados



Fonte: do próprio autor (2024)

4.2.8 Elaboração da etapa de carregamento

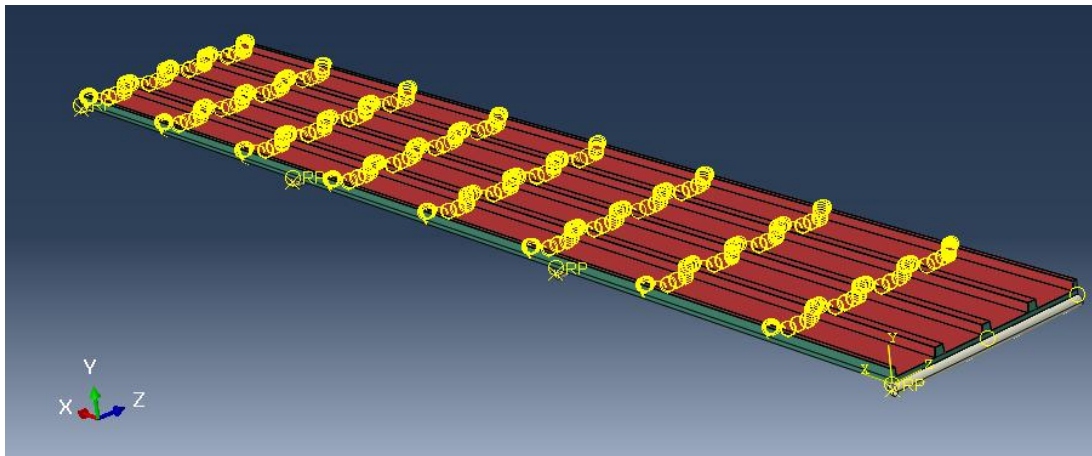
Na categoria Step no subitem Create Step criou-se a etapa nomeada de Carregamento, o tipo de procedimento designado (Procedure Type) foi o geral (General), sendo considerados os parâmetros Static e General. O número máximo de incrementos estabelecidos foram 1.000.000, e o tamanho designado inicial de 0,005, mínimo de $1E^{-15}$ e máximo de 0,01.

Para a seleção dos resultados de saída, utilizou-se a ferramenta Field Output Manager, foram selecionados os seguintes itens e subitens: Stresses (S); Strains (PE); Displacement/Velocity/Acceleration (U); Forces/Reactions (RF); Contact (CSTRESS, CDISP).

4.2.9 Ligação entre elementos

A aplicação das ligações entre todos os elementos foi realizada com a utilização da ferramenta Create Constraint por meio de uma ligação do tipo Tie. Na figura 36 pode ser observada a ligação aplicada em todos os elementos.

Figura 36 - Ligação do tipo Tie aplicada no conjunto



Fonte: do próprio autor (2024)

É muito importante que todas as faces de contato sejam selecionadas para que não apresente erros futuros na simulação.

4.2.10 Condições de apoio

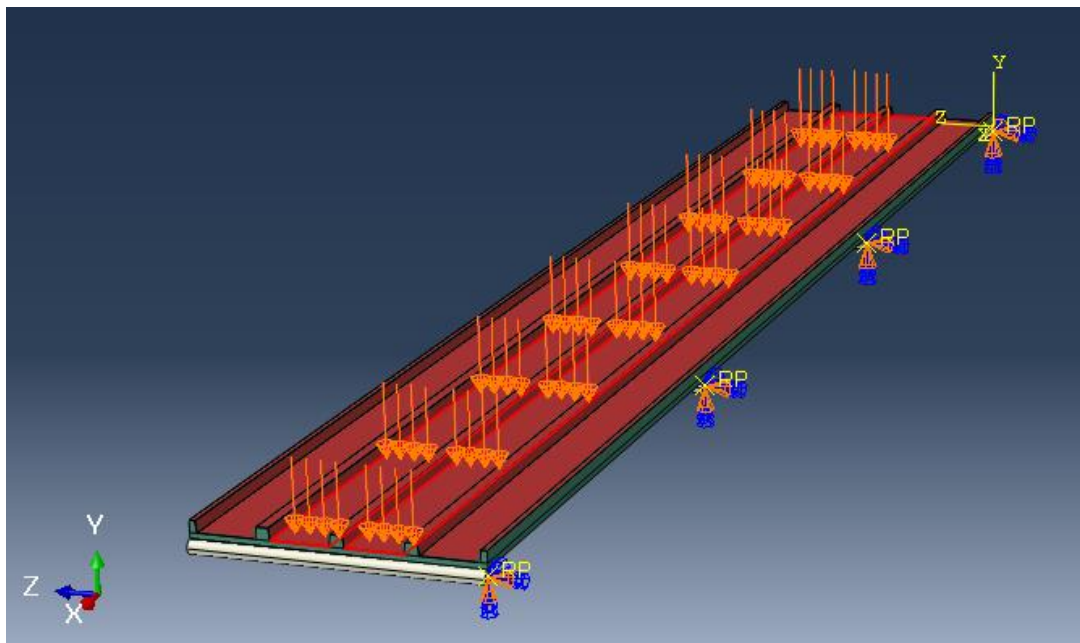
A criação da condição do apoio foi feita utilizando a ferramenta Create Boundary Condition, com a ferramenta ativada e designada para o step inicial foram preenchidas inicialmente a categoria Mechanical e definido Symmetry/Antisymmetry/Encastre. Após essa etapa foram selecionados os pontos de referência aplicados aos apoios.

Para os critérios de apoio foram determinados três apoios como sendo fixos com o travamento das direções e rotações: U2, U3, UR1, UR2, UR3; e um apoio como sendo engastado, com travamento em todas as direções.

4.2.11 Carregamento

A carga que foi utilizada na simulação seguiu como base o valor estipulado pela norma NBR 6120 de 2023. Por meio da ferramenta Load Manager foi possível criar o tipo de carregamento, selecionado o Step Carregamento criado anteriormente e selecionando a categoria Mechanical e o tipo de carregamento como pressão (Pressure). Na seleção da área de atuação do carregamento optou-se pelas duas regiões do meio do conjunto, como ilustrada na Figura 37.

Figura 37 - Área de atuação da carga distribuída de $1,5 \text{ kN/m}^2$.



Fonte: do próprio autor (2024)

Após a seleção da região, na edição de carregamento é inserido o valor da carga distribuída em MPa.

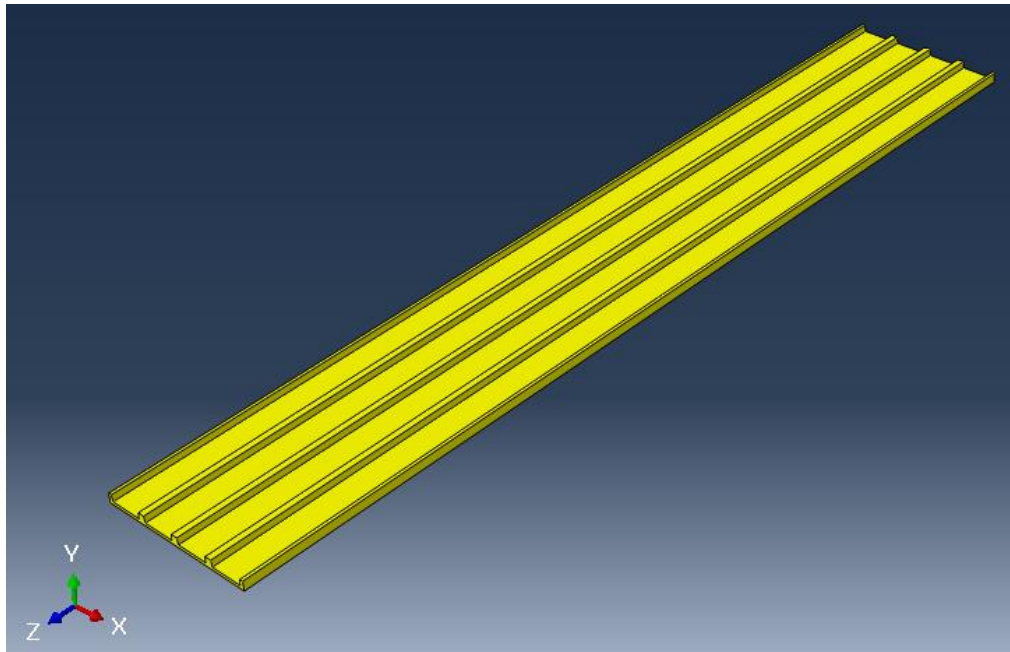
4.2.12 Aplicação da Malha

Para a aplicação de malha em cada um dos elementos foi feita inicialmente a atribuição de malha utilizando a ferramenta Assign-Mesh-Controls, para verificação do tipo de malha compatível com o elemento.

4.2.12.1 Malha do Núcleo

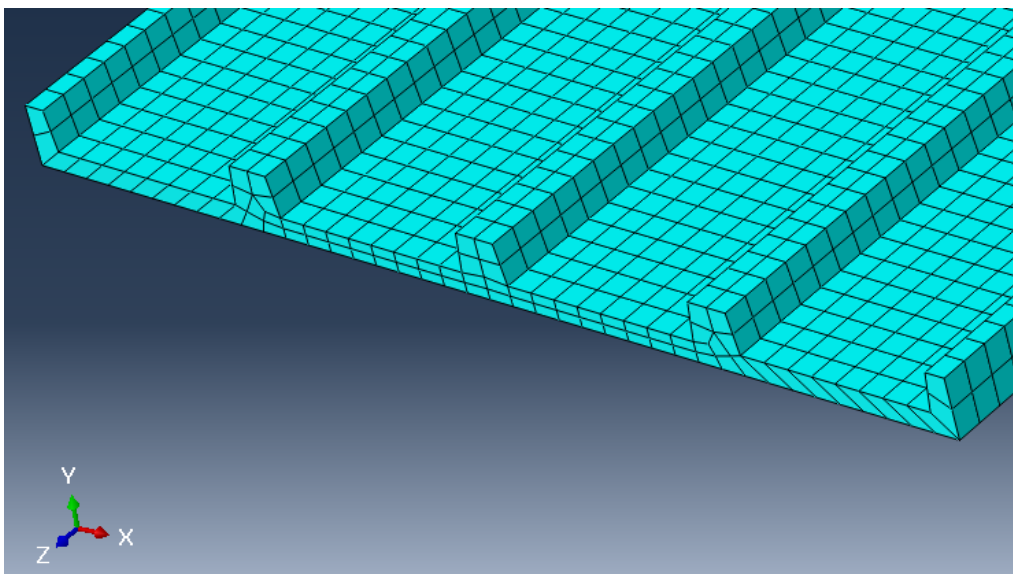
O núcleo inicialmente apresentava-se com marcação em amarelo (Figura 38), indicando que a peça quando aplicada a malha poderá ter algumas inconformidades em sua construção, como apresentada na Figura 39, não podendo ser aplicada uma malha estruturada.

Figura 38 - Núcleo sinalizado em amarelo



Fonte: do próprio autor (2024)

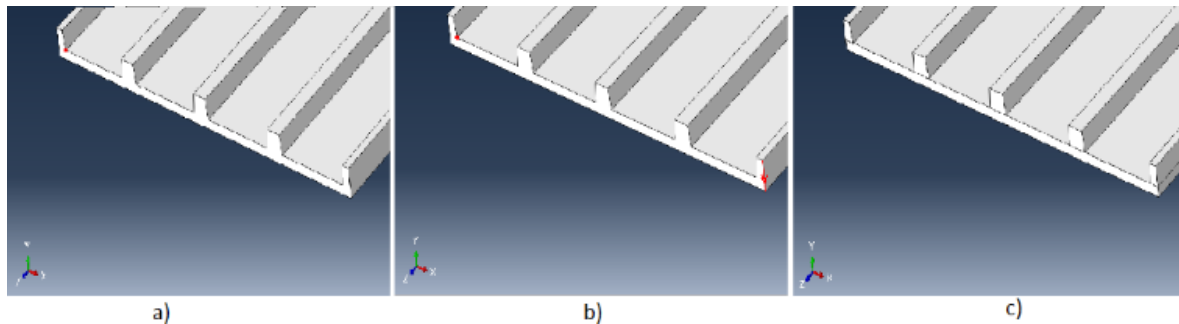
Figura 39 - Irregularidades e deformações ao longo da malha criada



Fonte: do próprio autor (2024)

Partindo disso fez-se necessário a partição da peça em sua seção para correção da malha, para isso utilizou-se a ferramenta Partition Cell. Inicialmente é selecionado um ponto (a) e uma reta normal a direção do corte (b), feito isso a seção inteira é seccionada virtualmente (c), como apresentado na Figura 40.

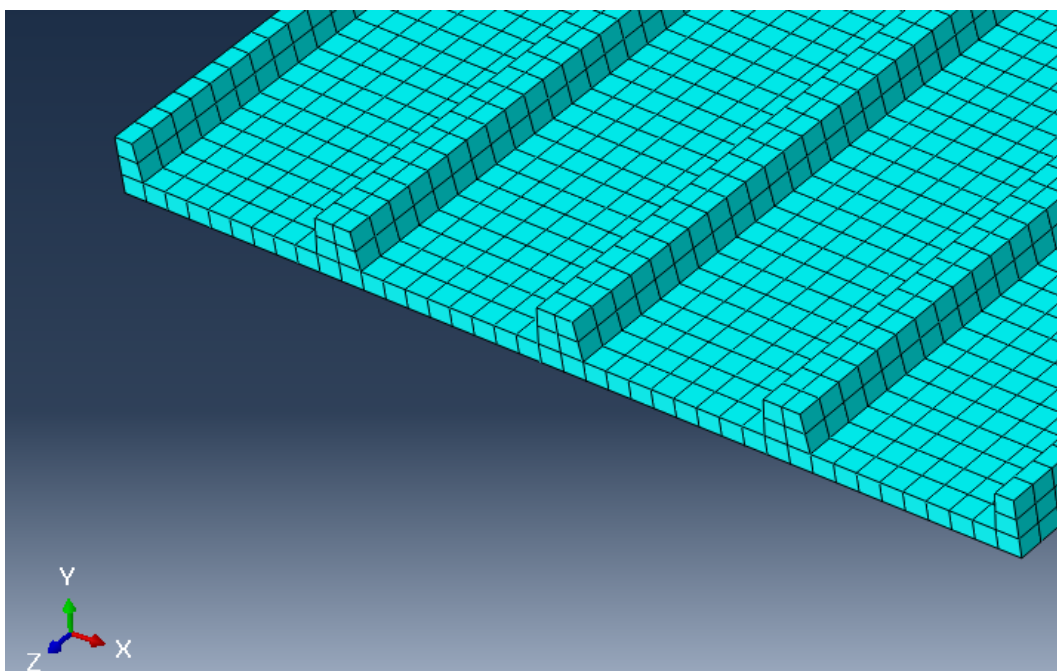
Figura 40 - Partição da seção da peça utilizando a ferramenta Partition Cell



Fonte: do próprio autor (2024)

Com o elemento seccionado foi possível utilizar uma malha estruturada e sem irregularidades, novamente selecionou-se a peça utilizando Assign Mesh Controls, no painel foi selecionado o tipo de malha Hexagonal (Hex) e estruturada, em seguida utilizando o Seed Part foi definido o tamanho da malha como sendo de 25, e a partir disso gerada a malha por meio da ferramenta Mesh Part, ilustrada na Figura 41.

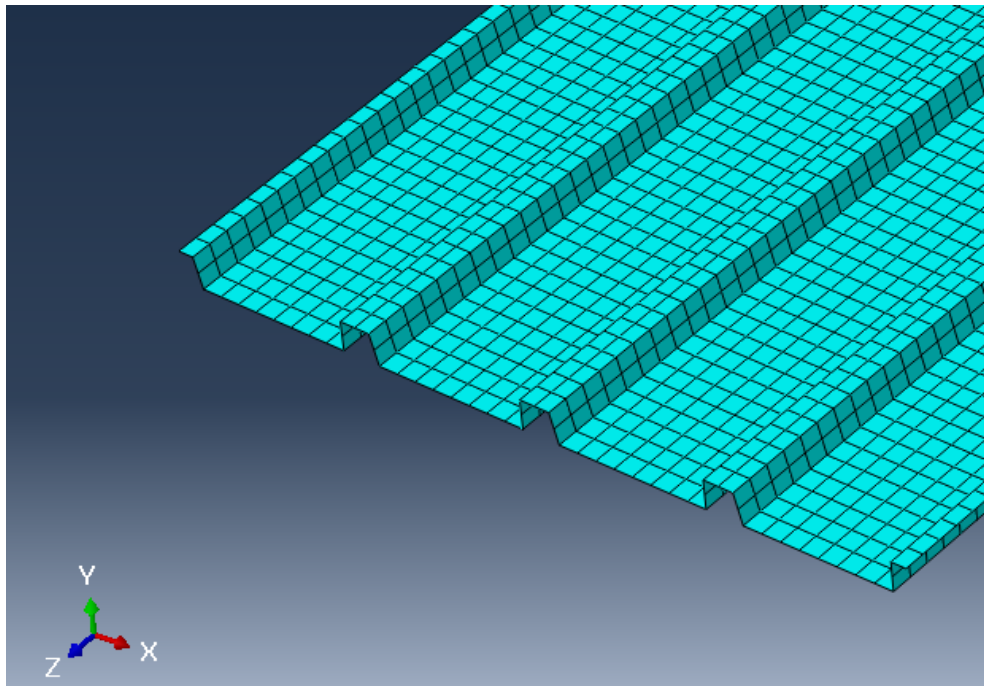
Figura 41 - Malha corrigida aplicada



Fonte: do próprio autor (2024)

A geração da malha para a telha mostrou-se mais simplificada, não necessitando fazer nenhum procedimento de correção, possibilitando a seleção de malha estruturada, porém como a telha é do tipo casca (Shell) a escolha de malha disponível que foi a quadrada (Quad) e na mesma dimensão da malha do núcleo, como pode ser observada na figura 42.

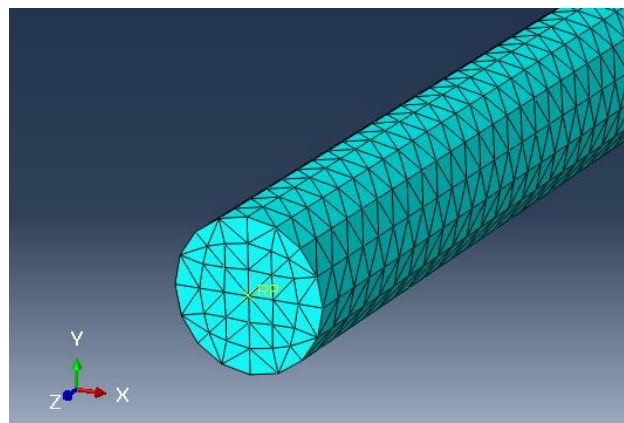
Figura 42 - Malha aplicada sobre o elemento telha PRFV.



Fonte: do próprio autor (2024)

Para os apoios circulares já seccionados anteriormente, foi possível a aplicação de malha triangular (Tri) na dimensão de 10 (Figura 43).

Figura 43 - Malha aplicada sobre o apoio.



Fonte: do próprio autor (2024)

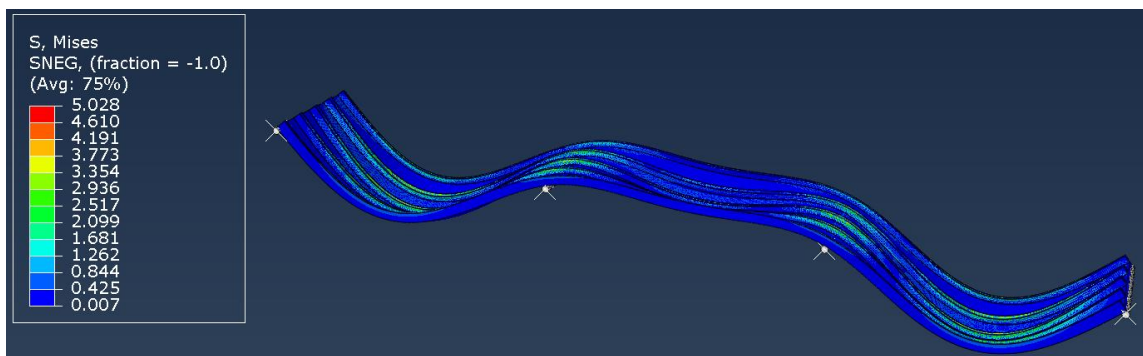
5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesse capítulo são apresentados os resultados detalhados de dois tratamentos analisados, sendo considerados painéis de 2cm e 3cm de espessura, ambos com carregamento distribuído de $1,5\text{kN/m}^2$ aplicada numa faixa central de 50cm de largura ao longo do comprimento do painel e a distância entre apoios de dois metros. Os resultados dos demais tratamentos propostos serão apresentados posteriormente em forma de tabelas. A análise numérica consistiu em obter os resultados para a combinação da telha de PRFV em conjunto com painéis de dois e três centímetros.

Os demais tratamentos serão apresentados em respectivas tabelas contendo os resultados analisados.

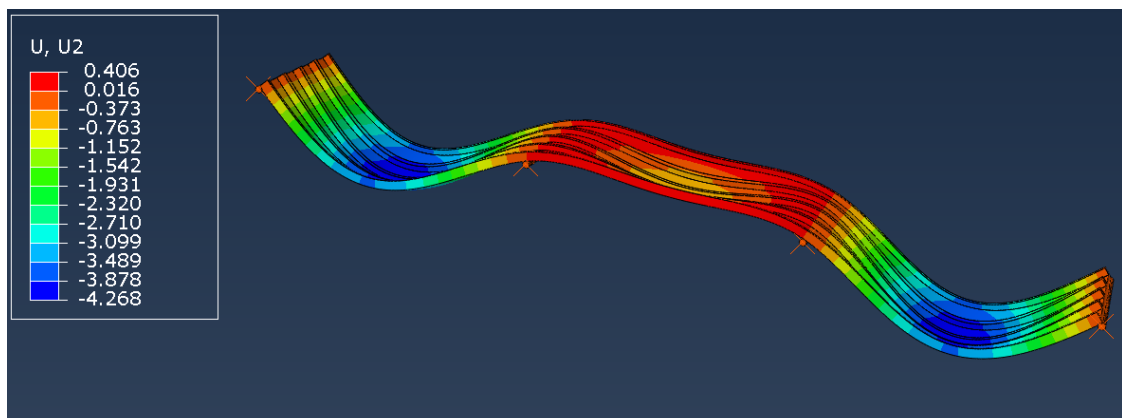
Abaixo segue resultados mostrando as tensões de Von Mises e as deformações máximas para o conjunto Telha mais painel de dois centímetros, como apresentado nas Figuras 44 e 45.

Figura 44 - Tensões de V. Mises para o painel de 2cm.



Fonte: do próprio autor (2024)

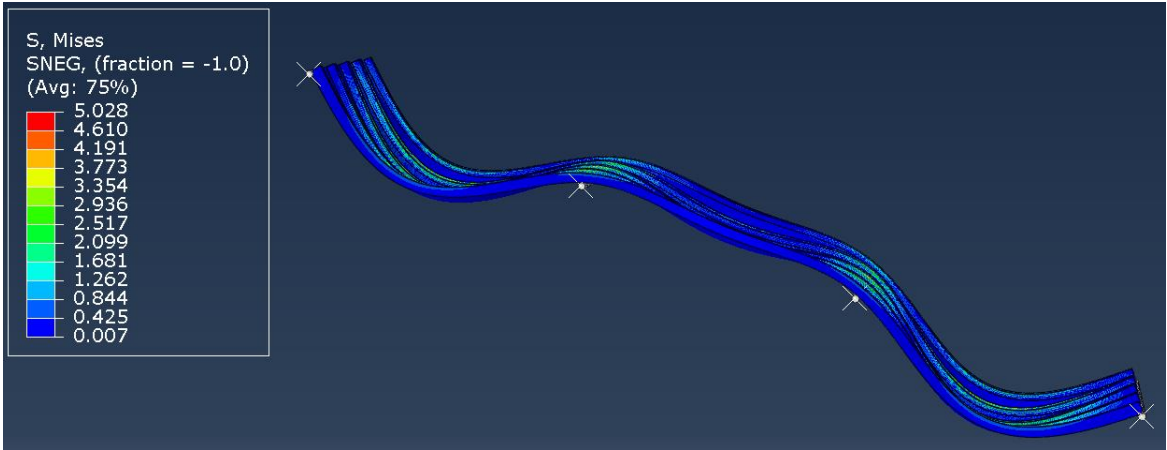
Figura 45 - Deformações máximas para o painel de 2cm.



Fonte: do próprio autor (2024)

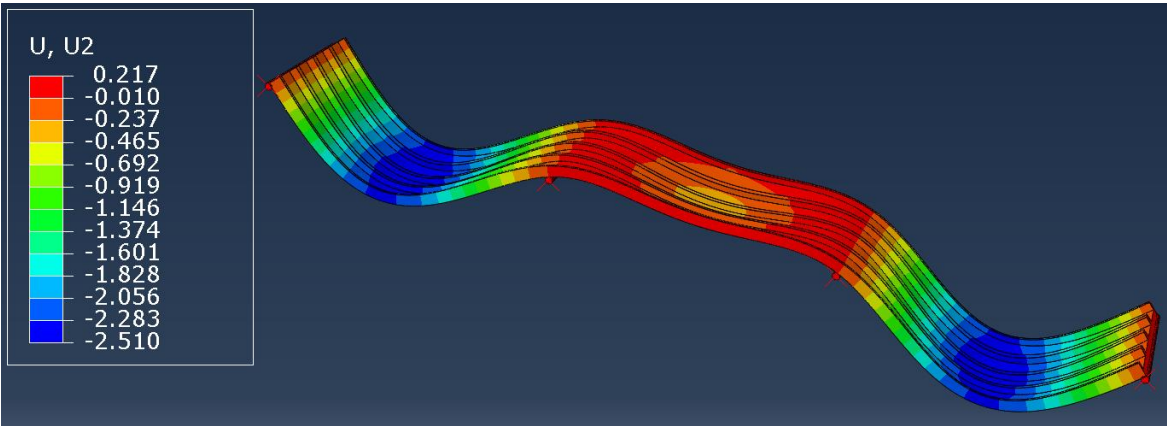
A seguir os resultados mostrando as tensões de Von Mises e as deformações máximas para o conjunto Telha mais painel de três centímetros, como apresentado nas Figuras 46 e 47.

Figura 46 - Tensões de V. Mises para o painel de 3cm.



Fonte: do próprio autor (2024)

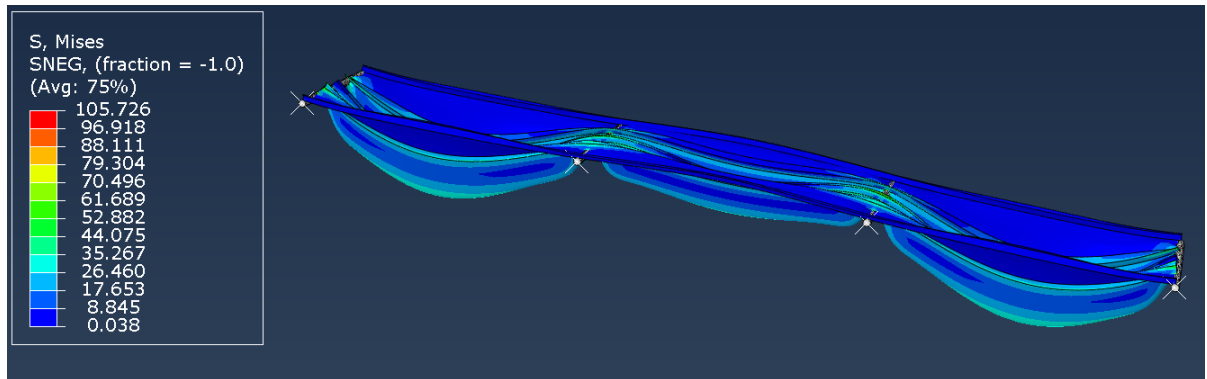
Figura 47 - Deformações máximas para o painel de 3cm.



Fonte: do próprio autor (2024)

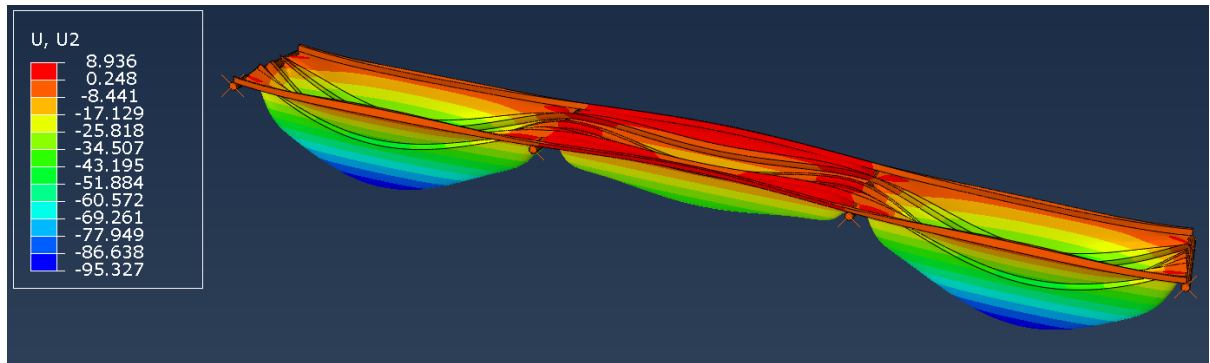
Para melhor justificar o uso dos painéis em conjunto com a telha, também foi proposta uma mesma análise aplicando o carregamento apenas na telha e obtendo os resultados de deslocamentos, de acordo com as figuras 48 e 49.

Figura 48 - Tensões de V. Mises para a telha sem painel.



Fonte: do próprio autor (2024)

Figura 49 - Deformações máximas para a telha sem painel.



Fonte: do próprio autor (2024)

Nas tabelas 15, 16 e 17 são apresentados os demais resultados das análises para os diferentes tipos de tratamentos propostos. Levando em conta todas as variáveis propostas, foram analisados 43 tratamentos de simulação numérica.

Tabela 15 – Resultados obtidos de cada tratamento das flechas em painéis compostos de 100% Seringueira.

Análise	Espessura do painel	Vão entre apoios	Carregamento (kN/m ²)	Flecha (mm)	L/500 (mm)	Relação Flecha / L/500
1	2 cm	1 m	Distribuído	1,78	2,00	89,00%
2	2 cm	1 m	Local 1º vão	1,84	2,00	92,00%
3	2 cm	1 m	Local 2º vão	1,81	2,00	90,50%
4	2 cm	1 m	Local 3º vão	1,79	2,00	89,50%
5	2 cm	2 m	Distribuído	3,89	4,00	97,25%
6	2 cm	2 m	Local 1º vão	3,92	4,00	98,00%
7	2 cm	2 m	Local 2º vão	3,87	4,00	96,75%
8	3 cm	1 m	Distribuído	1,56	2,00	78,00%
9	3 cm	1 m	Local 1º vão	1,61	2,00	80,50%
10	3 cm	1 m	Local 2º vão	1,58	2,00	79,00%
11	3 cm	1 m	Local 3º vão	1,55	2,00	77,50%
12	3 cm	2 m	Distribuído	3,35	4,00	83,75%
13	3 cm	2 m	Local 1º vão	3,45	4,00	86,25%
14	3 cm	2 m	Local 2º vão	3,41	4,00	85,25%

Fonte: do próprio autor (2024)

Tabela 16 – Resultados obtidos de cada tratamento das flechas em painéis compostos de 70% Seringueira e 30% Pinus.

Análise	Espessura do painel	Vão entre apoios	Carregamento (kN/m ²)	Flecha (mm)	L/500 (mm)	Relação Flecha / L/500
1	2 cm	1 m	Distribuído	1,72	2,00	86,00%
2	2 cm	1 m	Local 1º vão	1,76	2,00	88,00%
3	2 cm	1 m	Local 2º vão	1,73	2,00	86,50%
4	2 cm	1 m	Local 3º vão	1,71	2,00	85,50%
5	2 cm	2 m	Distribuído	3,75	4,00	93,75%
6	2 cm	2 m	Local 1º vão	3,79	4,00	94,75%
7	2 cm	2 m	Local 2º vão	3,76	4,00	94,00%
8	3 cm	1 m	Distribuído	1,49	2,00	74,50%
9	3 cm	1 m	Local 1º vão	1,56	2,00	78,00%
10	3 cm	1 m	Local 2º vão	1,53	2,00	76,50%
11	3 cm	1 m	Local 3º vão	1,45	2,00	72,50%
12	3 cm	2 m	Distribuído	3,15	4,00	78,75%
13	3 cm	2 m	Local 1º vão	3,35	4,00	83,75%
14	3 cm	2 m	Local 2º vão	3,32	4,00	83,00%

Fonte: do próprio autor (2024)

Tabela 17 – Resultados obtidos de cada tratamento das flechas em painéis compostos de 100% Pinus.

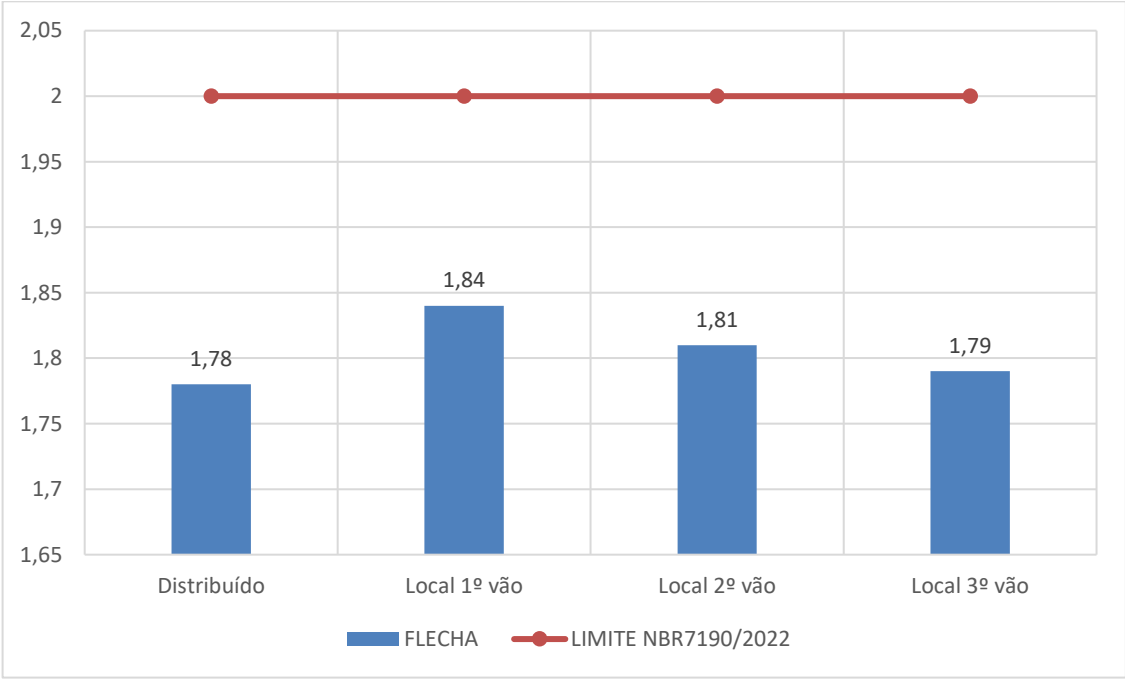
Análise	Espessura do painel	Vão entre apoios	Carregamento (kN/m ²)	Flecha (mm)	L/500 (mm)	Relação Flecha / L/500
1	2 cm	1 m	Distribuído	1,34	2,00	67,00%
2	2 cm	1 m	Local 1º vão	1,45	2,00	72,50%
3	2 cm	1 m	Local 2º vão	1,37	2,00	68,50%
4	2 cm	1 m	Local 3º vão	1,32	2,00	66,00%
5	2 cm	2 m	Distribuído	3,04	4,00	76,00%
6	2 cm	2 m	Local 1º vão	3,36	4,00	84,00%
7	2 cm	2 m	Local 2º vão	3,32	4,00	83,00%
8	3 cm	1 m	Distribuído	1,12	2,00	56,00%
9	3 cm	1 m	Local 1º vão	1,19	2,00	59,50%
10	3 cm	1 m	Local 2º vão	1,15	2,00	57,50%
11	3 cm	1 m	Local 3º vão	1,13	2,00	56,50%
12	3 cm	2 m	Distribuído	2,79	4,00	69,75%
13	3 cm	2 m	Local 1º vão	2,83	4,00	70,75%
14	3 cm	2 m	Local 2º vão	2,81	4,00	70,25%

Fonte: do próprio autor (2024)

Os resultados obtidos nas análises numéricas confirmaram que as deformações máximas (flechas) dos conjuntos compostos por telhas de poliéster reforçado com fibra de vidro (PRFV) associadas a painéis aglomerados de madeira estão dentro dos limites normativos estabelecidos pela NBR 7190/2022.

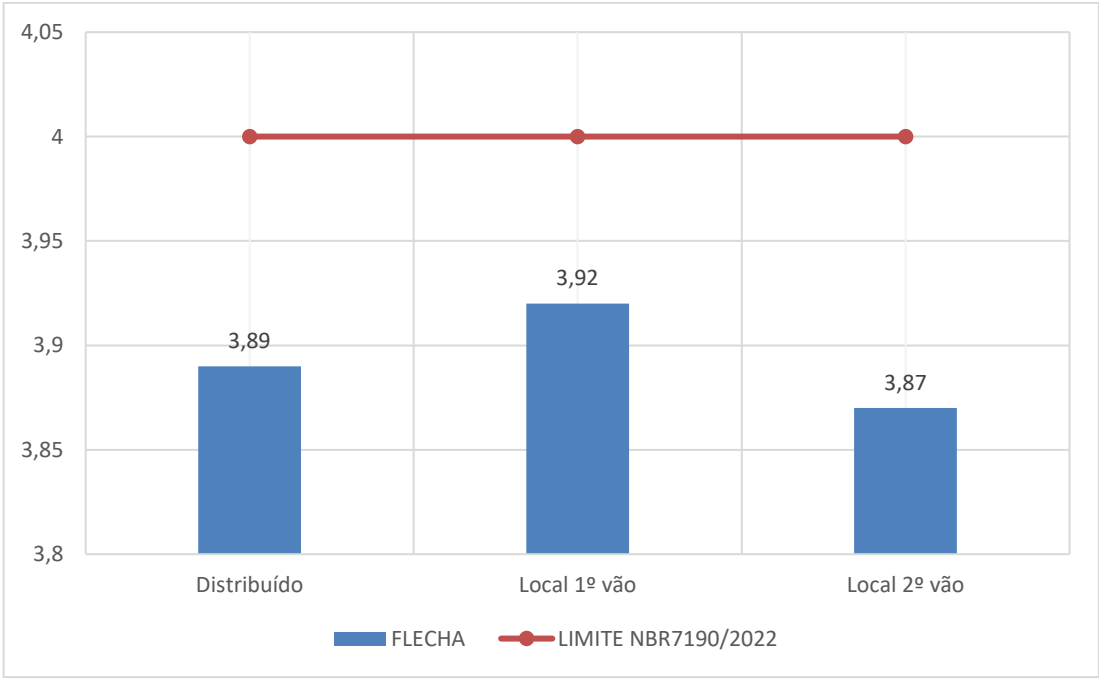
Os resultados também serão apresentados de forma agrupada nos gráficos abaixo.

Gráfico 1 – Flechas (mm) obtidas em painéis de 2cm compostos de 100% Seringueira e vão de 1m entre apoios.



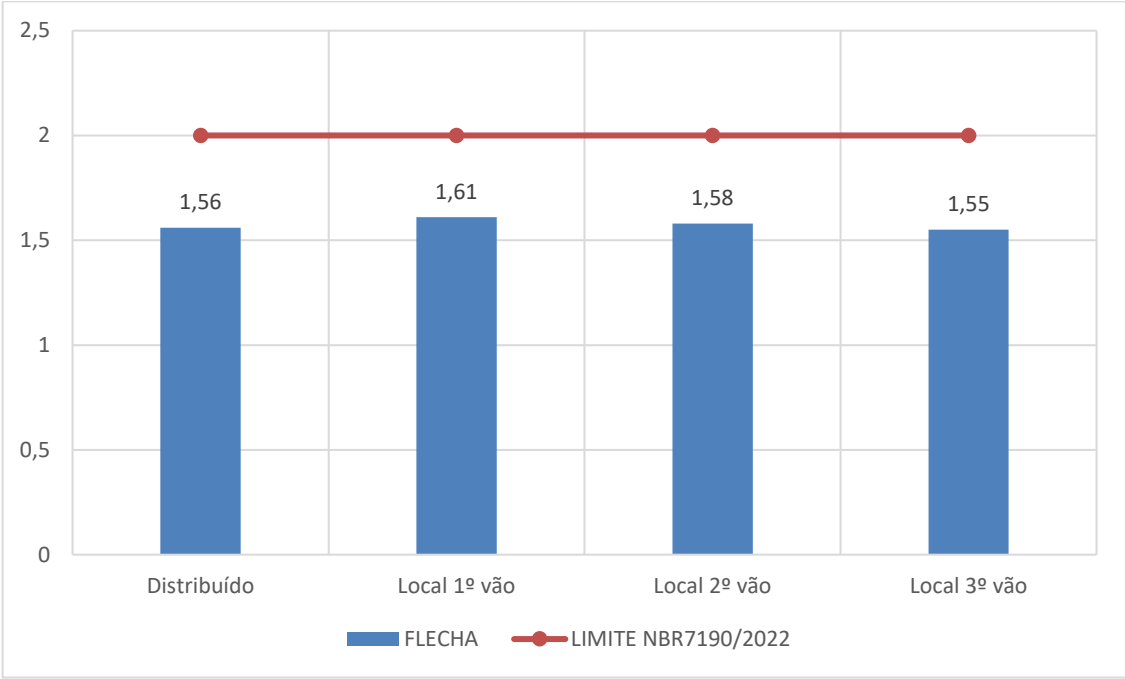
Fonte: do próprio autor (2024)

Gráfico 2 – Flechas (mm) obtidas em painéis de 2cm compostos de 100% Seringueira e vão de 2m entre apoios.



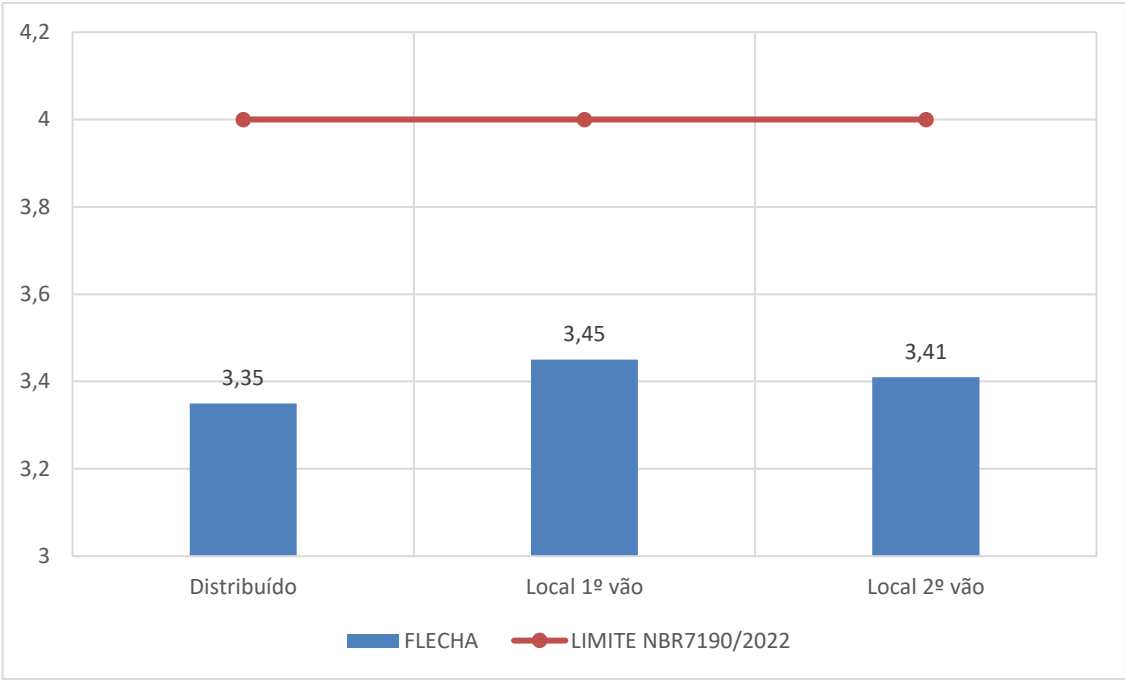
Fonte: do próprio autor (2024)

Gráfico 3 – Flechas (mm) obtidas em painéis de 3cm compostos de 100% Seringueira e vão de 1m entre apoios.



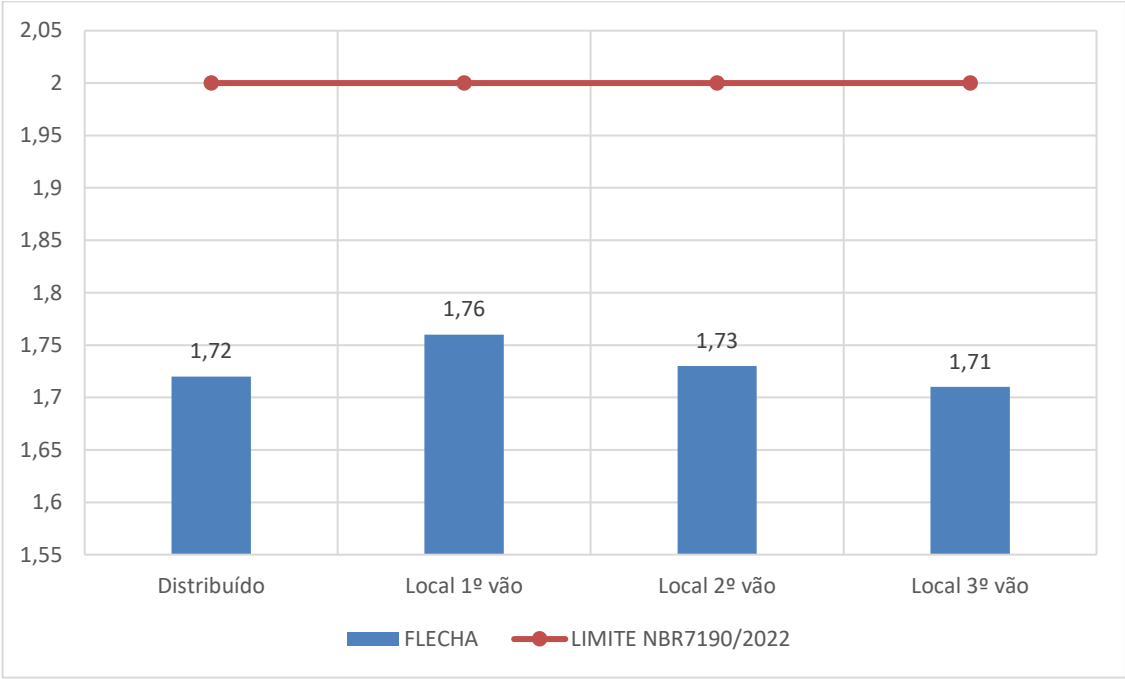
Fonte: do próprio autor (2024)

Gráfico 4 – Flechas (mm) obtidas em painéis de 3cm compostos de 100% Seringueira e vão de 2m entre apoios.



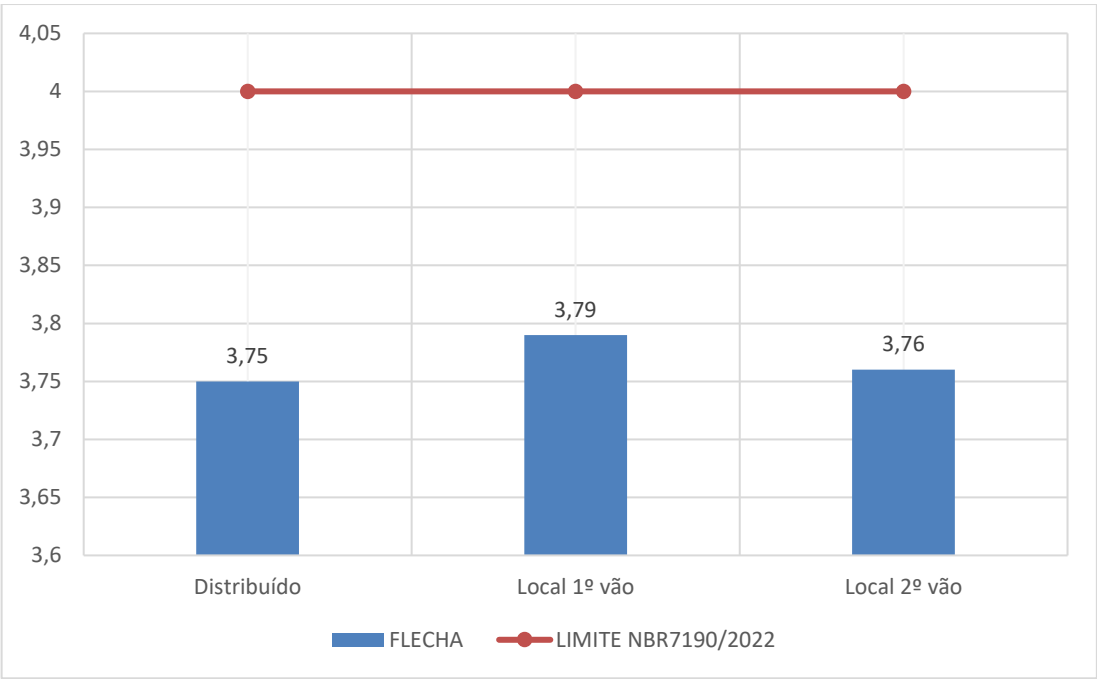
Fonte: do próprio autor (2024)

Gráfico 5 – Flechas (mm) obtidas em painéis de 2cm compostos de 70% Seringueira e 30% Pinus e vão de 1m entre apoios.



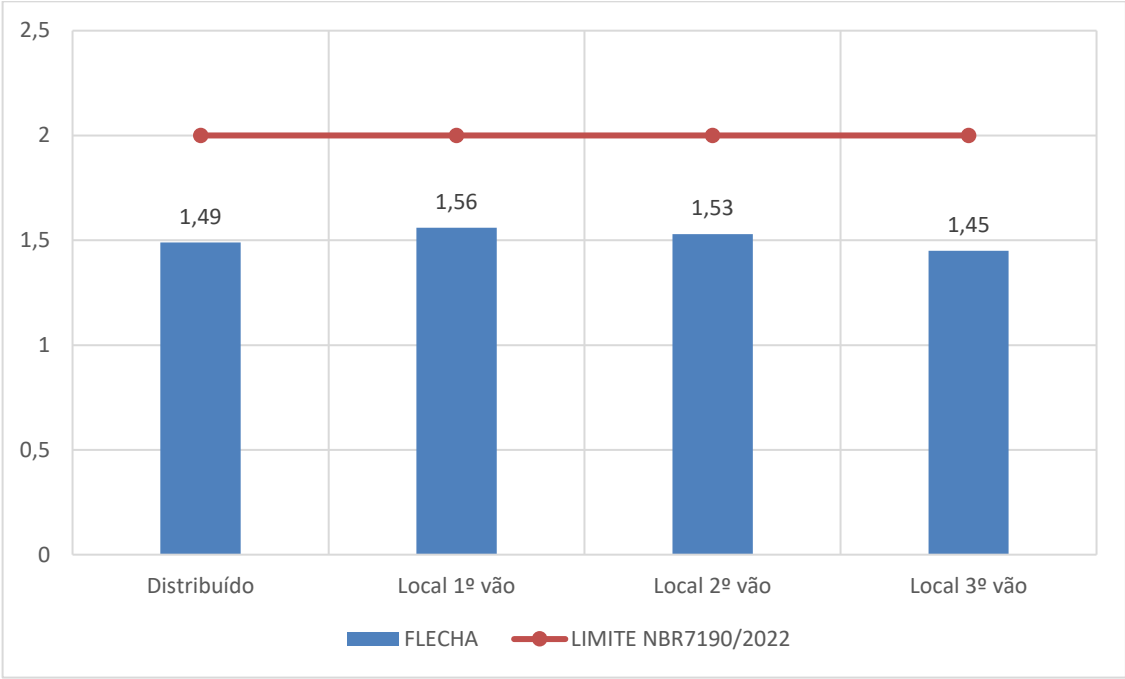
Fonte: do próprio autor (2024)

Gráfico 6 – Flechas (mm) obtidas em painéis de 2cm compostos de 70% Seringueira e 30% Pinus e vão de 2m entre apoios.



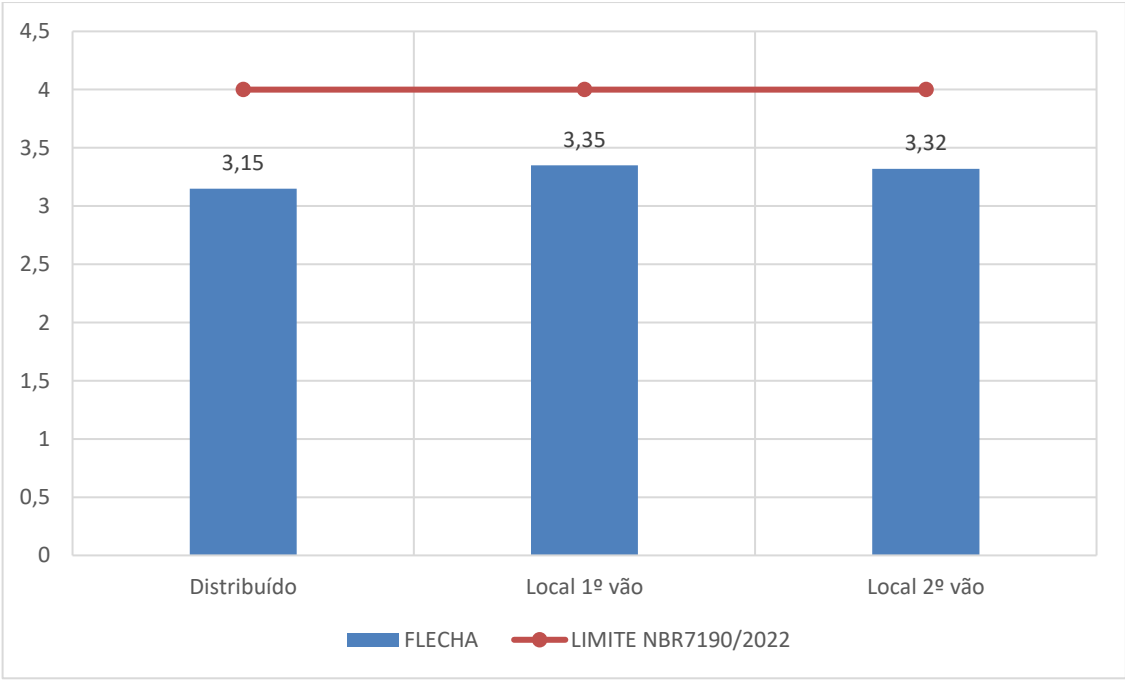
Fonte: do próprio autor (2024)

Gráfico 7 – Flechas (mm) obtidas em painéis de 3cm compostos de 70% Seringueira e 30% Pinus e vão de 1m entre apoios.



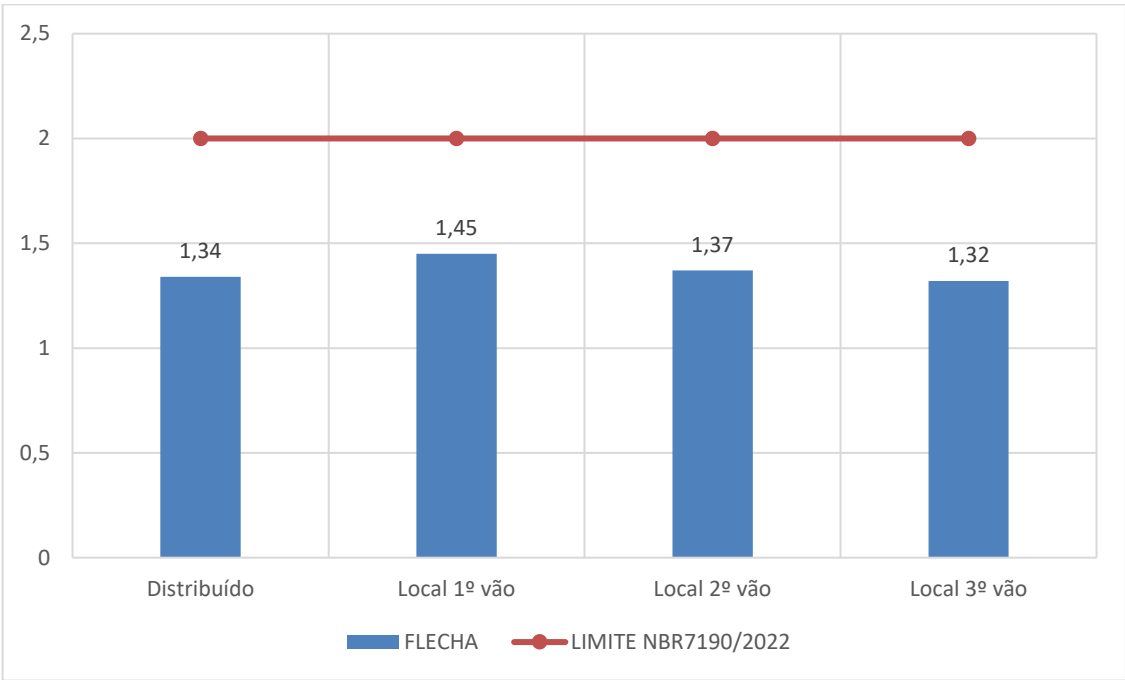
Fonte: do próprio autor (2024)

Gráfico 8 – Flechas (mm) obtidas em painéis de 3cm compostos de 70% Seringueira e 30% Pinus e vão de 2m entre apoios.



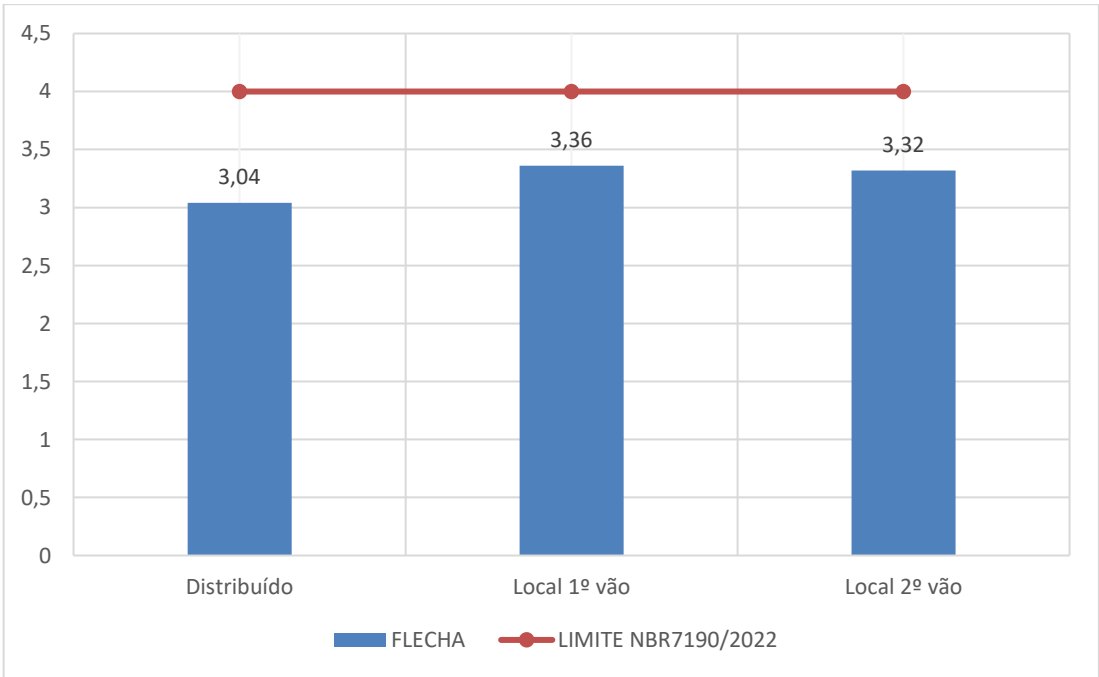
Fonte: do próprio autor (2024)

Gráfico 9 – Flechas (mm) obtidas em painéis de 2cm compostos de 100% Pinus e vão de 1m entre apoios.



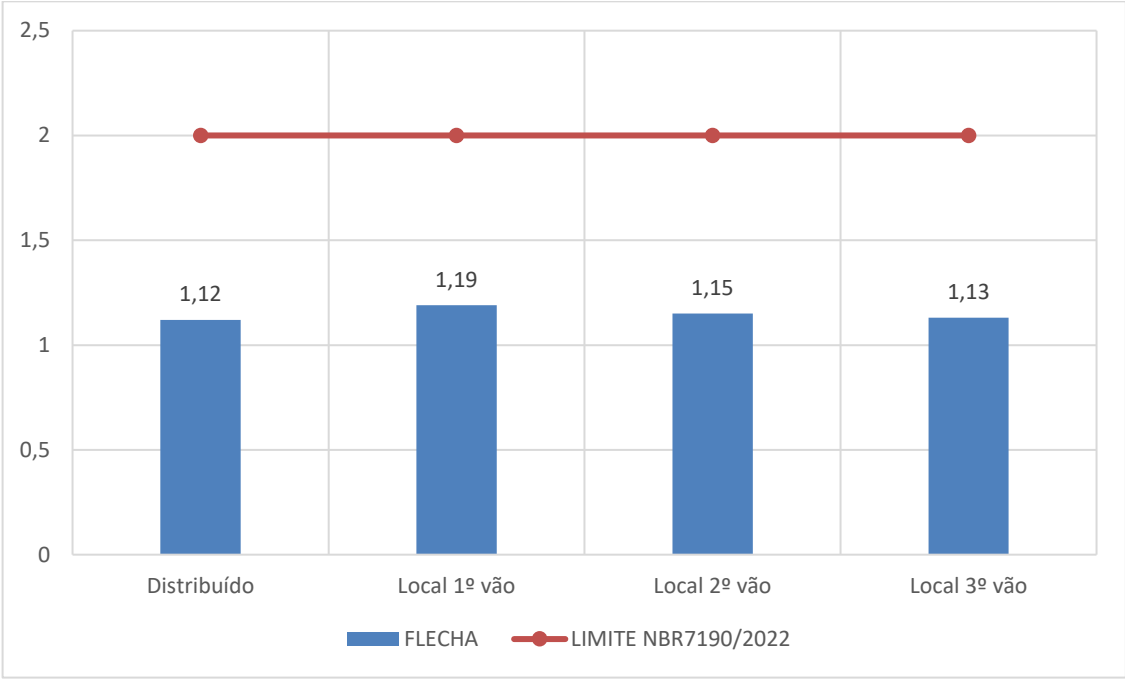
Fonte: do próprio autor (2024)

Gráfico 10 – Flechas (mm) obtidas em painéis de 2cm compostos de 100% Pinus e vão de 2m entre apoios.



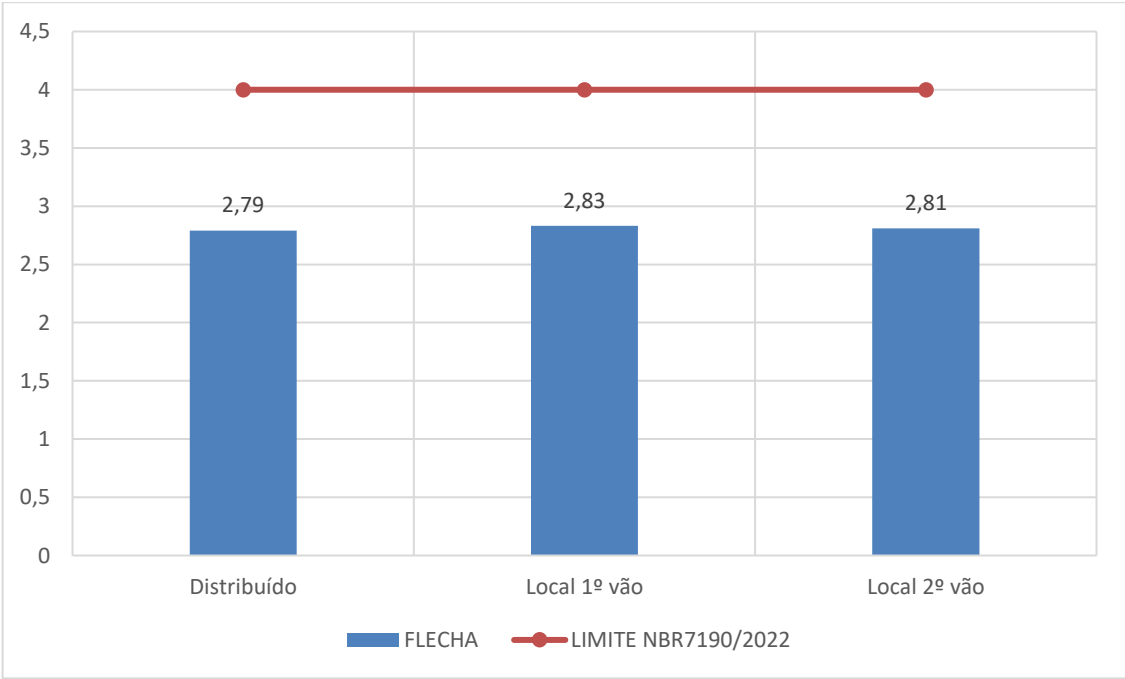
Fonte: do próprio autor (2024)

Gráfico 11 – Flechas (mm) obtidas em painéis de 3cm compostos de 100% Pinus e vão de 1m entre apoios.



Fonte: do próprio autor (2024)

Gráfico 12 – Flechas (mm) obtidas em painéis de 3cm compostos de 100% Pinus e vão de 2m entre apoios.



Fonte: do próprio autor (2024)

Com a utilização de painéis de espessura de 2cm, o deslocamento máximo observado foi de 3,36mm para vão de 2m entre apoios e carga localizada no 1º vão. Já para os painéis com 3cm de espessura, o valor máximo da flecha foi de 3,07mm para vão de 2m entre apoios e carga localizada no 1º vão, valores significativamente inferiores ao limite de 4,00mm ($L/500$). Esses resultados demonstram que, mesmo com a espessura reduzida de 2 cm, o conjunto é capaz de atender tanto ao estado limite último quanto ao estado limite de serviço, assegurando economia de material sem comprometer a segurança.

Por outro lado, as análises indicaram que as telhas, quando analisadas isoladamente, apresentaram deslocamentos excessivos de 95,327mm para vão de 2m entre apoios com carga localizada no 1º vão evidenciando a insuficiência do PRFV como elemento estrutural autônomo. Isso reforça a importância da associação com os painéis aglomerados para melhorar a rigidez e a capacidade de redistribuição de forças do conjunto.

Esses resultados destacam a viabilidade técnica do uso combinado de telhas em PRFV e painéis aglomerados, abrindo novas possibilidades de aplicação para sistemas construtivos leves e sustentáveis.

Para avaliar a capacidade resistente dos painéis em conjunto com as telhas, também foram obtidos os valores máximos de carregamento considerando o limite normativo $L/500$ para as flechas, desta forma, são indicados, nas tabelas 18, 19 e 20 abaixo, os acréscimos de carga possíveis de serem aplicados.

Tabela 18 – Acréscimo de carga considerando o limite normativo $L/500$ para painéis compostos de 100% Seringueira.

Análise	Espessura do painel	Vão entre apoios	Carregamento (kN/m ²)	Carga aplicada (kN/m ²)	Flecha (mm)	Limite de carga (kN/m ²)	Acréscimo de carga
1	2 cm	1 m	Distribuído	1,50	1,34	2,24	49,25%
2	2 cm	1 m	Local 1º vão	1,50	1,78	1,69	12,36%
3	2 cm	1 m	Local 2º vão	1,50	1,65	1,82	21,21%
4	2 cm	1 m	Local 3º vão	1,50	1,54	1,95	29,87%
5	2 cm	2 m	Distribuído	1,50	3,54	1,69	12,99%
6	2 cm	2 m	Local 1º vão	1,50	3,77	1,59	6,10%
7	2 cm	2 m	Local 2º vão	1,50	3,59	1,67	11,42%
8	3 cm	1 m	Distribuído	1,50	1,67	1,80	19,76%
9	3 cm	1 m	Local 1º vão	1,50	1,89	1,59	5,82%
10	3 cm	1 m	Local 2º vão	1,50	1,75	1,71	14,29%
11	3 cm	1 m	Local 3º vão	1,50	1,56	1,92	28,21%
12	3 cm	2 m	Distribuído	1,50	3,35	1,79	19,40%
13	3 cm	2 m	Local 1º vão	1,50	3,58	1,68	11,73%
14	3 cm	2 m	Local 2º vão	1,50	3,51	1,71	13,96%

Fonte: do próprio autor (2024)

Tabela 19 – Acréscimo de carga considerando o limite normativo $L/500$ para painéis compostos de 70% Seringueira e 30% Pinus.

Análise	Espessura do painel	Vão entre apoios	Carregamento (kN/m^2)	Carga aplicada (kN/m^2)	Flecha (mm)	Limite de carga (kN/m^2)	Acréscimo de carga
1	2 cm	1 m	Distribuído	1,50	1,24	2,42	61,29%
2	2 cm	1 m	Local 1º vão	1,50	1,66	1,81	20,48%
3	2 cm	1 m	Local 2º vão	1,50	1,55	1,94	29,03%
4	2 cm	1 m	Local 3º vão	1,50	1,43	2,10	39,86%
5	2 cm	2 m	Distribuído	1,50	3,44	1,74	16,28%
6	2 cm	2 m	Local 1º vão	1,50	3,66	1,64	9,29%
7	2 cm	2 m	Local 2º vão	1,50	3,48	1,72	14,94%
8	3 cm	1 m	Distribuído	1,50	1,57	1,91	27,39%
9	3 cm	1 m	Local 1º vão	1,50	1,78	1,69	12,36%
10	3 cm	1 m	Local 2º vão	1,50	1,64	1,83	21,95%
11	3 cm	1 m	Local 3º vão	1,50	1,45	2,07	37,93%
12	3 cm	2 m	Distribuído	1,50	3,25	1,85	23,08%
13	3 cm	2 m	Local 1º vão	1,50	3,47	1,73	15,27%
14	3 cm	2 m	Local 2º vão	1,50	3,41	1,76	17,30%

Fonte: do próprio autor (2024)

Tabela 20 – Acréscimo de carga considerando o limite normativo L/500 para painéis compostos de 100% Pinus.

Análise	Espessura do painel	Vão entre apoios	Carregamento (kN/m ²)	Carga aplicada (kN/m ²)	Flecha (mm)	Limite de carga (kN/m ²)	Acréscimo de carga
1	2 cm	1 m	Distribuído	1,50	1,12	2,68	78,57%
2	2 cm	1 m	Local 1º vão	1,50	1,45	2,07	37,93%
3	2 cm	1 m	Local 2º vão	1,50	1,37	2,19	45,99%
4	2 cm	1 m	Local 3º vão	1,50	1,29	2,33	55,04%
5	2 cm	2 m	Distribuído	1,50	3,04	1,97	31,58%
6	2 cm	2 m	Local 1º vão	1,50	3,36	1,79	19,05%
7	2 cm	2 m	Local 2º vão	1,50	3,28	1,83	21,95%
8	3 cm	1 m	Distribuído	1,50	1,34	2,24	49,25%
9	3 cm	1 m	Local 1º vão	1,50	1,58	1,90	26,58%
10	3 cm	1 m	Local 2º vão	1,50	1,43	2,10	39,86%
11	3 cm	1 m	Local 3º vão	1,50	1,26	2,38	58,73%
12	3 cm	2 m	Distribuído	1,50	2,95	2,03	35,59%
13	3 cm	2 m	Local 1º vão	1,50	3,07	1,95	30,29%
14	3 cm	2 m	Local 2º vão	1,50	2,98	2,01	34,23%

Fonte: do próprio autor (2024)

Segue abaixo ainda, na tabela 21, os resultados obtidos das tensões atuantes para cada situação, bem como a relação entre tensão atuante e Módulo de resistência a flexão dos painéis aglomerados para as três composições.

Tabela 21 – Relação Tensão atuante e MOR dos painéis para as três composições de misturas.

Análise	Espessura do painel	Vão entre apoios	Carregamento (kN/m ²)	Tensão atuante (Mpa)	Tensão / MOR 100%S	Tensão / MOR 70%S 30%P	Tensão / MOR 100%P
1	2 cm	1 m	Distribuído	3,89	28,75%	26,94%	23,03%
2	2 cm	1 m	Local 1º vão	4,43	32,74%	30,68%	26,23%
3	2 cm	1 m	Local 2º vão	4,26	31,49%	29,50%	25,22%
4	2 cm	1 m	Local 3º vão	4,16	30,75%	28,81%	24,63%
5	2 cm	2 m	Distribuído	5,03	37,18%	34,83%	29,78%
6	2 cm	2 m	Local 1º vão	5,98	44,20%	41,41%	35,41%
7	2 cm	2 m	Local 2º vão	5,78	42,72%	40,03%	34,22%
8	3 cm	1 m	Distribuído	3,89	28,75%	26,94%	23,03%
9	3 cm	1 m	Local 1º vão	4,43	32,74%	30,68%	26,23%
10	3 cm	1 m	Local 2º vão	4,26	31,49%	29,50%	25,22%
11	3 cm	1 m	Local 3º vão	4,16	30,75%	28,81%	24,63%
12	3 cm	2 m	Distribuído	5,03	37,18%	34,83%	29,78%
13	3 cm	2 m	Local 1º vão	5,98	44,20%	41,41%	35,41%
14	3 cm	2 m	Local 2º vão	5,78	42,72%	40,03%	34,22%

Fonte: do próprio autor (2024)

6 CONCLUSÕES

Esta dissertação abordou a análise do comportamento mecânico de telhas em poliéster reforçado com fibra de vidro (PRFV) combinadas com painéis aglomerados de madeira, utilizando métodos numéricos para avaliar a viabilidade de aplicação desse sistema em coberturas que requerem resistência a grandes cargas. A pesquisa destaca a importância da simulação computacional como ferramenta eficiente para prever o desempenho estrutural de materiais e sistemas construtivos, especialmente em contextos onde inovação e sustentabilidade são essenciais.

A escolha do PRFV, associado aos painéis aglomerados, reflete uma busca por soluções construtivas que conciliem leveza, resistência e sustentabilidade. O uso de painéis fabricados com resíduos de madeira reforça a contribuição desse estudo para o aproveitamento de recursos renováveis e para a redução do impacto ambiental da construção civil. A pesquisa também apresenta um avanço ao explorar as potencialidades desses materiais em conjunto, ampliando suas aplicações no setor.

O trabalho evidenciou que a integração entre telhas de PRFV e painéis aglomerados representa uma solução promissora para o desenvolvimento de sistemas estruturais leves e econômicos, atendendo às exigências normativas e oferecendo versatilidade em projetos de coberturas. A investigação abrangeu diferentes variáveis, como espessuras, aplicações de cargas e condições de apoio, permitindo uma análise detalhada do desempenho estrutural sob cenários típicos de carregamento, incluindo aplicações modernas, como a instalação de placas solares e fotovoltaicas.

Além disso, ao alinhar-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente no que tange à inovação em infraestrutura (ODS 9) e à promoção de padrões de consumo e produção sustentáveis (ODS 12), a pesquisa reafirma seu compromisso com a sustentabilidade e a inovação tecnológica. A utilização de materiais recicláveis e renováveis aponta para soluções construtivas que não apenas atendem às necessidades de engenharia, mas também contribuem para a preservação ambiental e a economia circular.

Por fim, a ausência de estudos prévios que abordem essa combinação de materiais reforça o caráter pioneiro da dissertação, que oferece subsídios importantes para futuras pesquisas e aplicações práticas. A contribuição deste trabalho para o

campo da engenharia civil está em promover a integração entre ciência, tecnologia e sustentabilidade, propondo soluções que atendam às demandas contemporâneas do setor construtivo de forma eficiente e ambientalmente responsável.

7 RECOMENDAÇÕES PARA PRÓXIMAS PESQUISAS

Com base nos resultados desta pesquisa, diversas oportunidades de aprofundamento e ampliação do tema foram identificadas, oferecendo caminhos para o desenvolvimento de estudos futuros.

Uma possibilidade relevante é a investigação experimental do comportamento mecânico do conjunto telha de PRFV e painel aglomerado, para validar os resultados obtidos numericamente e compreender aspectos práticos, como o processo de fabricação e as tolerâncias de montagem. Ensaios laboratoriais poderiam fornecer dados complementares sobre deformações, tensões e comportamento em longo prazo, especialmente sob condições climáticas variáveis, como exposição a altas temperaturas, umidade e radiação solar.

Outro aspecto que merece atenção é a análise do desempenho estrutural em aplicações específicas, como coberturas para edificações industriais, comerciais e residenciais e elementos estruturais como placas e lajes. Estudos poderiam explorar diferentes configurações geométricas das telhas e painéis, variando dimensões, espessuras e disposições de apoio, além de analisar os efeitos da sobreposição de módulos para aumentar a capacidade estrutural e a resistência.

Adicionalmente, é recomendada a inclusão de análises dinâmicas e de estabilidade frente a carregamentos extremos, como ventos fortes e impactos, avaliando o desempenho do conjunto em cenários críticos. Isso ampliaria a confiabilidade do sistema para uso em regiões sujeitas a eventos climáticos severos.

Do ponto de vista sustentável, seria interessante investigar o impacto ambiental e o ciclo de vida dos materiais utilizados, considerando desde a produção até o descarte ou reciclagem. Estudos poderiam avaliar a viabilidade de incorporar outros resíduos lignocelulósicos na composição dos painéis aglomerados, promovendo ainda mais a economia circular e o reaproveitamento de recursos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT **NBR 6120/2019**: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT **NBR 8681/2003**: Ações e segurança nas estruturas. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7190/2022**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF. **Anuário Estatístico Abraf 2013**. Disponível em: www.ipef.br/estatisticas/relatorios/anuarioabraf13-br.pdf. Acesso em: 20 jun. 2022.

AGUIAR, A. V.; SOUSA, V. A.; SHIMIZU, J. Y. Espécies de Pinus mais plantadas no Brasil. Cultivo de Pinus. **Embrapa Florestas**. Sistema de Produção. 2 ed. Jun 2014. Disponível em: <https://www.spo.cnptia.embrapa.br/temas-publicados>. Acesso em: 08 set. 2022.

ALMEIDA, F. A. L. **A madeira como material estrutural: projeto da estrutura da cobertura de um edifício**. 201. Tese de Mestrado Integrado. Engenharia Civil (Materiais e Processos de Construção) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2012. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10216/72613>. Acessado em: 16 de jun. de 2022.

ALMEIDA, N. M. B. G. **Estudo estrutural de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de juta**. 2012. 216 f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2012.

ALVES, L. M. **Método dos elementos finitos**. Dissertação – Universidade Federal do Paraná. Curitiba: UFPR.

ARAUJO, C. K. C.; CAMPOS, C. I. de; CAMARGO, S. K. de C. A.; CAMARGO, B. S. Caracterização mecânica de painéis aglomerados de média densidade produzidos a partir de resíduos de madeira. **Revista Gestão Industrial**, Ponta Grossa, v. 15, n. 1, p. 197-211, jan./mar.2019.

AZAMBUJA, M. A.; DIAS, A. A. Use of castor oil-based polyurethane adhesive in the production of glued laminated timber beams. **Materials Research**, São Carlos, v. 9, n. 3, p. 287-29, set 2006.

BAÑO, V.; GODOY, D.; VEGA, A. Experimental and numerical evaluation of cross-laminated timber (clt) panels produced with pine timber from thinnings in uruguay. *In*: world conference on timber engineering, wien, austria. 2016. P. 8.

BARCELLOS, I. O.; SOUZA, A. C.; SELKE, A. E. Incorporação de Lodo Industrial em Compósitos de Resina Poliéster. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 19, n. 2, p. 155-159, 2009. Departamento de Química, Universidade Regional de Blumenau, SC, 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/po/v19n2/v19n2a14.pdf>. Acesso em: 6 nov. 2023.

BERTOLINI, M. S. *et al.* Painéis de partículas provenientes de rejeitos de Pinus sp. Tratado com preservante e resina derivada de biomassa. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 38, n. 2, p. 339-346, 2014.

BIAZUS, A.; HORA, A. B.; LEITE, B. G. P. Panorama de mercado: painéis de madeira. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 32, p. 49-90, set. 2010.

BORTOLETTO JÚNIOR, G. Estudo de algumas propriedades físicas e mecânicas da madeira de Pinus merkusii. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 79, p. 165-243, set. 2008.

CARASCHI, J. C.; LEÃO, A. L.; CHAMMA, P. V. C. Avaliação de Painéis Produzidos a partir de Resíduos Sólidos para Aplicação na Arquitetura. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 19, p. 47-53, 2009.

CALIL NETO, C.; MOLINA, J. C.; CALIL JUNIOR, C.; ROCCO LAHR, F. A. Modelagem numérica do comportamento de ligações com parafusos autoatarraxantes em x em corpos de prova de mlc com madeiras do tipo eucalipto urograndis. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 1, p. 1-13, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170001.0121>.

CASTRO, E. C.; SOUZA, F. T.; SARMANHO, A. M. C. Análise numérica de ligação parafusada semirrígida em perfis formados a frio. **For Science**, São Luiz Formiga, v. 7, n. 2, 2019. DOI: <https://doi.org/10.29069/forscience.2019v7n2.e652>.

CRAVO, J. C. M.; SARTORI, D. I.; FIORELLI, J. Agro-industrial waste composites as components for rural buildings. **Lignocellulosic Fibre and Biomass-based Composite Materials**, [s. l.], p. 13-25, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100959-8.00002-0>.

DIAS, F. M. **Aplicação de resina poliuretana à base de mamona na fabricação de painéis de madeira aglomerada**. 2005. 178 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

FLORES, E. S. *et al.* Analysis of cross-laminated timber by computational homogenisation and experimental validation. **Composite Structures**, London, v. 121, p. 386-394, 2015.

GILIO, G. C. **Avaliação de painéis de partículas homogêneas empregando-se madeira de hevea brasiliensis e tectona grandis, aglutinadas com adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona**. 2020. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira, 2020.

GUTH, F. **Desenvolvimento de um tubo compósito polimérico reforçado com fibra de carbono**. 2018. 177 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Do Vale De Taquari, Lajeado, Rio Grande Do Sul, 2018.

MUZEL, S. D. *et al.* MDP Panels Manufactured with Hevea Brasiliensis Overlaid with Bamboo Foil of Phyllostachys Edulis. **Advanced Materials Research**, Amsterdam, v. 1088, p. 686-689, 2015.

JUSTO, R. A. E. G. **Comparação do desempenho e de funcionamento de programas comerciais (ansys e sap2000) focado à análise sísmica**. 2001. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2001.

MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, J. E. *et al.* Finite element analysis of composite laminated timber (CLT). *In*: INTERNATIONAL RESEARCH CONFERENCE ON SUSTAINABLE ENERGY, ENGINEERING, MATERIALS AND ENVIRONMENT, 2nd., 2018, [s. l.]. **Proceedings [...]** [S. l.]: MDPI, 2018. p. 1454. DOI: <https://doi.org/10.3390/proceedings2231454>.

MOSLEMI, A. A. **Particleboard. Carbondale**: Southern Illinois University Press, 1974. v. 2, 245 p.

MÜZEL, S. D. **Madeira de Hevea brasiliensis como matéria prima para a produção de chapa de partículas aglomeradas**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade Estadual Paulista - UNESP, Itapeva, 2013.

PINTO, K. N. C. **Reciclagem de resíduos de materiais compósitos de matriz polimérica: poliéster insaturado reforçado com fibras de vidro**. 2002. 81 f. Tese (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

PINTO, K. N. C; MIRANDA, L. F. **Processos de fabricação de plástico reforçado: poliéster reforçado com fibras de vidro**. 1999. Monografia - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 1999.

PLANEFIBRA. **Manual técnico do fabricante**. [S. l.: s. n.], 2024. (Catálogo Técnico – Telhas reforçadas com fibra de vidro).

SILVA, D. S.; FARIAS, C. E.; ANTUNES, E. G. P. **Influência das variações térmicas na impermeabilidade e resistência mecânica das telhas pultrudadas (FRP)**. Revista Território, Espaço Construído E Meio Ambiente, Criciúma – SC, 2017.

ORTENZI JÚNIOR, A. **A fibra de vidro em matrizes poliméricas e cimentícias e seu uso estrutural em construção civil: o estado da arte**. 2007. 228 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

TREVISAN, M. F. **Painéis aglomerados homogêneos produzidos com partículas de pinus e seringueira e aglutinados com adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona:** avaliação das propriedades físicas e mecânicas. 2021. 121 f. Dissertação (Mestrado EM Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira, 2021.

WAMBUA, P, IVENS, J, VERPOEST, I. **Natural fibres:** can they replace glass in fibre reinforced plastics? Belgium: Elsevier Science, 2003.