

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL  
NÍVEL DOUTORADO**

**LÍVIA MARIA PALÁCIO RIBEIRO**

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO CLT – *CROSS-LAMINATED TIMBER* – EM  
ELEVADAS TEMPERATURAS VIA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

**São Leopoldo - RS**

**2023**

LÍVIA MARIA PALÁCIO RIBEIRO

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO CLT – *CROSS-LAMINATED TIMBER* – EM  
ELEVADAS TEMPERATURAS VIA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

Tese apresentada como requisito para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian

Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Fernanda Pacheco

São Leopoldo - RS

2023

R484c Ribeiro, Livia Maria Palácio  
Contribuição ao estudo do CLT – *Cross-Laminated Timber* – em elevadas temperaturas via simulação computacional / por Livia Maria Palácio Ribeiro. – 2023.  
160 f. : il.; 30 cm.

Tese (doutorado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2023.

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian ;  
Coorientadora: Profa. Dra. Fernanda Pacheco.

1. Estruturas de madeira. 2. *Cross-Laminated Timber*.  
3. Método dos elementos finitos. 4. Ligações. 5. Situação de incêndio. I. Título.

CDU 691

Catálogo na Fonte:

Bibliotecária Vanessa Borges Nunes - CRB 10/1556

LÍVIA MARIA PALÁCIO RIBEIRO

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO CLT – *CROSS-LAMINATED TIMBER* – EM  
ELEVADAS TEMPERATURAS VIA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

Tese apresentada como requisito para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Aprovada em 30 de novembro de 2023.

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Fernanda Pacheco – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Regina Celia Espinosa Modolo – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

Prof. Dr. Vinicius de Kayser Ortolan – Universidade Feevale

Prof. Dr. Uziel Cavalcante de Medeiros Quinino – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

Prof. Dr. Hinoel Zamis Ehrenbring – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

Dedico este trabalho à minha família,  
que é minha base e meu mais precioso bem.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, que me capacitou, sustentou e proporcionou meios para que eu pudesse chegar até esse momento.

Aos meus pais, Ildeu e Maria do Carmo (Cuca), que desde a mais tenra idade me ensinaram a confiar em Deus e saber que somente por meio dEle posso todas as coisas. Sou grata por suas orações incessantes, que me sustentaram, pelas palavras de incentivo, apoio e coragem, pelas conversas diárias, que faziam a distância e a saudade diminuírem, e por seu amor incondicional. Amo vocês mil milhões!

Aos meus irmãos, Kátia e Kleber, cunhados, Rogério e Suelem, e sobrinhos amados, Raquel, Débora e Henrique, que sonharam este sonho comigo. Sou grata pelas orações, pelas chamadas de atenção cheias de amor que me traziam à realidade, pelos incentivos e por acreditarem em mim. Agradeço pelas conversas por videochamadas, que me faziam estar mais próxima apesar da distância. Amo vocês infinito e além!

Ao meu orientador, Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian, que, ao ser interpelado em um Ibracon, aceitou de bom grado o desafio de me orientar. Obrigada pela confiança e pelo encorajamento durante todo esse período.

À minha coorientadora, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Fernanda Pacheco, que também aceitou o desafio de me orientar. Obrigada por suas consultorias, por muitas vezes me abrir a mente quando já não via mais uma solução, por sua paciência e pelo incentivo durante todo o processo. Você desempenhou um papel vital neste trabalho, razão pela qual serei grata por toda vida.

À amiga e irmã Kézia, que sempre esteve comigo, incentivando, dando colo e ouvindo meus dramas. Obrigada pelas suas orações, pelo seu companheirismo, pelas longas conversas e terapias no sofá, e pelos nossos “rolês” totalmente aleatórios. Sentirei falta.

Aos grandes amigos Raduan Krause Lopes e Pedro Jardim, que acompanharam minha jornada acadêmica e, apesar da distância geográfica, ajudaram neste trabalho, contribuindo com suas colocações pontuais. Obrigada pelos estímulos e encorajamento, pela confiança e pelas nossas resenhas. Sou muito feliz em tê-los como amigos.

Às amigas Ana Paula, Andréa, Eliziane, Joana, Lorena, Marcela, Marcely, Melissa e Rejane, pessoas fundamentais neste processo. Mesmo com toda a distância geográfica, a presença diária e constante em nossas conversas pelo WhatsApp e em nossos encontros semanais online fez os dias em São Leopoldo se tornarem mais curtos. Obrigada, gurias! Amo vocês!

À Unisinos, que me proporcionou conhecimento e ensino de qualidade por meio dos excelentes docentes do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC. Sou grata pelo excelente ambiente de estudo que me possibilitou desenvolver este trabalho.

À Fundação Universidade Federal de Rondônia – UNIR, Departamento de Engenharia Civil, que, por meio do incentivo à capacitação docente, permitiu o meu afastamento doutoral para que pudesse realizar este sonho.

Por fim, a todos que de maneira direta ou indireta contribuíram para que este trabalho pudesse acontecer, deixo o meu agradecimento.

*“If the 17<sup>th</sup> century was characterized by stonework,  
The 18<sup>th</sup> as the refinement of brickwork,  
The 19<sup>th</sup> as the heyday of steel structures,  
The 20<sup>th</sup> as the era of concrete,  
This leaves the 21<sup>th</sup> century open for a successor.  
My prediction is Engineered Timber.”*

Prof. Alex de Rijke  
(Diretor da Royal Arts College – Londres).



## RESUMO

O *Cross-Laminated Timber* (CLT) é um produto contemporâneo na construção civil e por isso tem tido uma grande evolução quanto à sua aplicabilidade construtiva no Brasil e no mundo. Apesar de ser um produto proveniente de um material combustível, têm surgido muitos estudos referentes ao uso do CLT, e um dos principais aspectos está em seu desempenho em situação de incêndio, que pode comprometer a estrutura. Por meio de simulações computacionais utilizando o *software Ansys* foram realizadas análises termomecânicas em painéis CLT, tipo piso-piso, ligados por parafuso de embeber, variando a espessura em 3, 5 e 7 camadas de lamelas, sendo denominados de painéis P1, P2 e P3. Para tanto, averiguou-se o comportamento dos painéis em situação de incêndio, impondo a eles patamares de temperatura entre 200°C, 400°C, 600°C, 800°C, 1000°C e 1200°C, em um tempo máximo de exposição ao fogo de 60 minutos, com o objetivo de verificar o efeito das transferências de calor na madeira e nas ligações bem como seus comportamentos mecânicos. Como resultados, à medida que a aumentava-se a temperatura os painéis de madeira demonstraram uma progressiva linear quanto à transferência de calor no interior da peça ao atingir o tempo máximo de 60 minutos, sendo que todos os modelos ultrapassaram o ponto de carbonização ao atingir o patamar de T400°C no instante 45min. Todavia, para a análise térmica a quantidade de camadas inibiu a transferência de calor nos parafusos, sendo que apenas painel P1 obteve um valor expressivo de 162,27°C de máxima temperatura em relação aos painéis P2 e P3, com 5 e 7 camadas. Quanto aos deslocamentos observou-se que os painéis de madeira tiveram pequenas deflexões, sendo que o painel P1 deslocou 6,3% a mais em relação ao painel P2, e 8,2% a mais em relação ao painel P3. E as deslocabilidades dos parafusos também foram pequenas, muito em virtude da condição de apoio aplicada, chegando a um máximo de  $\delta = 5,28 \times 10^{-3}$  mm para o painel P3. Dessa forma as investigações realizadas indicaram que à medida que se aumenta a espessura das lamelas nos painéis os elementos tende a adquirir melhores resultados termomecânicos.

**Palavras-chaves:** estruturas de madeira; *Cross-Laminated Timber*; método dos elementos finitos, ligações; situação de incêndio.

## ABSTRACT

Cross-Laminated Timber (CLT) is a contemporary product in civil construction, and therefore has undergone great evolution in terms of its constructive applicability in Brazil and around the world. Despite being a product made from a combustible material, many studies regarding the use of CLT have emerged, and one of the main aspects is its performance in a fire situation, which can compromise a structure. Through computer simulations, using the Ansys software, thermomechanical analyzes were carried out on CLT panels, floor-to-floor type, joined by countersunk screws, varying the thickness in 3, 5 and 7 layers of lamellas, called panels P1, P2 and P3. To this end, the behavior of the panels in a fire situation was investigated, imposing temperature levels between 200°C, 400°C, 600°C, 800°C, 1000°C and 1200°C, with a maximum exposure time to fire of 60 minutes, with the objective of check the effect of heat transfer on the wood and connections as well as their mechanical behavior. As a result, as the temperature of the wooden panels increased, it was progressively linear in terms of heat transfer within the piece, reaching a maximum time of 60 minutes, with all models exceeding the carbonization point when reaching the level of T400°C at 45min. However, for thermal analysis, the number of layers inhibited heat transfer in the screws, with only panel P1 obtaining a significant value of 162.27°C maximum temperature in relation to panels P2 and P3, with 5 and 7 layers. As for the glued displacements, the wooden panels had small deflections, with panel P1 moving 6.3% more in relation to panel P2, and 8.2% more in relation to panel P3. And the displacement of the screws was also small, largely due to the applied support condition, reaching a maximum of  $\delta = 5.28 \times 10^{-3}$  mm for panel P3. Thus, the investigations carried out indicated that as the thickness of the lamellas in the panels increases, the elements tend to acquire better thermomechanical results.

**Keywords:** wooden structures; *Cross-Laminated Timber*, finite element method, connections; fire situation.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Stadthaus – edifício residencial, Londres, Reino Unido. ....   | 28 |
| Figura 2 – Dalston Lane – Londres, Reino Unido .....  | 29 |
| Figura 3 – Brock Commons Student Residence, Vancouver, Canadá .....   | 29 |
| Figura 4 – Evolução das edificações em estruturas de madeira .....  | 30 |
| Figura 5 – Nova unidade do McDonald’s construída em madeira .....   | 30 |
| Figura 6 – Representação da organização das lamelas no painel CLT .....   | 31 |
| Figura 7 – Etapas de fabricação do CLT .....  | 32 |
| Figura 8 – Mapa de normas vigentes .....  | 35 |
| Figura 9 – Efeito <i>spalling</i> em viga de concreto .....   | 39 |
| Figura 10 – Vigas e pilares de aço retorcidos em virtude da ação de incêndio.....                               | 39 |
| Figura 11 – Seção de estrutura CLT carbonizada .....  | 40 |
| Figura 12 – Efeito da degradação térmica na madeira .....   | 42 |
| Figura 13 – Seção residual da madeira em situação de incêndio .....   | 43 |
| Figura 14 – Modelo de taxa de carbonização bilinear .....   | 45 |
| Figura 15 – Relação entre a condutividade térmica ( $\lambda$ ) e a temperatura para a madeira e o carvão ..... | 46 |
| Figura 16 – Relação entre o calor específico (C) e a temperatura da madeira e do carvão .....                   | 47 |
| Figura 17 – Relação entre o fator de redução ( $\omega$ ) da densidade com o aumento da temperatura.....        | 47 |
| Figura 18 – Fator de redução da resistência paralela às fibras para coníferas.....                              | 49 |
| Figura 19 – Fator de redução no Módulo de Elasticidade paralela às fibras para coníferas .....                  | 49 |
| Figura 20 – Condutividade térmica ( $\lambda$ ) do aço em função da temperatura.....                            | 50 |
| Figura 21– Calor específico (C) do aço em função da temperatura .....   | 51 |
| Figura 22 – Curva normal para a determinação da resistência da madeira .....                                    | 53 |
| Figura 23 – Possibilidades de conexões parede-parede, parede-teto .....   | 55 |
| Figura 24 – Tipos de ligações no sistema CLT.....   | 55 |
| Figura 25 – Juntas de ligações entre painéis CLT.....   | 56 |
| Figura 26 – Composição dos testes dos modelos 9, 10 e 19 (medidas em mm).....                                   | 59 |
| Figura 27 – Lei linear por partes da mola histerética .....   | 60 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 28 – Esquema dos modelos de corpos de provas testados por Gavric <i>et al</i> (2015): (a) Parede 1 e, (b) Parede 2..... | 61  |
| Figura 29 – Demonstração do elemento analisado .....   | 63  |
| Figura 30 – Esquema de técnicas de modelagens reais .....  | 65  |
| Figura 31 – Tipos de ligações estudadas .....  | 67  |
| Figura 32 – Modelo experimental após o teste ao fogo.....  | 67  |
| Figura 33 – Etapas do processo adotado .....   | 70  |
| Figura 34 – Perguntas e respostas direcionadas da pesquisa .....   | 70  |
| Figura 35 – Curva de incêndio-padrão ISO 834 (1999).....   | 71  |
| Figura 36 – Processo produtivo dos painéis CLT .....   | 72  |
| Figura 37 – Proposta de painéis .....  | 74  |
| Figura 38 – Distribuição dos espaçamentos e distâncias entre elementos .....   | 80  |
| Figura 39 – Confeção do painel CLT com três camadas de lamelas com junção tipo <i>Half-lap</i> .....                           | 84  |
| Figura 40 – Parafuso HBS – parafuso de cabeça de embeber (características).....  | 85  |
| Figura 41 – Característica geométrica.....   | 85  |
| Figura 42 – Montagem do painel CLT de 3 camadas.....   | 86  |
| Figura 43– Montagem do painel CLT de 5 camadas.....  | 87  |
| Figura 44– Montagem do painel CLT de 7 camadas.....  | 88  |
| Figura 45 – Fluxograma da sequência da modelagem em MEF .....  | 89  |
| Figura 46 – Dimensões e distribuição dos pinos nos painéis (mm).....   | 90  |
| Figura 47 – Discretização da malha .....   | 91  |
| Figura 48 – Modelos dos painéis com a face inferior exposta ao fogo: a) 3 camadas; b) 5 camadas; c) 7 camadas.....             | 93  |
| Figura 49 – Plano de corte dos painéis. ....   | 94  |
| Figura 50 – Determinação dos pontos para aferição das temperaturas dos painéis.....  | 95  |
| Figura 51 – Configuração dos parâmetros das propriedades físicas e mecânicas dos materiais .....                               | 96  |
| Figura 52 – Determinação do carregamento e condições de apoio .....  | 97  |
| Figura 53 – Evolução da temperatura na madeira – Painel 1 – 3 camadas.....   | 99  |
| Figura 54 – Evolução da temperatura na madeira – Painel 2 – 5 camadas.....   | 100 |
| Figura 55– Evolução da temperatura na madeira – Painel 3 – 7 camadas.....  | 100 |
| Figura 56– Evolução da temperatura no parafuso – Painel 1 – 3 camadas.....   | 102 |
| Figura 57– Evolução da temperatura no parafuso – Painel 2 – 5 camadas.....   | 103 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 58– Evolução da temperatura no parafuso – Painel 3 – 7 camadas .....                             | 103 |
| Figura 59 – Pontos de aferição – Painel 1 – 3 camadas .....   | 105 |
| Figura 60 – Pontos de aferição – Painel 2 – 5 camadas .....   | 106 |
| Figura 61 – Pontos de aferição – Painel 3 – 7 camadas .....   | 107 |
| Figura 62 – Análise comparativa dos pontos centrais dos painéis .....                                   | 109 |
| Figura 63 – Análise comparativa dos pontos internos de maiores temperaturas ...                         | 110 |
| Figura 64 – Análise comparativa dos pontos externos de maiores temperaturas ...                         | 110 |
| Figura 65 – Deslocamento total – Painel 1 – 3 camadas .....   | 112 |
| Figura 66 – Deslocamento total – Painel 2 – 5 camadas .....   | 113 |
| Figura 67 – Deslocamento total – Painel 3 – 7 camadas .....   | 113 |
| Figura 68 – Deslocamento total dos painéis em T200°C.....   | 115 |
| Figura 69– Deslocamento total dos painéis em T800°C.....  | 116 |
| Figura 70 – Deslocamento total dos painéis em T1200°C.....  | 117 |
| Figura 71 – Deslocamentos horizontais – P1 – 3 camadas.....   | 119 |
| Figura 72 – Deslocamentos horizontais – P2 – 5 camadas.....   | 120 |
| Figura 73 – Deslocamentos horizontais – P3 – 7 camadas.....   | 121 |
| Figura 74 – Comparação dos deslocamentos horizontais dos parafusos mais próximos<br>ao apoio (mm).....  | 122 |
| Figura 75– Comparação dos deslocamentos horizontais dos parafusos centrais (mm)<br>.....                | 123 |
| Figura 76 – Deslocamento vertical – P1 – 3 camadas .....  | 124 |
| Figura 77 – Deslocamento vertical – P2 – 5 camadas .....  | 126 |
| Figura 78 – Deslocamento vertical – P3 – 7 camadas .....  | 127 |
| Figura 79– Comparação dos deslocamentos verticais dos parafusos centrais (mm)<br>.....                  | 128 |
| Figura 80 – Comparação dos deslocamentos verticais dos parafusos mais próximos<br>aos apoios (mm) ..... | 128 |

## LISTA DE QUADROS

|  |    |
|--|----|
| Quadro 1 – Trabalhos relevantes de CLT.....                          | 24 |
| Quadro 2 – Trabalhos utilizando o emprego de métodos numéricos ..... | 68 |

## LISTA DE TABELAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 1 – Determinação de $k_0$ para superfícies sem proteção, com t em minutos..             | 43  |
| Tabela 2 – Taxas de carbonização para superfícies sem revestimento $\beta_0$ e $\beta_n$ ..... | 44  |
| Tabela 3 – Relação das propriedades dos materiais com a temperatura .....                      | 48  |
| Tabela 4 – Fatores de redução das propriedades mecânicas.....                                  | 48  |
| Tabela 5 – Valores das propriedades termomecânicas.....  | 51  |
| Tabela 6 – Valores de $k_{fi}$ .....   | 53  |
| Tabela 7 – Configurações e dimensões de corpos de prova da literatura.....                     | 56  |
| Tabela 8 – Tipos de configurações testadas no programa para as ligações CLT.....               | 58  |
| Tabela 9 – Configuração experimental de sistemas de paredes CLT .....                          | 61  |
| Tabela 10 – Métodos esquemáticos para avaliar o comportamento das conexões ..                  | 62  |
| Tabela 11 – Dimensões máximas e larguras de faturamento .....                                  | 73  |
| Tabela 12 – Detalhes técnicos.....   | 73  |
| Tabela 13 – Propriedades da madeira.....   | 74  |
| Tabela 14 – Dimensões dos painéis.....   | 75  |
| Tabela 15 – Dados dos painéis para o cálculo .....   | 76  |
| Tabela 16 – Valores do carregamento e coeficientes de ponderação.....                          | 77  |
| Tabela 17 – Espaçamentos e distâncias mínimas para ligações com pinos metálicos .....          | 80  |
| Tabela 18 – Características mecânicas do parafuso.....   | 85  |
| Tabela 19 - Aferição das temperaturas nos pontos nodais – Painel 1 .....                       | 105 |
| Tabela 20 – Aferição das temperaturas nos pontos nodais – Painel 2.....                        | 106 |
| Tabela 21 – Aferição das temperaturas nos pontos nodais – Painel 3.....                        | 107 |

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

|             |   |
|-------------|---|
| ABNT        | Associação Brasileira de Normas Técnicas                                |
| ASNI        | <i>Approved American National Standard</i>                              |
| ETA         | <i>European Technical Assessment</i>                                    |
| CLT         | <i>Cross Laminated Timber</i>   |
| CNR-Ivalsa  | <i>Italian National Research Council – Institute of Tree and Timber</i> |
| CSA         | <i>Canadian Standards Association</i>                                   |
| CSU         | <i>Colorado State University</i>  |
| EN          | <i>European Norms</i>   |
| IBC         | <i>International Building Code</i>                                      |
| ISO         | <i>International Organization Standardizations</i>                      |
| IT          | Instrução Normativa   |
| LVL         | <i>Laminated Veneer Lumber</i>  |
| MEF         | Método dos Elementos Finitos  |
| MLC         | Madeira Lamelada Colada   |
| MLCC        | Madeira Laminada Colada Cruzada   |
| NBC         | <i>National Building Code of Canada</i>                                 |
| NBR         | Norma Brasileira  |
| NSD         | <i>National Desing Specification</i>                                    |
| OSU         | <i>Oregon State University</i>  |
| PVC         | Problemas de valor de contorno  |
| $E_{0,m}$   | Modulo de elasticidade médio paralelo às fibras da madeira              |
| $E_{0,05}$  | Módulo de elasticidade característico inferior (quinto percentil)       |
| $E_{90,m}$  | Módulo de elasticidade médio perpendicular às fibras da madeira         |
| $E_{ef}$    | Módulo de elasticidade efetivo  |
| $E_{ef,fi}$ | Módulo de elasticidade efetivo em situação de incêndio                  |
| $E_{0,2}$   | Módulo de elasticidade para 20º percentil                               |
| $G_m$       | Módulo de elasticidade transversal médio                                |
| $R_{fi,d}$  | Esforço resistente de cálculo em situação de incêndio                   |
| $R_{0,2}$   | 20º percentil do esforço resistente em temperatura normal               |
| $S_d$       | Solicitação de cálculo em temperatura normal                            |
| $S_{fi,d}$  | Solicitação de cálculo em situação de incêndio                          |



|              |   |
|--------------|---|
| $e_{char,0}$ | Espessura de carbonização unidimensional  |
| $e_{char,n}$ | Espessura de carbonização equivalente incluindo o efeito de arredondamento dos cantos |
| $e_{ef}$     | Espessura efetiva de carbonização   |
| $f$          | Resistência   |
| $f_{d,fi}$   | Resistência de cálculo da madeira em situação de incêndio                             |
| $f_e$        | Resistência ao embutimento  |
| $f_v$        | Resistência ao cisalhamento   |
| $g,k$        | Carga permanente característica   |
| $q,k$        | Carga variável característica   |
| $k_{mod}$    | Coefficiente de modificação   |
| $k_{mod,fi}$ | Coefficiente de modificação em situação de incêndio                                   |
| $n_{ef}$     | Quantidade, para cálculo, de pinos metálicos em uma mesma linha                       |
| $s$          | Espaçamento   |
| $t$          | Tempo   |

**LISTA DE SÍMBOLOS**

|                 |   |
|-----------------|---|
| $\beta_0$       | Taxa de carbonização unidimensional   |
| $\beta_n$       | Taxa de carbonização equivalente para madeiras secas, incluindo o efeito de arredondamento de cantos e fissuras |
| $\gamma$        | Peso específico   |
| $\gamma_f$      | Coefficiente de ponderação das ações  |
| $\gamma_w$      | Coefficiente de minoração da resistência da madeira   |
| $\gamma_{w,fi}$ | Coefficiente de minoração da resistência da madeira em situação de incêndio                                     |
| $\theta_0$      | Temperatura normal do ambiente antes do início do aquecimento   |
| $\theta_g$      | Temperatura dos gases no instante t   |
| $\lambda$       | Condutividade térmica   |
| $\rho_k$        | Densidade característica  |
| $\rho_m$        | Densidade média   |
| $\sigma$        | Tensão normal   |

## SUMÁRIO

|   |            |
|---|------------|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....   | <b>20</b>  |
| <b>1.1 Contextualização</b> .....   | <b>20</b>  |
| <b>1.2 Objetivos</b> .....  | <b>22</b>  |
| 1.2.1 Objetivo geral.....   | 22         |
| 1.2.2 Objetivos específicos .....   | 23         |
| <b>1.3 Justificativa</b> .....  | <b>23</b>  |
| <b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....  | <b>26</b>  |
| <b>2.1 Informações Gerais</b> .....   | <b>26</b>  |
| 2.1.1 Aplicações do CLT.....  | 27         |
| 2.1.2 Processo de montagem .....  | 31         |
| 2.1.3 Normas técnicas para dimensionamento e validação .....                | 33         |
| 2.1.4 Propriedades do CLT para a qualificação do desempenho estrutural..... | 36         |
| <b>2.2 Madeira Laminada Cruzada em situação de incêndio</b> .....           | <b>37</b>  |
| 2.4.1 Princípios básicos para CLT em situação de incêndio .....             | 37         |
| 2.4.2 Taxa de carbonização.....   | 41         |
| 2.4.3 Perda de resistência e elasticidade em função da temperatura .....    | 45         |
| 2.4.4 Ações e segurança dos painéis CLT .....                               | 51         |
| <b>2.3 Conexões nos painéis CLT</b> .....                                   | <b>54</b>  |
| <b>2.4 Estudos baseados em simulações numéricas</b> .....                   | <b>64</b>  |
| <b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....  | <b>70</b>  |
| <b>3.1 Descrição dos painéis CLT</b> .....                                  | <b>72</b>  |
| <b>3.2 Dimensionamento dos painéis à flexão</b> .....                       | <b>75</b>  |
| 3.2.1 Temperatura ambiente.....   | 77         |
| 3.2.2 Elevadas temperaturas .....   | 83         |
| <b>3.3 Estruturação da modelagem computacional.</b> .....                   | <b>83</b>  |
| 3.3.1 Descrição da montagem das peças no <i>SolidWorks</i> .....            | 83         |
| 3.3.2 Descrição da modelagem no <i>Ansys</i> .....                          | 89         |
| 3.3.3 Desenvolvimento da análise térmica .....                              | 92         |
| 3.3.4 Desenvolvimento da análise mecânica.....                              | 95         |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....                                       | <b>98</b>  |
| <b>4.1 Evolução da temperatura nos painéis CLT</b> .....                    | <b>99</b>  |
| <b>4.2 Aferição de temperatura em pontos nodais</b> .....                   | <b>104</b> |

|   |            |
|---|------------|
| <b>4.3 Síntese e análise comparativa dos pontos de aferição .....</b>                       | <b>109</b> |
| <b>4.4 Deslocamentos nos painéis de madeira devido à elevação da temperatura.<br/>.....</b> | <b>112</b> |
| <b>4.5 Resistência mecânica dos parafusos .....</b>   | <b>118</b> |
| 4.5.1 Deslocamentos horizontais nos parafusos .....   | 118        |
| 4.5.2 Deslocamentos verticais nos parafusos .....   | 124        |
| <b>5 CONCLUSÃO E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>                                  | <b>130</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>  | <b>133</b> |
| <b>ANEXO 1 .....</b>  | <b>146</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

Em países desenvolvidos, o setor da construção civil tem tido uma evolução expressiva nos sentidos industrial e sustentável de materiais construtivos estruturais (Pereira, 2019). Nesse cenário, a madeira tem se destacado em relação a outros materiais como concreto, aço e alvenaria. Quando utilizados em estruturas projetadas de maneira adequada, com prevenções e manutenções periódicas, os sistemas em madeira se apresentam como uma solução viável, com qualidade, e competem diretamente com os materiais convencionais. (Molina, Calil, 2010; Christoforo *et al*, 2012; Stolf *et al*, 2014; Carvalho, 2017).

É de conhecimento que a madeira tem sido utilizada como material na construção civil desde os primórdios, em virtude de sua resistência e rigidez, e tal uso é benéfico a uma estratégia climática, podendo contribuir com a sustentabilidade do ambiente construído. (Martins, 2016). Países como a Áustria, Alemanha e Noruega, conservaram o legado desse tipo de construção, apesar da chegada de novos materiais, como o concreto armado e as estruturas metálicas. (Vairo, 2022). Além do uso estrutural na construção civil, a madeira ainda é amplamente empregada na fabricação de pisos, forros, divisórias, portas, caixilhos, lambris, entre outros.

Na busca por soluções que possam atender às prerrogativas de demandas por materiais sustentáveis, empresas e instituições de pesquisa têm explorado novos recursos construtivos que atendam aos requisitos pré-estabelecidos por entidades governamentais e sociedade civil (Pereira, 2019). E, no esforço para encontrar tais soluções, a madeira mostrou-se uma alternativa competitiva, cuja relevância tem se destacado no âmbito da construção de residências e edifícios de múltiplos pavimentos. (Pereira, 2019). Os sistemas à base de madeira que estão sendo estudados e têm entrado no mercado nacional e internacional recentemente são a Madeira Lamelada Colada (MLC) e a Madeira Laminada Cruzada (CLT), ou *Cross Laminated Timber*, que já são empregadas em muitos países da Europa, Estados Unidos e Canadá.

Para a obtenção dos painéis de CLT é necessária a junção de algumas camadas de madeira coladas com adesivos. O peso específico é relativamente baixo se comparado às construções tradicionais, o que gera uma vantagem, pois tais

estruturas tem seu tempo de execução diminuído e uma montagem mais fácil. (Yang *et al*, 2021).

Todavia, um dos fatores que influenciam a não empregabilidade da madeira como material estrutural é o fato de ainda existir um desconhecimento do seu potencial, bem como uma pré-disposição cultural em preferir outros materiais, como, por exemplo, o concreto. Entretanto, Martins (2016) afirma que muitos centros de pesquisa internacionais estão realizando importantes estudos nos últimos anos com o intuito de caracterizar, regulamentar e fomentar o uso da madeira. Martins (2016) ainda destaca que no Brasil o emprego da madeira é um pouco restrito, apesar de todos os fatores vantajosos e da sua disponibilidade no país.

Segundo Brandner *et al* (2016), nos últimos dez anos vem ocorrendo uma recuperação do uso da madeira no mercado dos materiais de construção, principalmente em edificações residenciais e comerciais, bem como em outros âmbitos da construção civil. Todavia, essa retomada da madeira, que é um material natural e sustentável, deve-se muito ao avanço no conhecimento de suas propriedades, principalmente em virtude de sua combustibilidade, fator que durante séculos foi temido. (Brandner *et al*, 2016).

A combustibilidade, entre as características de reação ao fogo, tem sido um dos fatores mais desvantajosos na aplicação em estruturas de madeira, pois existem implicações nas legislações e normatizações que precisam ser levadas em consideração. Um ponto importante é saber que, quando a madeira está submetida a uma situação de incêndio, ela irá entrar em combustão até atingir uma camada de carbonização, que tem a função de proteger o restante da seção, diminuindo a velocidade de propagação para o interior da seção transversal.

Quando elementos de madeira são submetidos a uma situação de incêndio, sua degradação térmica depende, além da forma e da seção transversal, que sofrerá diminuição, de fatores como a densidade, a permeabilidade, a composição química, o teor de umidade, a temperatura de carbonização, entre outros que afetam diretamente o desempenho do sistema estrutural. (Moraes *et al*, 2009).

Definido como um painel composto por camadas coladas cruzadas perpendicularmente à camada subsequente, a CLT tem como característica o cruzamento de suas camadas, o que confere ao painel uma rigidez semelhante às placas de concreto armado (Pereira, 2014). Segundo Brandner (2013), as conexões entre camadas são realizadas por colagem, conferindo uma ligação contínua e

semirrígida, podendo receber esforços no plano do painel, bem como perpendicularmente ao painel.

Entretanto, deve-se considerar que as conexões das estruturas de painéis CLT são normalmente feitas por meio de conectores metálicos (pregos, pinos ou parafusos). Tais conexões unem um painel ao outro (por exemplo, as lajes de piso aos painéis de parede), tornando o sistema mais flexível e proporcionando resistência, rigidez e ductilidade. (Salgado; Guner, 2021).

Todavia, quando conexões de materiais metálicos são submetidas a elevadas temperaturas, perdem sua capacidade resistente, podendo comprometer o desempenho de todo o sistema estrutural. Dessa forma, é necessário realizar estudos que possam minimizar os efeitos de colapso das estruturas de madeira.

Uma das maneiras de se estimar o comportamento dos materiais é a simulação computacional, que pode, ou não, somar-se a ensaios experimentais. Por exemplo, Mendes (2020), que também teve o CLT como objeto de pesquisa, relata ter obtido resultados concordantes entre a simulação computacional e os métodos experimentais, utilizados concomitantemente na investigação do comportamento das placas à flexão uni e biaxial em regime elástico. O autor, no entanto, avaliou condições de exposição ambientais padrão e não a ocorrência de um sinistro.

Com a tendência de crescimento do uso das estruturas de madeira massiva, surgem em meio à sociedade indagações quanto à sua segurança em situação de incêndio. (Vairo, 2022). Diante disso, o presente estudo destina-se à análise de painéis CLT tipo piso-piso, ligados através de conectores metálicos, variando a espessura (número de camadas), a temperatura e o tempo de exposição, e avaliando a temperatura alcançada e os deslocamentos mensurados.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Este trabalho tem por objetivo realizar uma análise por simulação computacional das ligações do sistema construtivo de painéis horizontais de madeira laminada cruzada (CLT) quando submetidas a elevadas temperaturas.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Para o desenvolvimento do trabalho, os objetivos específicos são:

- a) Avaliar os efeitos do aumento da temperatura nos painéis CLT, simulados em pequena escala, variando suas espessuras no tempo máximo de 60 minutos;
- b) Verificar o efeito das transferências de calor nas resistências das ligações parafusadas e sua influência nos painéis CLT;
- c) Determinar a deformação dos painéis quando solicitado por ações mecânicas associadas a ações de incêndio.

### 1.3 Justificativa

Em virtude dos processos de industrialização, têm surgido vários produtos de madeira com alta resistência mecânica, capazes de atender às exigências do mercado da construção civil. Isso permite o uso da madeira construtivamente, o que antes não era possível em razão de limitações como suporte de carregamento, proteção contra incêndio, estabilidade e limitação de suas dimensões. (Giorgio *et al*, 2020).

Entretanto, mesmo com todos os estudos desenvolvidos nas últimas décadas, em relação ao comportamento da madeira, ainda se tem muito receio quanto ao seu emprego. Um dos fatores que levam a isso é a sua combustibilidade e o seu desempenho quando submetido a situações de incêndio. Ainda existe uma cultura de que a madeira é um material frágil e que perde muito de suas propriedades resistentes quando sujeitas a elevadas temperaturas.

Por isso, é importante elucidar que elementos de madeira industrializada possuem potencial desempenho em relação ao fogo, tornando-os capazes de resistir a elevadas temperaturas (Giorgio *et al*, 2020). No Quadro 1 pode-se observar que estudos estão sendo desenvolvidos para promover a capacidade resistente da madeira ao fogo.



Quadro 1 – Trabalhos relevantes de CLT

| <b>Autores</b>          | <b>Ano</b> | <b>Título</b>  | <b>Enfoque</b>   |
|-------------------------|------------|--|--|
| Fragiacomo <i>et al</i> | 2013       | <i>Fire resistance of Cross-Laminated Timber Panels loaded out of plane</i>                                      | Investiga o comportamento térmico de espécimes protegidas e desprotegidas, considerando cargas diferentes sob condição de incêndio   |
| Schimid <i>et al</i>    | 2018       | <i>Simulation of the fire resistance of Cross-Laminated Timber (CLT)</i>   | Desenvolve uma técnica de simulação baseada em uma formulação simplificada para ser usada por engenheiros e técnicos no CLT, com o intuito de verificar a resistência ao fogo  |
| Óstman <i>et al</i>     | 2017       | <i>Fire safety engineering in Timber Buildings</i>   | Avalia o uso da madeira nas construções civis, implementando os princípios da Engenharia de Segurança contra Incêndio em projetos baseados no desempenho.  |
| Mahr <i>et al</i>       | 2020       | <i>Elevated Temperature Effects of performance of a Cross-Laminated Timber Floor-to-wall Bracket Connections</i> | Avalia o desempenho do efeito da força de cisalhamento que é transferida do piso-parede quando submetida a elevadas temperaturas, usando duas metodologias, as quais indicavam a degradação geral do desempenho das conexões em relação a sua capacidade de carregamento, rigidez, elasticidade, entre outros. |
| Salgado <i>et al</i>    | 2021       | <i>Characterization of the out-of-plane behavior of CLT panel connections</i>                                    | Avalia as conexões para situações de sinistros naturais e verifica as condições de desempenho das cargas fora do plano.  |

Fonte: A autora, 2021

Diante dos enfoques dados pelos autores citados no quadro 1, nota-se a importância do tema abordado, qual seja, a segurança das estruturas de madeira diante de situações de incêndio.

Muitos estudos têm sido desenvolvidos com o intuito de adquirir conhecimentos acerca do comportamento das estruturas CLT.

Carrasco *et al* (2016) afirmam que, mesmo possuindo uma melhor capacidade resistente ao fogo em relação aos outros materiais, levando em consideração sua boa condutividade térmica e da camada carbonizada que advém no decorrer do processo de queima, a madeira ainda pode sofrer deterioração à medida que a temperatura vai aumentando, devido ao processo de pirólise que notadamente acontece a partir de 200°C.

Felix *et al* (2022) defende que desde a concepção do projeto arquitetônico deve-se implementar a ideia de segurança contra incêndio, ou seja, que o projetista tenha o conhecimento necessário e seja capaz de atender aos requisitos de desempenho ao fogo, para que sejam atestadas a qualidade e a segurança da edificação, evitando o início do incêndio e sua provável progressão.

Ao se falar de ligações entre peças de madeira no sistema CLT é importante compreender que são realizadas por meio de encaixes perfeitos, através de conectores metálicos como pinos e parafusos. As conexões são conhecidas por ditar o desempenho das estruturas CLT, trazendo-lhes uma maior flexibilidade, o que proporciona a resistência, a rigidez e a ductilidade necessárias (Salgado *et al*, 2021).

Pinto *et al* (2016) e Silva (2022) observaram que, apesar dos avanços nas pesquisas acerca da madeira, a quantidade de textos divulgados ainda é baixa, principalmente em relação a estudos numéricos e experimentais a respeito de análise em situação de incêndio.

Silva (2022), no entanto, enfatiza que a atual norma brasileira NBR 7190 (ABNT, 2022), mesmo depois de sua revisão, traz um método simplificado de cálculo, fundamentado na norma europeia EN 1995-1-2 (2004) (Eurocode 5), voltado à redução da seção transversal em consequência da carbonização do material causada pela ação do fogo.

Considerando que as ligações dão estabilidade à estrutura e, quando submetidas a elevadas temperaturas, podem perder seu desempenho mecânico; considerando a tendência global de adesão às estruturas de madeira massiva em edificações de múltiplos pavimentos; considerando ainda que são poucos os estudos voltados ao CLT em situação de incêndio, mais especificamente de suas ligações, este estudo tem como objetivo avaliar até que ponto essa perda do desempenho pode prejudicar o desempenho global da estrutura, causando ao usuário um transtorno irreparável. (Vairo, 2022).

Avaliam-se por métodos numéricos os efeitos termomecânicos e do desempenho das ligações entre painéis quando submetidos a altas temperaturas.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Informações Gerais

Durante as últimas décadas, as estruturas de madeira vêm passando por um crescente reaparecimento. Muito disso é devido ao seu reduzido impacto ambiental, em razão do menor consumo de energia e da menor quantidade de poluição na atmosfera, principalmente quando se trata do setor da construção, que representa uma parcela considerável na economia geral. (Östman *et al*, 2017).

Felix (2020) afirma que, durante o século XV, nas construções, os troncos de árvores de espécies do norte da Europa aos poucos foram sendo substituídos por tábuas ou até mesmo troncos de seção retangular, pois conferiam maior estabilidade às edificações. Isso só foi possível por causa das inovações nas técnicas de secagem da madeira.

Em virtude do desenvolvimento tecnológico, surgiram no mercado da construção novos produtos, procedimentos, metodologias ou sistemas construtivos que, ao serem inseridos, integraram novas ideias e representaram um sensível avanço na tecnologia existente, principalmente no que tange ao desempenho, qualidade ou custo da edificação. (Sabattini, 1989; Oliveira, 2018). Entre esses novos sistemas construtivos está o *Cross Laminated Timber* (CLT) ou Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC), que se originou do produto de madeira engenheirada, o qual vem elevando o nível das construções em madeira (Crosslam, 2021). Seu surgimento ocorreu na Europa e mais tarde ganhou popularidade nos Estados Unidos e Canadá, atingindo também outras localidades, como o Brasil, provando ser um material eficiente em muitas aplicações de edifícios. (Crosslam, 2021).

Historicamente, estudos apontam que o CLT ganhou sua primeira patente na França, em 1985, e a partir dos anos 1990 foi amplamente difundido na Áustria e na Alemanha. (Sanborn *et al*, 2019; Dong *et al*, 2019; Almeida *et al*, 2021). Nas últimas décadas houve um interesse global por esse sistema, principalmente em virtude de a madeira ser considerada um recurso renovável. Tendo como foco a América do Norte, houve particular interesse nas áreas de florestas densas do Canadá e na região noroeste do Pacífico dos Estados Unidos. (Sanborn *et al*, 2019).

É verdade que, ainda em 1908, Schuchow e Kalep já haviam estudado a utilização de placas em madeira laminada cruzada, e que, no decorrer das décadas

seguintes, outros profissionais também começaram a desenvolver estruturas aplicando esse sistema. Todavia, as primeiras edificações de CLT refletindo o atual estado da arte foram realizadas por Moser, em 1995. (Brandner *et al*, 2016; Crosslam, 2021).

Foi na Áustria que as pesquisas se intensificaram, principalmente com a parceria entre a *Graz University of Technology*, que mantinha três programas de pesquisa na própria instituição e muitos projetos de pesquisa a nível internacional, e a empresa KLH, fundada por Heimo de Monte e Wolfgang Weire em 1998. (Costa, 2013; Brandner *et al*, 2016; Almeida, 2021).

Segundo Almeida *et al* (2023); Cherry *et al* (2019) e Mohammad *et al* (2012), o CLT possui vantagens construtivas, como desempenho estrutural competitivo, estabilidade dimensional, rapidez na construção e redução de resíduos na obra, além de ser um bom isolante térmico e acústico. Outra vantagem do CLT é que ele permite, dentro da sua função de pré-fabricação, executar furos e aberturas nas lajes e paredes ainda na fábrica, para a passagem das instalações prediais. (Vairo, 2022).

### 2.1.1 Aplicações do CLT

Segundo Brandner *et al* (2016), além de apresentar muitas vantagens e ser um produto natural e sustentável, o sistema CLT possui um grande potencial de aplicação para a execução de edifícios altos. Ele tem ganhado notoriedade nos últimos anos por ser uma alternativa a outros materiais de construção convencionais, como concreto armado e alvenaria.

Sabe-se que no âmbito internacional o emprego do CLT já está bem estabelecido, principalmente na Europa, com destaque para a Áustria, onde se concentrou 63% da produção no período de 1996 a 2008, de acordo com Passarelli (2013). O crescimento global da produção anual estimava atingir 600.000 m<sup>3</sup> em 2014. Contudo, em razão da demanda crescente em países como Finlândia, Letônia, Japão e Estados Unidos, esse valor tenderia a atingir um milhão de m<sup>3</sup> até 2016. (Espinoza *et al*; 2016).

O crescimento da produção não parou mesmo com a pandemia, segundo Jauk (2020), que descreve que houve o acréscimo de duas novas empresas no mercado, estabelecendo-se na região DACH (Alemanha, Áustria e Suíça), na Itália e na

República Tcheca. Assim, a produção ultrapassou 1 milhão de m<sup>3</sup>, podendo dobrar até 2022.

Um relatório recente publicado pelo IMARC Group (2022) concluiu que o mercado global de madeira laminada cruzada atingiu, em 2020, o valor de US\$ 1,07 bilhão. Considerando que o produto vem ganhando popularidade como alternativa sustentável ao uso de concreto e aço nos setores comerciais e residenciais em todo o mundo, esse grupo estima um crescimento de 13,2% na demanda para o período de 2021 a 2026, no âmbito da construção.

Já existem algumas edificações relevantes de CLT pelo mundo, entre elas o Stadthaus (Figura 1), com 9 pavimentos, e o Dalston Lane (Figura 2), com 10 pavimentos, na Inglaterra; o Via Cinne, com 9 pavimentos, na Itália; o Esmarchstrasse, com 7 pavimentos, na Alemanha; o Svartlamoen, com 6 pavimentos, na Noruega; Muhlweg Project, com 3 pavimentos, na Áustria; o Steinhausen, com 6 pavimentos, na Suíça; e o Brock Commons Student Residence (Figura 3), com 15 pavimentos, em Vancouver, no Canadá (Almeida *et al*, 2021).

Figura 1 – Stadthaus – edifício residencial, Londres, Reino Unido.



Fonte: Arch Daily, 2021

Figura 2 – Dalston Lane – Londres, Reino Unido



Fonte: Arch Daily, 2021

Figura 3 – Brock Commons Student Residence, Vancouver, Canadá



Fonte: The University of British Columbia - UBC, 2021

Conforme citado, o uso da madeira tem evoluído. As construções em madeira são muito versáteis. Seu estilo e durabilidade de suas estruturas variam de acordo com a época, o lugar e a qualidade da madeira utilizada. Assim, pode-se observar que, à medida que os anos vão avançando, as edificações em madeira têm se tornado mais altas, conforme se observa na Figura 4 (Floresta Brasil, 2021).

Figura 4 – Evolução das edificações em estruturas de madeira



Fonte: Floresta Brasil, 2021

Embora esse sistema já tenha chegado ao Brasil, ainda é pouco difundido no país, apesar de muitas pesquisas acadêmicas já estarem sendo realizadas, juntamente com o setor privado. Atualmente existem duas empresas que produzem essa tecnologia. Elas estão estabelecidas na Região Sul, na cidade de Curitiba-PR, e na Região Sudeste, na cidade de Suzano-SP, sendo esta última a responsável pela execução da primeira obra em CLT no Brasil, em Tiradentes-MG. (Almeida *et al*, 2021). Recentemente, foi inaugurado na cidade de São Paulo o edifício do McDonald's executado pela empresa Urbem, com utilização de 140 m<sup>3</sup> de madeira maciça, distribuídas em 99 m<sup>3</sup> de CLT para as lajes e paredes, e 41 m<sup>3</sup> de MLC para as vigas e pilares, conforme Figura 5.

Figura 5 – Nova unidade do McDonald's construída em madeira



Fonte: Marcas pelo mundo, 2023

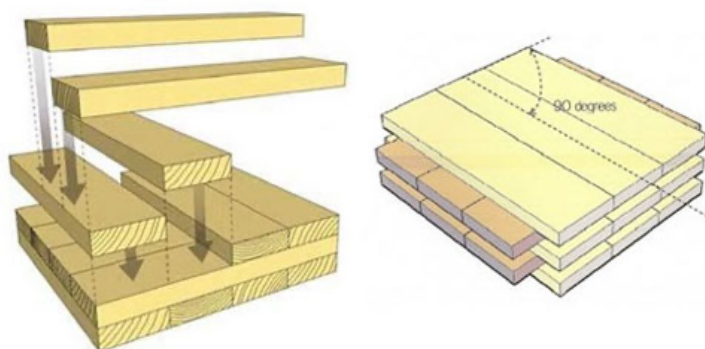
Porém, os obstáculos para uma maior aceitação ao uso dessa tecnologia são a falta de uma normatização mais atualizada, de mão-de-obra qualificada e, principalmente, o fato de que a madeira ainda é muito estigmatizada, de forma preconceituosa, quanto à sua utilização (Almeida *et al*, 2021).

### 2.1.2 Processo de montagem

O CLT é um produto feito de madeira serrada, por meio da laminação de tábuas, que normalmente são dispostas ortogonalmente entre si, coladas com adesivos estruturais e submetidas a uma grande pressão, com o intuito de formar um grande sólido retangular. A laminação geralmente define a quantidade e a espessura da peça, que comumente são em números ímpares com direções cruzadas em função das fibras. Dessa forma, a força é distribuída em ambas as direções, evitando a retração ou deformação dos painéis. (Schimid *et al*, 2018; Felix, 2020; Crosslam, 2021).

De acordo com as normas EN 16351 (2015), ANSI/APA PRG 320 (2019) e a versão revisada da ABNT NBR 7190/2022, o CLT é um painel formado por camadas cruzadas ortogonalmente em função da que a antecede. Possui no mínimo três camadas, podendo ser constituído de lamelas de madeira maciça ou ainda por painéis estruturais de madeira engenheirada (Figura 6).

Figura 6 – Representação da organização das lamelas no painel CLT



Fonte: Remade, 2018

Conforme mencionado, o CLT é formado por lamelas de madeira unidas longitudinalmente, ligando as extremidades, até atingir o comprimento necessário da composição final da peça (ABNT NBR 7190, 2022). Pode chegar a uma composição



de no mínimo três e no máximo 9 camadas, não excedendo uma espessura de 508 mm, conforme FPIInnovations (2019).

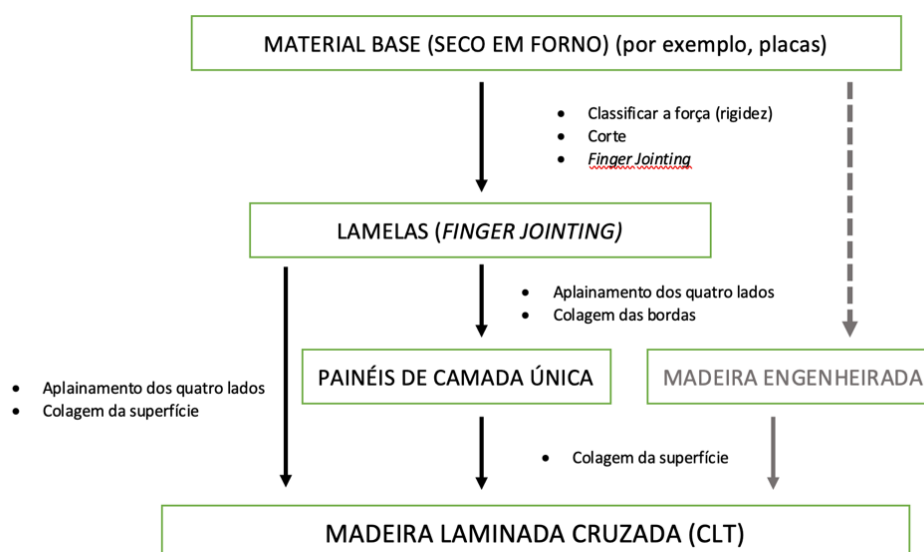
Todavia, em virtude de não se ter uma padronização, os painéis são confeccionados com dimensões distintas entre os fabricantes. A espessura pode variar até 500 mm, dependendo do número de camadas. As larguras podem ser de 600 mm, 1200 mm, 2400 mm e 3000 mm e os comprimentos podem chegar a 18 m ou mais, dependendo do projeto. (Dong *et al*, 2019).

Para se realizar a montagem e fabricação dos painéis CLT, o FPIInnovations (2019) expõe a sequência de nove passos que devem ser considerados:

1. Seleção da madeira;
2. Agrupamento da madeira;
3. Plainamento;
4. Corte ou camadas no comprimento desejado;
5. Aplicação do adesivo
6. Configuração do painel;
7. Prensagem;
8. Controle de qualidade, lixamento e corte de superfície;
9. Marcação, embalagem e envio do produto.

O processo de produção do CLT muitas vezes pode ser comparado ao do MLC (madeira lamelada colada). A Figura 7 mostra o processo de produção.

Figura 7 – Etapas de fabricação do CLT



Fonte: adaptado de Brandner, p. 4, 2013

Em suma, o processo de produção dos painéis CLT pode ser dividido em etapas. Ele pode ser produzido diretamente da estratificação cruzada de placas únicas ou por painéis de produtos de madeira engenheirada. O CLT é feito para uma utilização específica, ou seja, com forma, disposição, tamanho, seções usinadas e aparência específicos. (Brandner, 2013; Brander *et al*, 2016; FPInnovations, 2019).

Para se realizar o processo de fabricação dos painéis CLT, deve se observar a origem da madeira. Além disso, devido à baixa resistência da madeira às ações de agentes químicos, físicos, biológicos, intempéries e, principalmente, à ação do homem, é necessário fazer uso de produtos que possam retardar sua deterioração. (Martins, 2016).

A versão revisada da NBR 7190-7 (ABNT, 2022) afirma que as tábuas usadas para a fabricação dos painéis CLT devem passar por um processo de tratamento preservante, definido de acordo com a categoria de uso ou condições de exposição da madeira, que garanta a durabilidade e proteção sem, contudo, oferecer prejuízo à aderência do adesivo. Tal procedimento preservativo também pode ser realizado após a fabricação das peças, mas deve seguir a metodologia constante na seção 12 da mesma norma, bem como as disposições da NBR 16143 (ABNT, 2013), para que não haja alterações da cola nas juntas.

### 2.1.3 Normas técnicas para dimensionamento e validação

Levando-se em consideração o provável aumento do volume de produtos de CLT que serão executados nas próximas décadas, a literatura aponta que são necessárias normativas que balizem a utilização dessa tecnologia. (Brandner *et al*, 2016; Oliveira, 2018).

Os países da América do Norte, Canadá e Estados Unidos, já fazem uso do CLT e, para tanto, elaboraram uma norma que estabelece os padrões de fabricação e caracterização, a ASNI/APA PGR 320 (2019). (Oliveira, 2018).

A Europa foi pioneira na formulação de normativas que descrevessem as características de desempenho e estabelecessem os requisitos mínimos de fabricação dos painéis. A primeira norma regulamentadora, EN 15351, foi publicada em outubro de 2015. (Oliveira, 2018).

Considerando a série de normas da ISO, pode-se citar a ISO 16696-1:2019 - *Timber structures — Cross laminated timber — Part 1: Component performance, production requirements and certification scheme*.

De acordo com a ISO, a citada norma abrange: tolerâncias de dimensões do sistema CLT; requisitos de componentes; critérios de desempenho; orientação de produção, teste e marca comercial; e requisitos mínimos para o controle de produção da fábrica. Logo, percebe-se que se trata de uma norma prescritiva em termos de componente, e que aponta para a análise de desempenho, visando garantir sua segurança em uso.

Essas normativas citadas anteriormente se referem ao controle de qualidade e metodologia de ensaios dos painéis CLT. Não obstante, no campo dos cálculos e estruturas de madeira também já existem normas de projeto. Os países da América do Norte possuem documentação que insere o CLT nessas normas. Entre elas estão: *Canadian Standards Association (CSA 086, 2019)* e o *National Desing Specification (NSD) for wood construction*, sendo este com última publicação em 2018. (Vairo, 2022).

No Brasil, a tecnologia de painéis CLT é recente. A NBR 7190 (ABNT, 2022) acrescentou, em seu texto revisado, a metodologia de cálculos e ensaios, em suas partes 1 e 7, respectivamente, bem como inseriu os critérios de cálculos para estruturas em situação de incêndio, trazendo uma norma que viabiliza o uso do sistema.

Além das normas técnicas, existem também os códigos de obras e as legislações de incêndio.

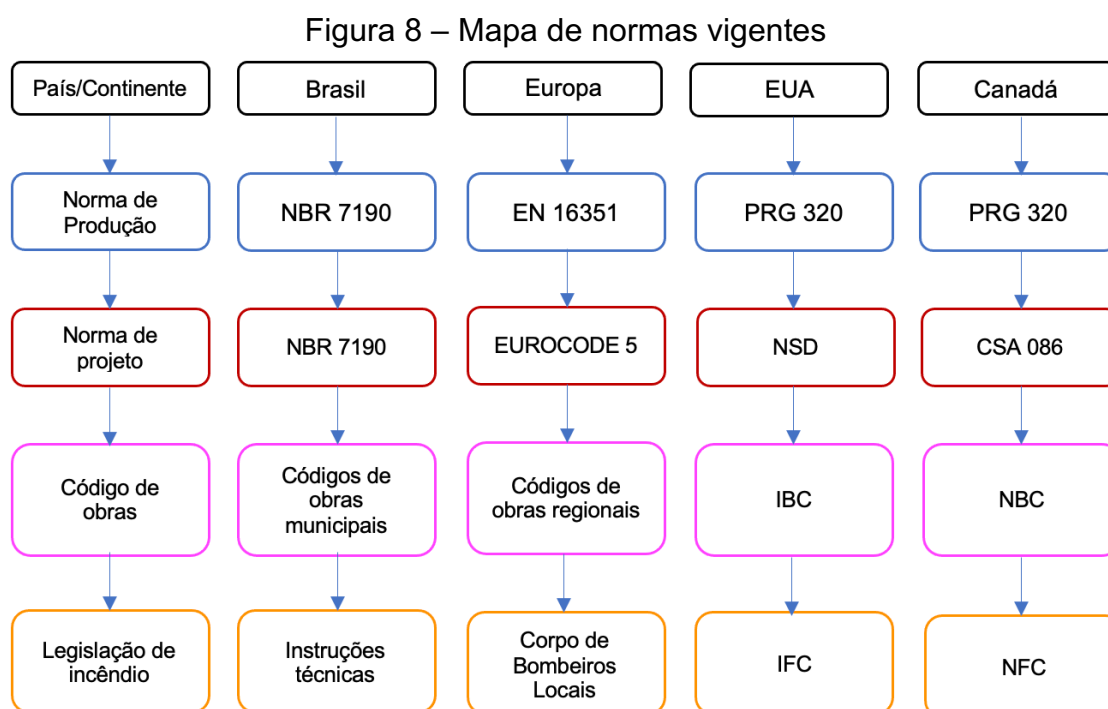
Nos Estados Unidos, o *International Building Code (IBC)* aprovou, em 2019, alterações em seu texto. Em decorrência disso, a partir de 2021 passou a vigorar a criação de tipos de construções que contemplam estruturas de madeira massiva, feitas de madeira serrada ou compostas por madeiras engenheiradas. No Canadá, o *National Building Code of Canada (NBC)* diz que podem ser realizadas edificações de dois tipos: com materiais não combustíveis, referentes a concreto e aço, e com materiais combustíveis, incorporando as construções em madeira massiva. (Vairo, 2022).

Segundo Vairo (2022) e Falk *et al* (2016), nos países europeus os códigos de obras que regulamentam o uso dos materiais para a construção são regionalizados. Entre os países que possuem tal legislação destacam-se Suíça, Alemanha, Suécia e

Itália. No Brasil, os Corpos de Bombeiros estaduais estipulam as regras de segurança para as edificações por meio das Instruções Técnicas (ITs). Há também a NBR 5628 (ABNT, 2022), que viabiliza, por meio de ensaios, a comprovação do desempenho da estrutura em situação de incêndio.

Dentre as normas técnicas brasileiras que discorrem sobre o tema de materiais em situação de incêndio, devem ser destacadas a NBR 16625 (ABNT, 2017), que trata dos Métodos de ensaio e de classificação da reação ao fogo de cortinas – Avaliação das características de ignitabilidade; a NBR 14276 (ABNT, 2020), sobre a Brigada de incêndio e emergência – Requisitos e procedimentos; a NBR 11711 (ABNT, 2023), que prediz acerca das Portas e vedadores resistentes ao fogo com núcleo de madeira para compartimentação em depósitos e indústrias; e a NBR 17144-5 (ABNT, 2023), que preconiza a Proteção contra incêndio de elementos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo – Parte 5: Revestimentos aplicados a elementos de madeira.

A Figura 8 expõe um mapa das principais normas, códigos e legislações regionais existentes e em vigor no Brasil e no exterior.



Fonte: adaptado de Vairo, p. 41, 2022

Como é possível perceber, diferentemente dos outros países, no Brasil não há normas distintas para projeto e para produção.

#### 2.1.4 Propriedades do CLT para a qualificação do desempenho estrutural

Há muitos anos, o comportamento mecânico da madeira tem sido estudado por vários pesquisadores. Sabe-se que a madeira é um material que possui uma excelente função estrutural e numerosas vantagens. Todavia, em virtude de sua heterogeneidade e anisotropia, seu comportamento mecânico ainda é complexo. (Ecker, 2017).

Tal qual ocorre com os demais materiais, como o concreto, o aço e outros usados na construção, a madeira detém características próprias em relação ao seu comportamento mecânico, mas de maneira peculiar. Na madeira essas características não se diversificam apenas entre as várias espécies, mas também entre indivíduos da mesma espécie, e isso depende muito de como é realizado o corte da amostra. (Melo *et al*, 2010; Ecker, 2017).

O CLT é um composto formado por madeira e adesivo químico, ligados de forma ortogonal. Em virtude das características do cruzamento das lamelas, ele adquire uma rigidez que pode se assemelhar às placas de concreto armado. (Pereira, 2014; Camargo *et al*, 2021).

Camargo *et al* (2021) afirmam que, em consequência de suas excelentes propriedades resistentes, que estão relacionadas à sua composição interna maciça, e devido ao cruzamento de suas camadas, é possível que as peças de CLT tenham uma melhor distribuição de carregamento bidirecional e, conseqüentemente, melhor desempenho mecânico. Se comparado a outros tipos de sistemas estruturais, o CLT oferece novas possibilidades de transferência de cargas, em relação à distribuição unidirecional. (Costa, 2013).

Por conta de serem moldados em camadas cruzadas, os painéis CLT são tratados no seu comportamento mecânico muitas vezes como um compósito plano ortotrópico. Assim sendo, é necessário o conhecimento tanto das propriedades físicas quanto das mecânicas nas duas direções. Levando-se em consideração as várias espécies existentes, é importante o conhecimento adequado sobre a madeira empregada para realizar as simulações e análises dos painéis CLT. (Vilela *et al*, 2021).

Cabe destacar que as propriedades físicas e mecânicas das espécies de madeira sofrem influências em virtude de diversos fatores, como local do cultivo, local e posição de extração do corpo de prova no tronco, umidade, inclinação das fibras, idade da árvore, presença de nós, entre outros. (Vilela *et al*, 2021).

As madeiras engenheiradas têm sido utilizadas como produtos por possuírem maior desempenho mecânico e menor variabilidade em relação à sua matéria prima. Dessa forma, tem-se observado um aumento gradativo no mercado da construção civil, principalmente quando associado a edificações de cunho social. (Pereira *et al*, 2017; Vilela *et al*, 2021).

Considerado como único material renovável entre todos os da indústria da construção civil, a madeira possui uma baixa demanda de consumo energético na sua produção, quando comparada aos materiais mais tradicionais, como concreto e aço. (Pereira *et al*, 2017).

Portanto, sendo o CLT uma tecnologia promissora no âmbito da construção, seu emprego permite utilizar a madeira com baixo valor agregado de forma a torná-la de alto valor agregado, contribuindo para um melhor uso dos recursos florestais. (Mallo *et al*, 2015).

De acordo com Crosslam (2021), a durabilidade do CLT depende de projeto e manutenções adequadas, que normalmente proporcionam às estruturas de madeira uma vida útil prolongada, comparável aos outros sistemas construtivos convencionais. Entretanto, é necessário compreender que se deve fazer um bom planejamento, entendendo os tipos de cargas, bem como outros fatores que podem influenciar de forma direta ou indireta na vida útil da estrutura.

## **2.2 Madeira Laminada Cruzada em situação de incêndio**

### **2.4.1 Princípios básicos para CLT em situação de incêndio**

Anteriormente à apresentação do comportamento da madeira laminada cruzada em situação de incêndio, expõem-se conceitos de relevância para o estudo do fenômeno:

- Incêndio: segundo a ISO 8421-1 (1987), trata-se da combustão rápida que se propaga facilmente e sem controle no tempo e no espaço. Para que o incêndio ocorra é necessária uma fonte de calor, um comburente, um combustível e uma reação química em cadeia (Britez, 2011);
- *Flashover*: conforme Thomas *et al* (1980), trata-se do momento a partir do qual há propagação generalizada em um ambiente, indicando o alcance do incêndio;

- Taxa de carbonização: em concordância com Figueroa e Moraes (2009), a taxa com a qual a madeira é convertida em carvão é denominada taxa de carbonização e serve para avaliar a resistência ao fogo de estruturas de madeira, visto que, de modo indireto, ela indica a redução da seção transversal dos elementos estruturais.
- Isolamento térmico: no contexto da segurança contra incêndio e suas normas, trata-se da propriedade de isolar termicamente o efeito das elevadas temperaturas sem causar danos na face não exposta das estruturas;
- Estabilidade estrutural: propriedade de um elemento ou sistema construtivo/estrutural de manter suas propriedades mecânicas mesmo em face da exposição a elevadas temperaturas, normalmente avaliada pelo seu aspecto e pela deformação obtida;
- *Spalling*: abordado nacionalmente como lascamento explosivo, é decorrente de alterações na estrutura do material.

Segundo White e Dietenberger (2010) e Marh *et al* (2020), a madeira passa por cinco estágios de degradação de temperatura, sendo os dois primeiros os mais significativos antes de atingir o “*flashover*”. O primeiro estágio acontece quando ainda não se atingiu os 100°C de temperatura, quando se pode observar uma redução dos elementos de madeira, referentes às propriedades mecânicas, dependendo tanto da espécie quanto do tempo de exposição. (White e Dietenberger, 2010).

Entre as temperaturas de 100°C e 200°C, a madeira inicia o segundo estágio de degradação, quando ela desidrata e começa a constituir vapor d’água, apontando para uma redução contínua das propriedades mecânicas. A exposição a temperaturas elevadas por um longo período pode provocar a carbonização. Acima de 200°C, a madeira inicia um processo de liberação de voláteis combustíveis, o que levaria ao risco de combustão espontânea. (White e Dietenberger, 2010).

Todavia, a madeira é um material muito resistente a elevadas temperaturas. Consequentemente, os produtos provenientes desse material, como o MLC e o CLT, também apresentam um bom desempenho quando submetidos a temperaturas elevadas, pois não tendem a derreter e nem se distorcer, como ocorre com elementos de aço ou no concreto com a ação do efeito “*spalling*”, conforme demonstrado nas Figura 9 e Figura 10 (Martins, 2016).

Figura 9 – Efeito *spalling* em viga de concreto



Fonte: CKC, 2021

Figura 10 – Vigas e pilares de aço retorcidos em virtude da ação de incêndio



Fonte: Portal Incêndio, 2021



Mesmo sendo um material combustível, a madeira, quando exposta à ação de elevadas temperaturas, tende a queimar de maneira lenta e superficial, produzindo em seu entorno externo uma camada carbonizada. Não obstante, a combustibilidade ainda é uma das principais razões pelas quais muitos regulamentos limitam o seu uso como material de construção. (Martins, 2016; Östman, 2021).

De acordo com Martins (2016), a relação entre a carbonização da madeira resultante da exposição a elevadas temperaturas e a consequente redução da seção transversal estão diretamente interligadas, em virtude das mudanças graduais das propriedades térmicas da madeira que ocorrem no interior dos elementos.

A camada externa carbonizada age como um isolante térmico, o que retarda o efeito do incêndio, não permitindo que chegue até a estrutura interna, conforme Figura 11. (Soares *et al*, 2017).

Figura 11 – Seção de estrutura CLT carbonizada



Fonte: Owens, 2015

Segundo Fragiacomio *et al* (2013), os produtos derivados da madeira possuem diferentes comportamentos quando submetidos à ação do fogo, pois dependem das propriedades físicas, das técnicas de fabricação empregadas, dos tipos de adesivos utilizados e das dimensões das seções transversais, incluindo outros fatores que podem ser determinantes.

O CLT possui um bom desempenho ao incêndio em relação às edificações de madeira padrão. Um dos fatores que contribuem para inibir o crescimento do incêndio em um espaço contido é a baixa área de superfície e o ambiente hermético, o qual acaba limitando o combustível disponível no local. (Crosslan, 2021).

Ainda de acordo com Crosslan (2021), mesmo que um painel seja instalado de forma a não possuir revestimento de proteção à ação do fogo, esse sistema oferece

restrição a que o fogo se espalhe com facilidade, pois ocorre o encapsulamento das chamas em uma única área, sufocando-as.

A resistência ao fogo depende de inúmeros fatores, entre eles o número de camadas e suas espessuras, os adesivos empregados e a utilização dada aos componentes, se piso ou parede. (Frangiaco *et al*, 2013). Molina *et al* (2012) afirmam que a resistência ao fogo de um material ou elemento pode ser determinada por sua eficácia em permanecer durante um período definido com as suas funções íntegras, para as quais foi projetado, mesmo quando submetido à ação de incêndio. Molina *et al* (2012) ainda expõem que, no caso da madeira, quando essa é submetida a altas temperaturas, sofre degradação por combustão, que gera uma camada de carvão, protegendo as camadas internas.

A resistência da madeira à ação do fogo depende de vários princípios. Muitos estudos estão sendo realizados para investigar o desempenho dos painéis CLT fabricados por diversos produtores com propriedades e características distintas. O Eurocode 5, em suas Partes 1-2 (EC5 EN, 2004), até o presente momento não aborda informações pertinentes aos procedimentos de projeto de incêndio dos painéis CLT. (Frangiaco *et al*, 2013).

A exposição dos painéis de CLT ao fogo tem como consequência a redução da seção transversal, bem como da resistência e da rigidez próximo à linha de carbonização. No tocante às conexões que ligam um elemento ao outro, que geralmente são de metal e conduzem calor para o interior da madeira, cabe mencionar que também causam perda de rigidez e podem reduzir sua capacidade resistente. (Martins, 2016; Felix; 2020).

#### 2.4.2 Taxa de carbonização

As estruturas de madeira, quando sujeitas a elevadas temperaturas, ativam o efeito de degradação térmica, o qual, por uma combinação de fatores, disponibiliza gases voláteis e calor em virtude da ruptura de suas moléculas orgânicas. Tal processo cria um resíduo na camada mais exposta ao fogo, formando assim o carvão nessa superfície. (Vairo, 2022)

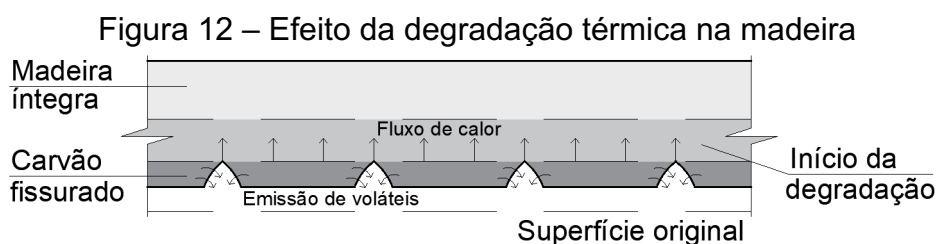
Dessa forma, a resistência ao fogo dos elementos de madeira é na prática levado pela carbonização dos materiais, o que deve gerar o dimensionamento dessa

espessura carbonizada por um determinado tempo de exposição ao fogo. (Martins, 2016).

Por definição, a espessura da camada carbonizada é a distância entre a face da peça original e a posição de sua linha de carbonização. De acordo com a EN 1995-1-2 (2004), admite-se uma isoterma de 300°C como valor de referência para que a madeira inicie sua carbonização (Martins, 2016; Vairo, 2022)

Vairo (2022) afirma que o processo de degradação térmica progride em virtude das fissuras na camada de carvão. À medida que a temperatura atinge a ordem de 500°C, esse processo vai se intensificando. Caso o elemento continue sendo mantido a um calor constante, esse processo vai se repetindo até atingir a perda total do elemento.

Segundo o Eurocode 5 (2004), o consumo total de carvão se dá mediante temperaturas próximas a 1000°C. A Figura 12 demonstra o fenômeno de degradação térmica.



Fonte: Vairo, p. 46, 2022

A NBR 7190-1 (ABNT, 2022) traz em sua seção 11.2.5, com o intuito de simplificar a análise das estruturas de madeira em situação de incêndio, o seguinte:

A avaliação de resistência ao fogo de estruturas de madeira é baseada no conceito da diminuição de seção transversal devido à perda das propriedades mecânicas pela ação térmica. A seção transversal residual (Figura 13) deve ser determinada desprezando-se a espessura efetiva,  $e_{ef}$ , calculada conforme a Equação 1.

$$e_{ef} = e_{carb,n} + k_0 e_0$$

Equação 1

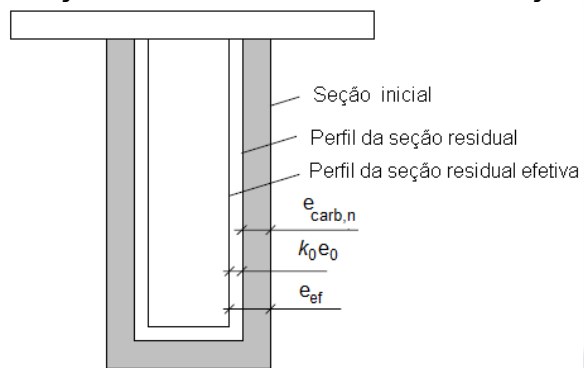
onde:

$e_0$  – é igual a 7mm;

$e_{carb,n}$  – é a espessura carbonizada considerando o efeito do arredondamento;

$k_0$  – é dado na Tabela 1

Figura 13 – Seção residual da madeira em situação de incêndio



Fonte: adaptado da NBR 7190-1, p.74, 2022

Tabela 1 – Determinação de  $k_0$  para superfícies sem proteção, com  $t$  em minutos

| Minutos     | $k_0$    |
|-------------|----------|
| $t < 20$    | $t / 20$ |
| $t \geq 20$ | 1,0      |

Fonte: adaptado da NBR 7190-1, p. 74, 2022

A norma NBR 7190-1 (ABNT, 2022) ainda traz o valor de  $e_{carb,n}$ , que inclui o efeito de arredondamento dos cantos e fissuras, bem como para elementos planos em que esse valor deve ser substituído por  $e_{carb,0}$ , calculados respectivamente como mostrado nas Equação 2 e Equação 3.

$$e_{carb,n} = \beta_n t \quad \text{Equação 2}$$

$$e_{carb,0} = \beta_0 t \quad \text{Equação 3}$$

Onde  $\beta_0$  e  $\beta_n$  podem ser determinados de acordo com a tabela abaixo:

Tabela 2 – Taxas de carbonização para superfícies sem revestimento  $\beta_0$  e  $\beta_n$ 

| Material              | Tipo   | $\beta_0$ | $\beta_n$ |
|-----------------------|--|-----------|-----------|
| Coníferas             | MLC, MLCC ou madeira serrada                     | 0,65      | 0,70      |
| Folhosas <sup>a</sup> | Baixa densidade                                  | 0,65      | 0,70      |
|                       | Média e alta densidade                           | 0,50      | 0,55      |
| LVL                   | $\rho_{\text{aparente}} \geq 480 \text{ kg/m}^3$ | 0,65      | 0,70      |
| Painéis <sup>b</sup>  | Painéis de madeira Compensado e outros           | 0,9*      | -         |
|                       |  | 1,0*      |           |
|                       |  | 0,9*      |           |

a – Aplica-se tanto para madeira serrada como para MLC

b – Valores de  $\beta$  válidos para  $\rho = 450 \text{ kg/m}^3$  e  $h_p \geq 20 \text{ mm}$ . Para outras densidades e espessuras, o valor de  $\beta_0$  deve ser substituído por  $\beta$ , com  $\rho_k$  em  $\text{kg/m}^3$  e  $h_p$  em mm

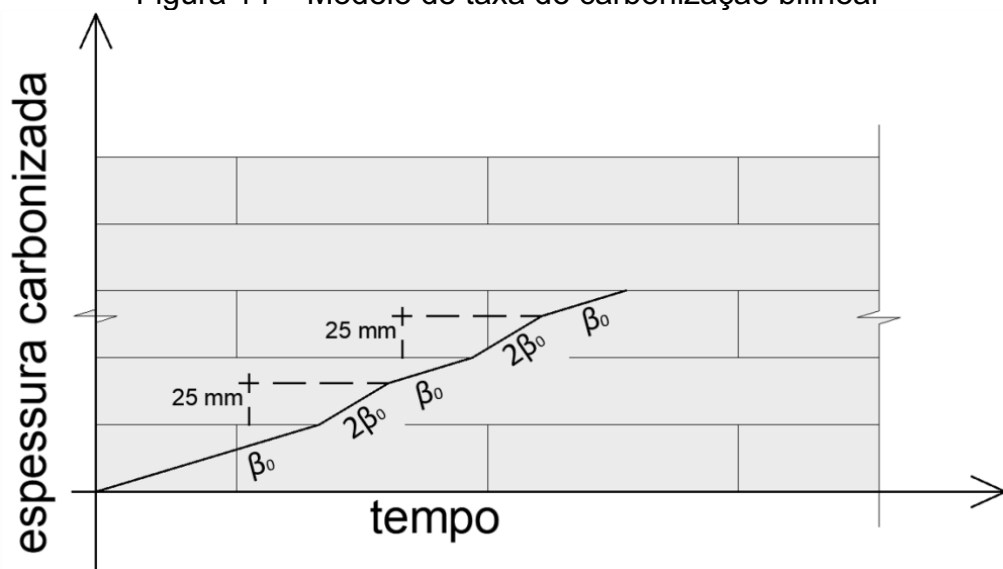
Fonte: adaptado da NBR 7190-1, p.75, 2022

Segundo afirmam Vairo (2022) e Kipple *et al* (2018), as estruturas de painéis CLT costumam evidenciar comportamentos diferentes aos demonstrados por estruturas de madeira serrada, quando submetidas a elevadas temperaturas. Princípios como aspectos e disposições das lamelas na seção transversal, o tipo de adeso e sua forma de colagem, e aberturas que possam existir entre as lamelas adjacentes são fatores que contribuem para o comportamento diferenciado dos painéis.

Entretanto, conforme citado, existe na NBR 7190-1 (ABNT, 2022) uma metodologia de cálculo para seções transversais residuais produzidas com adesivos estruturais resistentes ao fogo. Embora as placas possam ser confeccionadas com adesivos não resistentes, deve-se considerar que existe a possibilidade de ocorrência de deslocamento entre as lamelas a partir da admissão de um modelo de taxa de carbonização bilinear. (ABNT NBR 7190, 2022)

Para tanto, a norma especifica que a primeira lamela exposta ao fogo queime a uma taxa de carbonização constante, de acordo com o visto na Tabela 1. As demais lamelas deverão considerar o dobro dessa taxa de carbonização para os primeiros 25 mm de espessura da madeira. Decorrido esse período de carbonização, deve-se repetir o valor de taxa de carbonização tabelado. (ABNT NBR 7190, 2022). A Figura 14 demonstra o procedimento descrito.

Figura 14 – Modelo de taxa de carbonização bilinear



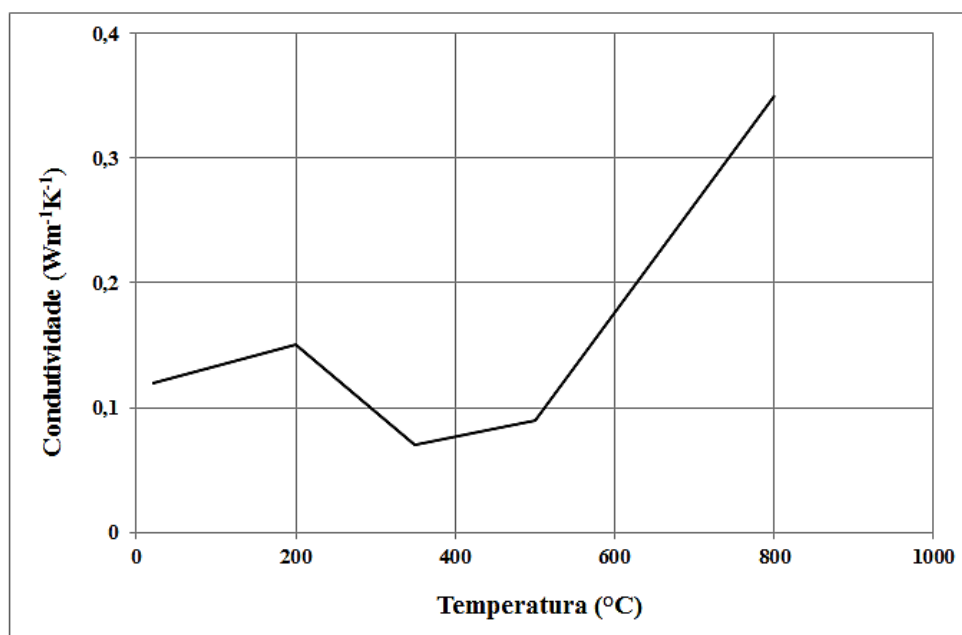
Fonte: NBR 7190-1, p. 76, 2022

#### 2.4.3 Perda de resistência e elasticidade em função da temperatura

A NBR 7190-1 (ABNT, 2022) traz instruções de como proceder os cálculos para o dimensionamento em situações de incêndio. Contudo, não constam dessa norma alguns valores fundamentais para as determinações das análises térmicas. A norma sugere que tais valores, como o coeficiente de transferência de calor, condutividade térmica, calor específico e influência da temperatura na densidade sejam aplicados conforme convenções preconizadas pela EN 1995-1-2 (2004). Dessa forma, adotou-se como critério o coeficiente de emissividade por radiação de 0,8 e o coeficiente de transferência de calor por convecção de  $25 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ .

Klippel (2014) e Martins (2016) conceituam condutividade térmica ( $\lambda$ ) como a medida de um material em transportar calor e é frequentemente expressa em  $[\text{W}/(\text{m K})]$ . Eles ainda descrevem que a condutividade térmica é a quantidade de calor propagada por meio de uma unidade de espessura na direção normal de uma superfície exposta ao calor de uma unidade de área, em virtude de um gradiente de temperatura. Para a condutividade térmica em relação ao aumento da temperatura, foram atribuídos os valores de referência propostos pela EN 1995-1-2 (2004), de acordo com o mostrado na Figura 15.

Figura 15 – Relação entre a condutividade térmica ( $\lambda$ ) e a temperatura para a madeira e o carvão

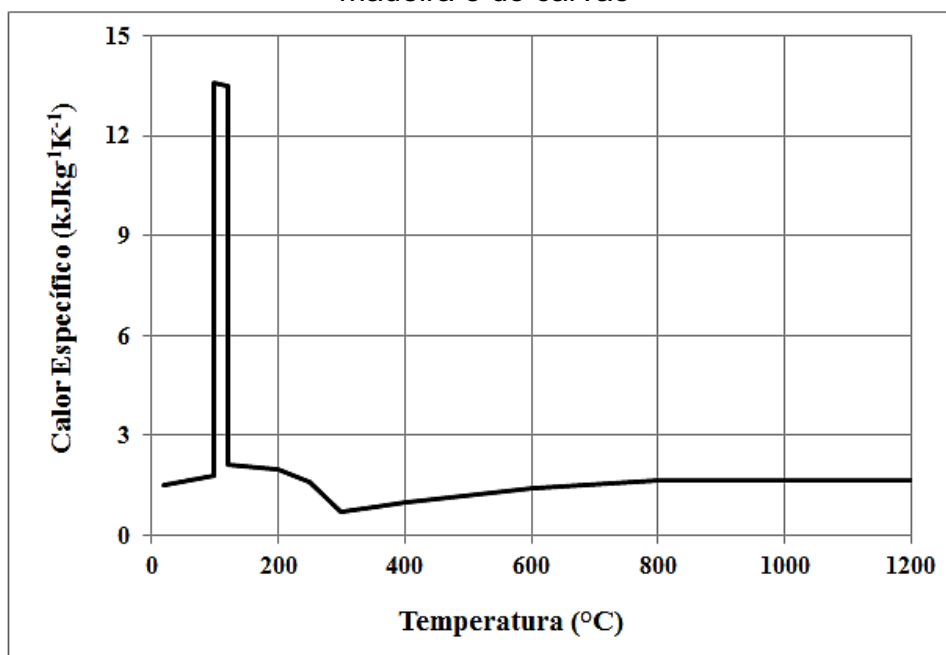


Fonte: adaptado de EN 1995-1-2, p. 49, (2004)

Os valores das relações entre condutividade térmica e temperatura até 500°C aplicados pela EN 1995-1-2 (2004) condizem com os apresentados pelos pesquisadores König e Walleij (1999), que realizaram estudos em uma série de ensaios de madeira da espécie *Spruce*, com densidade média de 450 kg/m<sup>3</sup>, sendo exposta ao incêndio-padrão da ISO 834 (1999). Entretanto, a EN 1995-1-2 (2004) fornece valores de temperatura acima de 500°C, para a condutividade térmica de camada carbonizada como valores “efetivos” em vez de valores “reais” das propriedades dos materiais, a fim de considerar o aumento do fluxo de calor em função de rachaduras acima de 500°C e de degradação da camada carbonizada para temperaturas superiores a 1000°C. (Klippel, 2014; Martins, 2016).

Por definição, calor específico (C) é a quantidade de energia necessária por uma unidade de massa para elevar a sua temperatura em um grau, expressa em [kJ/(kg K)]. Os valores adotados são referentes aos especificados pela EN 1995-1-2 (2004), conforme demonstrado na Figura 16. (Martins, 2016).

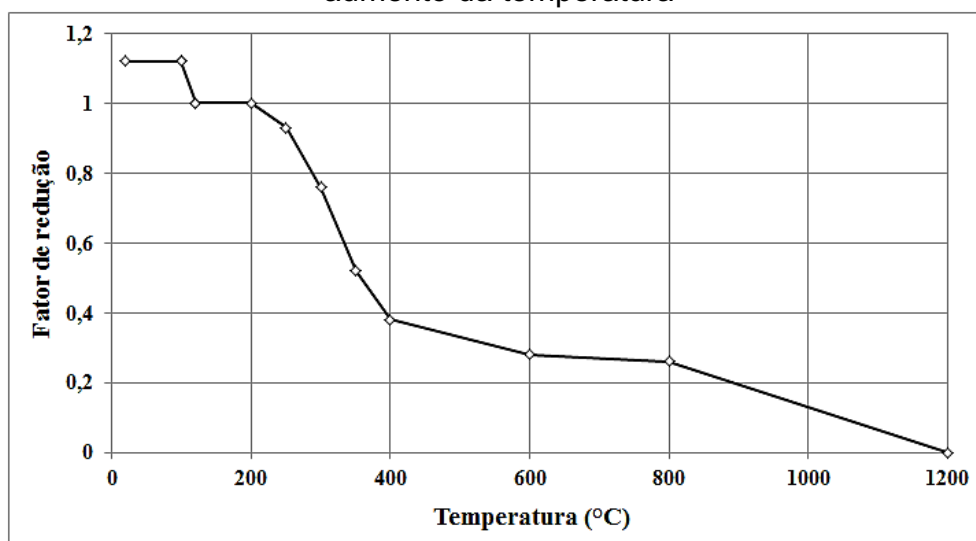
Figura 16 – Relação entre o calor específico (C) e a temperatura da madeira e do carvão



Fonte: adaptado de EN 1995-1-2, p. 49, (2004)

Para Martins (2016), a influência da temperatura na densidade das espécies de madeira é decorrente do teor de umidade ( $\omega$ ) contido nas peças. Foram considerados os critérios sugeridos pela EN 1995-1-2 (2004), conforme Figura 17.

Figura 17 – Relação entre o fator de redução ( $\omega$ ) da densidade com o aumento da temperatura



Fonte: adaptado de EN 1995-1-2, p.50, (2004)



A Tabela 3 mostra os valores de condutividade térmica, calor específico e densidade em relação ao aumento de temperatura, conforme prescrito na EN 1995-1-2 (2004).

Tabela 3 – Relação das propriedades dos materiais com a temperatura

| Temperatura °C | Condutividade térmica ( $\lambda$ ) ( $Wm^{-1}K^{-1}$ ) | Calor específico (C) ( $kJ.kg^{-1}.K^{-1}$ ) | Fator de redução da densidade ( $\omega$ ) |
|----------------|---|--|--|
| 20             | 0,12  | 1,53   | 1+ $\omega$                                |
| 99             | -   | 1,77   | 1+ $\omega$                                |
| 99             | -   | 13,60  | 1+ $\omega$                                |
| 120            | -   | 13,50  | 1,00                                       |
| 120            | -   | 2,12   | 1,00                                       |
| 200            | 0,15  | 2,00   | 1,00                                       |
| 250            | -   | 1,62   | 0,93                                       |
| 300            | -   | 0,71   | 0,76                                       |
| 350            | 0,07  | 0,85   | 0,52                                       |
| 400            | -   | 1,00   | 0,38                                       |
| 500            | 0,09  | -  | -  |
| 600            | -   | 1,40   | 0,28                                       |
| 800            | 0,35  | 1,65   | 0,26                                       |
| 1200           | 1,50  | 1,65   | 0  |

Fonte: adaptado de EN 1995-1-2, p. 49-50, (2004)

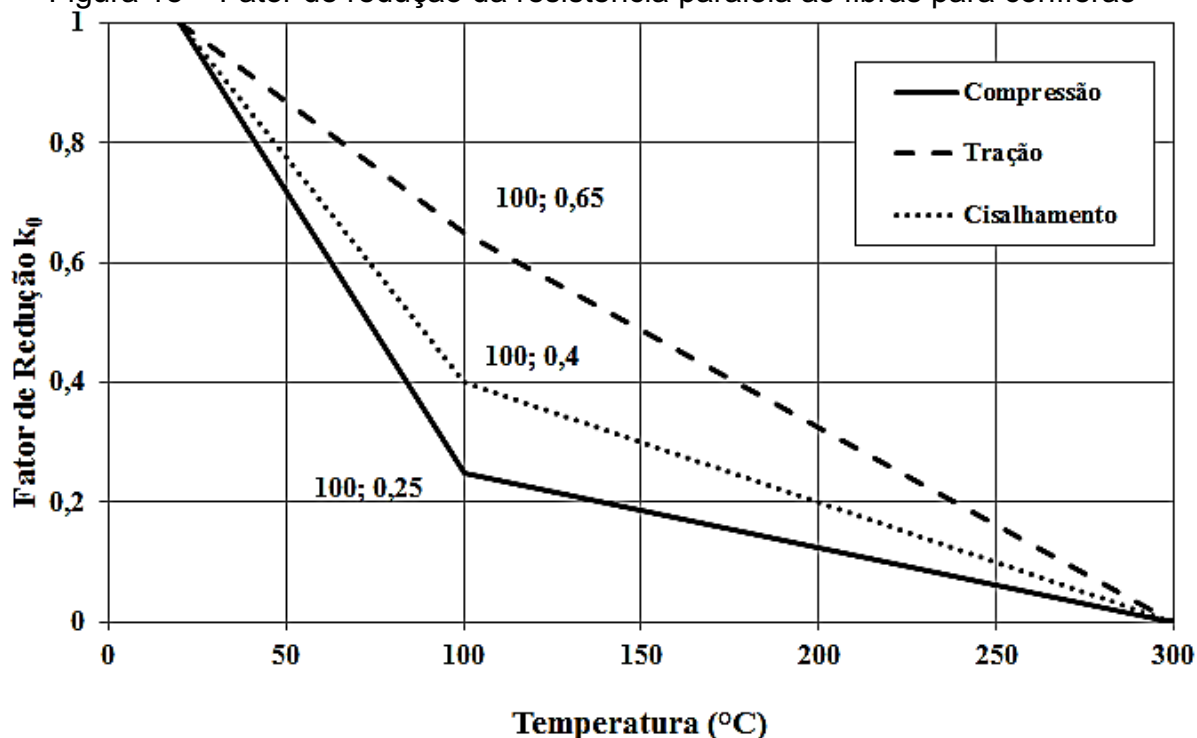
Assim como em todos os materiais que são expostos a elevadas temperaturas, a madeira também sofre alterações em sua rigidez e resistência, ou seja, existe uma diminuição nas resistências à compressão, tração, cisalhamento e flexão. A EN 1995-1-2 (2004) traz a relação entre os valores máximos de resistência e rigidez da madeira por meio de curvas bilineares, quando o elemento é exposto a temperaturas que variam de 20°C a 300°C, conforme pode ser visto na Tabela 4, Figura 18 e Figura 19.

Tabela 4 – Fatores de redução das propriedades mecânicas

| Temperatura °C | Resistência Paralela às fibras ( $k_0$ ) |        |              | Módulo de Elasticidade ( $E_0$ ) |        |
|----------------|--|--------|--------------|----------------------------------|--------|
|                | Compressão                               | Tração | Cisalhamento | Compressão                       | Tração |
| 20             | 1  | 1      | 1            | 1                                | 1      |
| 100            | 0,25                                     | 0,65   | 0,4          | 0,35                             | 0,5    |
| 300            | 0  | 0      | 0            | 0                                | 0      |

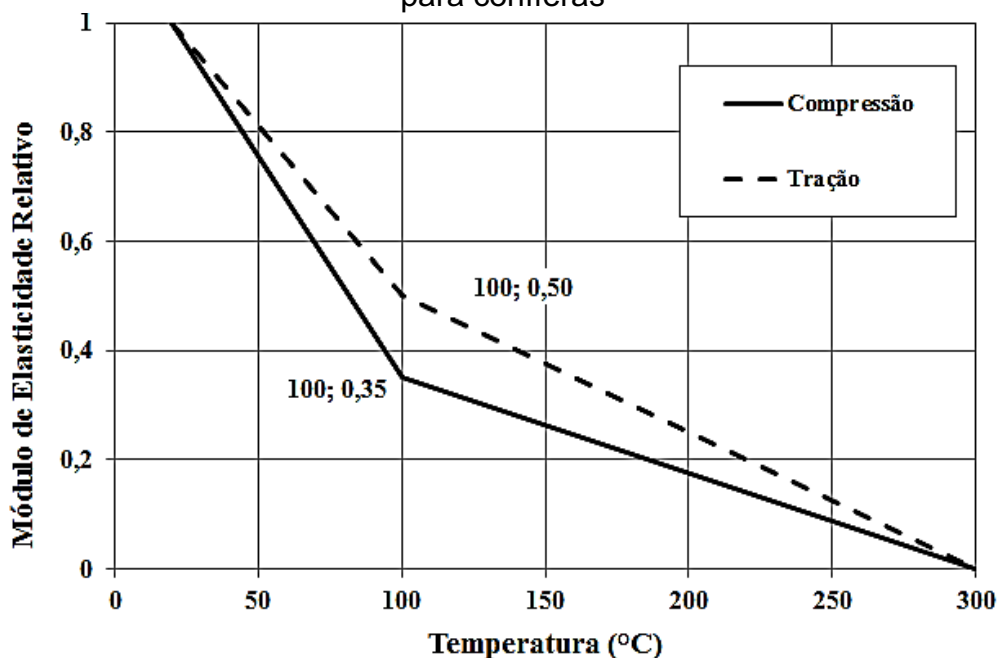
Fonte: adaptado de EN 1995-1-2, p.51, (2004)

Figura 18 – Fator de redução da resistência paralela às fibras para coníferas



Fonte: adaptado de EN 1995-1-2, p.51, (2004)

Figura 19 – Fator de redução no Módulo de Elasticidade paralela às fibras para coníferas



Fonte: adaptado de EN 1995-1-2, p.51, (2004)

O comportamento mecânico do aço, quando exposto a elevadas temperaturas, pode ser comprometido. Isso ocorre porque quando a estrutura atinge uma temperatura superior a 500°C, uma mudança em sua microestrutura interna começa

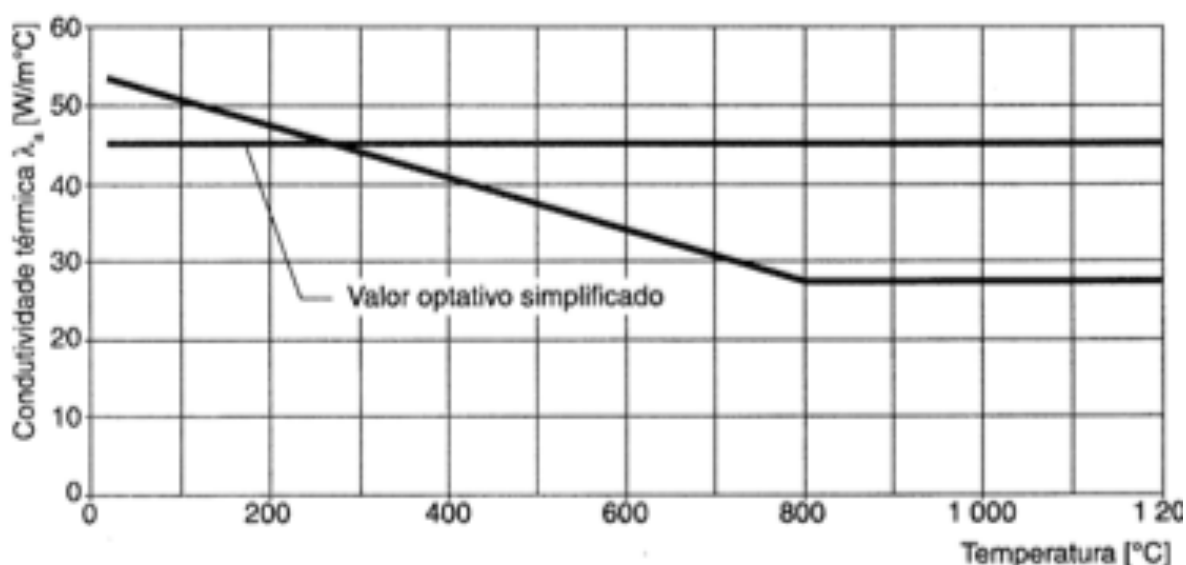
a ocorrer, gerando perda de rigidez e resistência, acarretando deformações (Gomes, 2022).

A NBR 7190-1 (ABNT, 2022) descreve que, em princípio, o estado limite último da ligação pode ser atingido por deficiência da resistência da madeira da peça estrutural ou do elemento de ligação. Ela também descreve que a segurança dos elementos intermediários de aço deve ser verificada conforme a norma vigente, nesse caso a NBR 8800 (ABNT, 2008). Entretanto, esta última normativa remete à NBR 14323 (ABNT, 2013) quando se refere às temperaturas elevadas.

Assim como para a madeira, foram relacionadas também as propriedades termomecânicas dos parafusos. Para tanto, tomou-se por base o que preconizam a NBR 14323 (2013) e o EN 1993-1-2 (2005), que tratam sobre estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto em situação de incêndio.

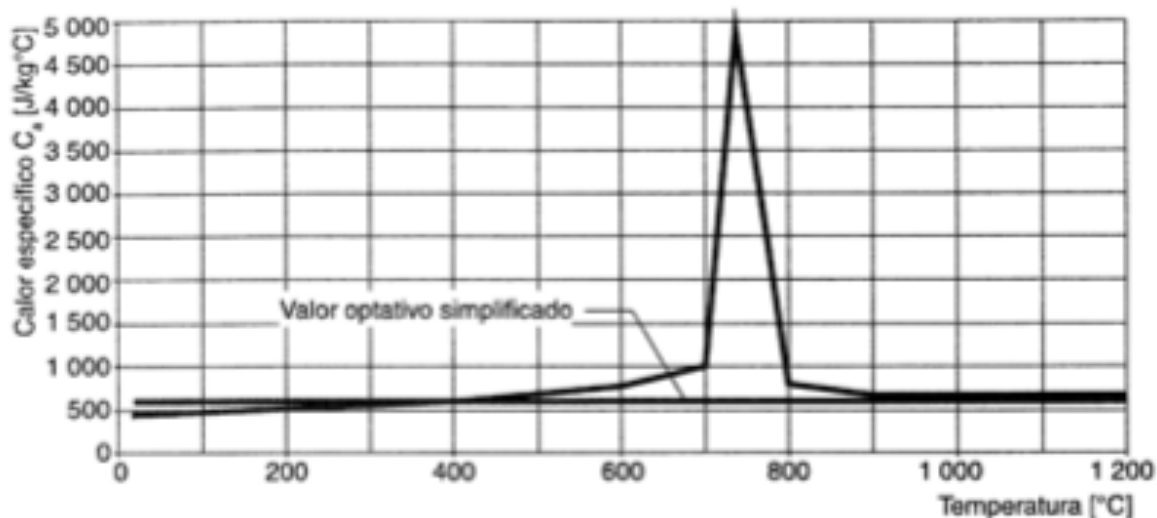
Os valores adotados para as propriedades térmicas dos parafusos seguiram os critérios estabelecidos na NBR 14323 (2013). Tais valores são determinados através de expressões analíticas e definidos por meio de gráficos que demonstram a evolução das propriedades em função do aumento das temperaturas, conforme mostrado na Figura 20 e na Figura 21. Todavia, para a condutividade térmica ( $\lambda$ ) aplicou-se o valor de 45, expressa em (W/m °C), e para o calor específico o valor de 650, expresso em (J/kg °C).

Figura 20 – Condutividade térmica ( $\lambda$ ) do aço em função da temperatura



Fonte: adaptado de NBR 14323, p.63, (2013)

Figura 21– Calor específico (C) do aço em função da temperatura



Fonte: adaptado de NBR 14323, p.63, (2013)

Entretanto, para os valores de emissividade ( $\varepsilon$ ) e coeficiente de expansão térmica ( $\alpha$ ) da madeira e do parafuso foram utilizados os valores sugeridos pelas normas EN 1995-1-2 (2004) e EN 1993-1-2 (2005), referentes à madeira e ao aço, respectivamente. A Tabela 5 apresenta os valores dessas propriedades.

Tabela 5 – Valores das propriedades termomecânicas

| Propriedade  | Madeira            | Aço                 |
|--|--------------------|---------------------|
| Emissividade ( $\varepsilon$ )                     | 0,8                | 0,7                 |
| Coeficiente de expansão térmica ( $\alpha$ ) [1/K] | $4 \times 10^{-6}$ | $12 \times 10^{-6}$ |

Fonte: autora, 2023

#### 2.4.4 Ações e segurança dos painéis CLT

Em uma situação normal de temperatura ambiente para dimensionamento de qualquer estrutura, seja ela madeira, concreto ou aço, é fundamental que sejam verificadas as situações de Estados Limites Últimos (ELU), em que a resistência do material deve ser maior ou igual aos esforços solicitantes, conforme a Equação 4.

$$R_d \leq S_d \quad \text{Equação 4}$$

No qual  $R_d$  refere-se ao valor de cálculo do esforço resistente e  $S_d$  o valor de cálculo do esforço atuante na estrutura.

Todavia, quando se trata de ações de cálculo em situação de incêndio, a norma brasileira NBR 7190-1 (2022) especifica na seção 11.2 um método simplificado de

dimensionamento. Primeiramente a norma considera como preceito o modelo de incêndio-padrão, o qual é a elevação combinada de temperatura em virtude do tempo, especificada na NBR 5628 (2022) e descrita pela equação abaixo, baseada na ISO 834 (1999).

$$\theta_g = \theta_0 + 345 \log(8t + 1) \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

$\theta_0$  – é a temperatura em graus Celsius (°C)

t – é o tempo em minutos (min)

Para determinar a segurança da estrutura em situação de incêndio, a norma brasileira assegura o atendimento das condições analíticas por meio da Equação 6:

$$R_{fi,d} \geq S_{fi,d} \quad \text{Equação 6}$$

Sendo  $R_{fi,d}$  o esforço resistente de cálculo em situação de incêndio, e  $S_{fi,d}$  o valor obtido a partir das combinações últimas excepcionais de ações definidas na NBR 8681. Pode-se também utilizar a seguinte Equação 7, admitindo as ações como iguais a 60% das solicitações de cálculo em situação normal (20°C). A norma deixa claro que não existe a necessidade de realizar a verificação dos Estados Limites de Serviço quando se trata de situação de incêndio. (ABNT NBR 7190, 2022).

$$S_{fi,d} = 0,6 \cdot S_d \quad \text{Equação 7}$$

Ainda em relação à determinação das resistências de cálculo e o módulo de elasticidade das madeiras, a NBR 7190 (ABNT, 2022) sugere considerar os valores seguindo as recomendações das Equação 8 e Equação 9:

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{f_{0,2}}{\gamma_{W,fi}} \quad \text{Equação 8}$$

$$E_{ef,fi} = k_{mod,fi} \frac{E_{0,2}}{\gamma_{W,fi}} \quad \text{Equação 9}$$

Sendo:

$k_{mod,fi}$  – igual a 1,0 e inclui os efeitos da redução de resistência e rigidez da madeira;

$\gamma_{W,fi}$  – igual a 1,0;

$f_{0,2} = k_{fi} \cdot f_k$

$E_{0,2} = k_{fi} \cdot E_{0,05}$  – em que o valor de  $k_{fi}$  pode ser obtido por meio da Tabela 6.

Tabela 6 – Valores de  $k_{fi}$

| Material                        | $k_{fi}$ |
|---------------------------------|----------|
| Madeira serrada                 | 1,25     |
| Madeira Lamelada Colada         | 1,15     |
| Madeira Lamelada Colada Cruzada | 1,15     |
| Painéis à base de madeira       | 1,15     |
| LVL                             | 1,10     |

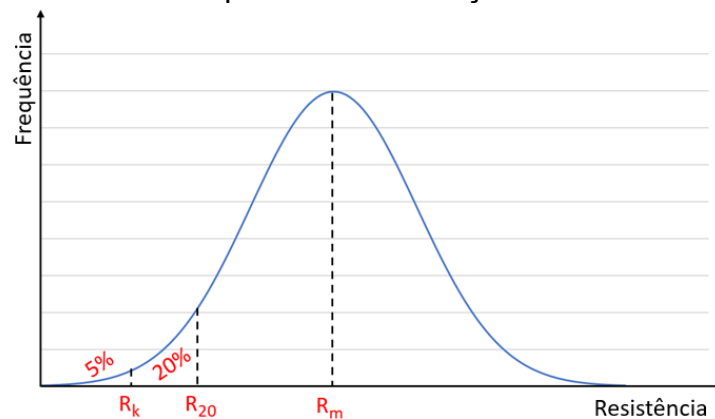
Fonte: adaptado de NBR 7190, p.73, (2022)

Para os esforços resistentes de cálculo em situação de incêndio, a NBR 7190 (ABNT, 2022) define os valores por meio da Equação 10:

$$R_{fi,d} = k_{mod,fi} \frac{R_{0,2}}{\gamma_{W,fi}} \quad \text{Equação 10}$$

Onde o valor  $R_{0,2}$  deve ser calculado pelos critérios estabelecidos na norma. Esse valor se refere ao dimensionamento em temperatura normal, desde que a área resistente seja adequadamente reduzida e as propriedades mecânicas substituídas pelos referentes ao quantil de 20%, conforme representado na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Figura 22 – Curva normal para a determinação da resistência da madeira



Fonte: adaptado de Vairo, p.58 (2022)

### 2.3 Conexões nos painéis CLT

Segundo Almeida (2019), mesmo com o surgimento do CLT na década de 90, ainda é necessária uma divulgação maior dessa tecnologia, o que claramente possibilitará a evolução do sistema. Almeida (2019) e Espinoza *et al* (2016) esclarecem que são necessárias investigações urgentes quando se fala desse tema, principalmente em relação ao desempenho estrutural, à umidade e às ligações dos painéis.

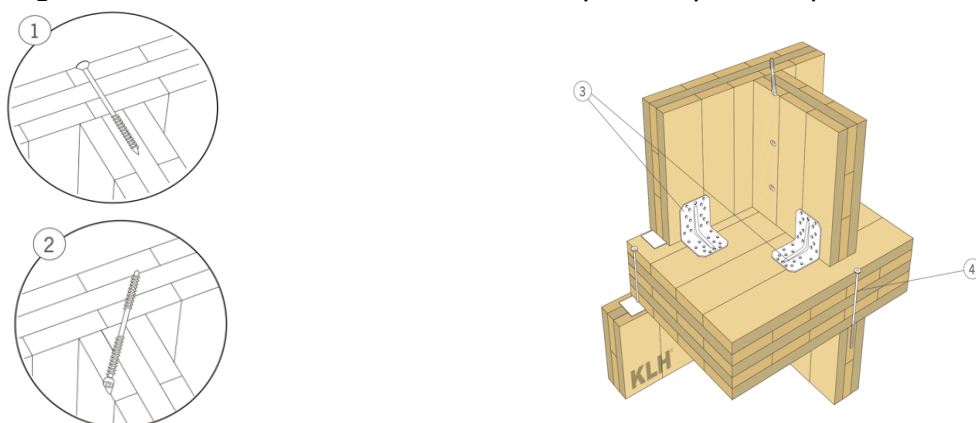
Palma (2016) afirmou que o comportamento ao fogo de uma estrutura de madeira é amplamente influenciado pelo comportamento de suas ligações. As normas atuais, tanto a NBR 7190 (ABNT, 2022) quanto a EN 1995-1 (2004), trazem os principais critérios de dimensionamento dos tipos de ligação. Esses cálculos, todavia, são baseados em regras empíricas, sendo poucos os ensaios sobre a resistência ao fogo em ligações que normalmente são carregadas à tração paralela das fibras. (Palma, 2019; Vairo, 2022).

Em temperatura normal, as ligações apresentam diferenças quando aplicadas cargas nas direções paralelas e perpendiculares às fibras da madeira, sendo que para esta última as falhas ocorrem por fendilhamento frágil. De modo geral, as ligações apresentam seus critérios de resistência em função do embutimento da madeira e do momento resistente do conector. (Palma, 2019; Vairo, 2022).

Todavia, quando são expostas diretamente ao fogo, as peças metálicas, transferem, por condutividade térmica, calor para o interior da peça de madeira, fazendo com que esses pontos sejam considerados críticos. Em decorrência desse fenômeno, acontece ao redor das ligações o efeito de carbonização, que resulta na diminuição da capacidade resistente entre o conector e a peça de madeira, e da rigidez da ligação. (Vairo, 2022)

Atualmente existem diversos tipos de conexão para os painéis CLT, dos quais a maior parte são os parafusos e conectores metálicos. Dentre os conectores, destacam-se as cantoneiras, T metálicos, chapas parafusadas, dentre outros, como se observa na Figura 23. (Crosslan, 2021).

Figura 23 – Possibilidades de conexões parede-parede, parede-teto



1 – Ligação com parafusos de paredes cruzadas – conexões aparafusadas do lado de fora

2- Ligações com parafusos de paredes cruzadas – conexões aparafusadas por dentro

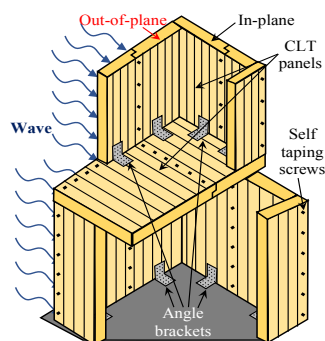
3 – Transmissão da força de cisalhamento ao longo da junta de ancoragem de tensão das paredes – conectores metálicos com parafusos roscados

4 – Parafusos roscados: ligação vertical

Fonte: adaptado KLH MASSIVHOLZ GmbH, 2012

As conexões são empregadas para unir os painéis, ou seja, parede CLT com piso CLT ou ainda com a fundação, conforme Figura 24 (Salgado *et al*, 2021).

Figura 24 – Tipos de ligações no sistema CLT



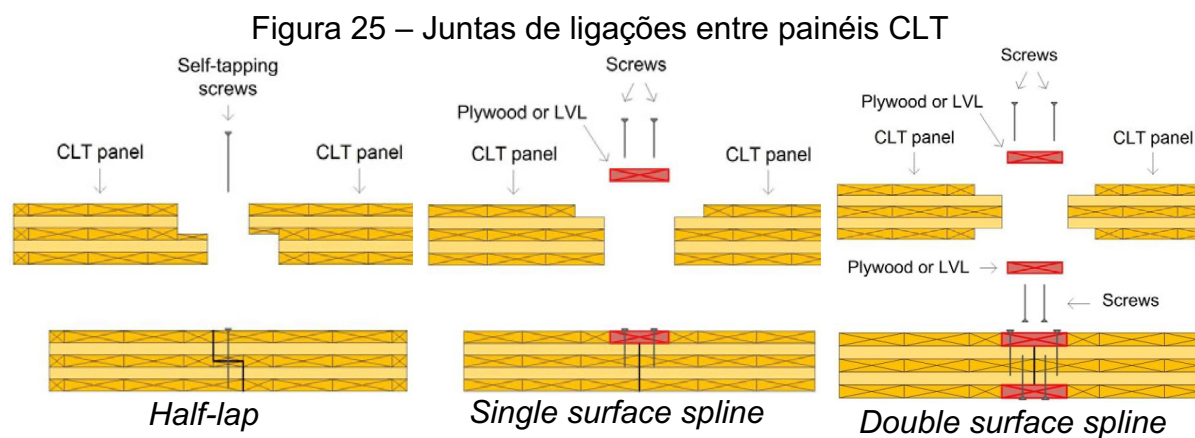
Fonte: Salgado *et al*, p. 2 (2021)

Salgado *et al* (2021) asseguram que as conexões dos painéis CLT são conhecidas por contribuir para uma maior flexibilidade, possibilitando ao sistema a necessária resistência, rigidez e ductilidade.

Dos possíveis encaixes entre dois painéis, podem ser citados três tipos de juntas: *half-lap*; *spline* – simples, que consiste em uma lâmina de compensado *Laminated Veneer Lumber* (LVL) fixada em uma única face, por meio de parafusos, conectando os painéis; e, *spline* – dupla, que são duas placas de LVL fixadas nas



duas faces, por meio de parafusos, conforme a Figura 25 (Almeida, 2019; FPInnovations, 2019).



Fonte: FPInnovations, cap. 5, p. 8-10, 2019

Existem vários tipos de elementos de ligação, como pinos, parafusos e cavilhas. Para serem empregados nas estruturas de madeira, devem ser calculados o número de pinos, o diâmetro dos parafusos e os espaçamentos, sempre seguindo o que preconizam as normas técnicas. (Almeida, 2019).

A dimensão dos corpos de prova é baseada nas diretrizes normativas da ANSI/APA PGR 320 (2019). Não existe um parâmetro para os dimensionamentos dos testes. Dessa forma, foram seguidos neste estudo os recomendados na literatura, conforme Tabela 7. (Almeida, 2019).

Tabela 7 – Configurações e dimensões de corpos de prova da literatura

| Referência                                 | Configurações<br>Parede-parede, parede-piso                  | Dimensões (cm)<br>LAR.x ALT.x ESP.                               |
|--|--|--|
| Joyce, Ballerini,<br>Smith (2011)          | 1 – Spline dupla<br>2 – Junta de extremidade                 | 40 x 60 x 11,2   |
| Gravic, Fragiacomio,<br>Ceccotti (2012)    | 1 - Half-lap<br>2 – Spline                                   | 40 x 45 x 8,5<br>25 x 45 x 8,5<br>30 x 45 x 8,5<br>20 x 45 x 8,5 |
| Flatscher, Bratulic,<br>Schickhofer (2014) | 1 – Half-lap   | 250 x 250 x 9,8<br>250 x 125 x 9,8                               |
| Richardson (2015)                          | 1 – Spline<br>2 – Half-lap<br>3 – Extremidade e chapa de aço | 30,5 x 30,5 x 17,5<br>30,5 x 45,7 x 17,5<br>30,5 x 60,9 x 17,5   |
| Hossain, Danzing,<br>Tannert (2016)        | 1 – Junta de extremidade                                     | 50 x 150 x 9,9   |

Fonte: Adaptado de Almeida, p.48, 2019

Considerando a relevância do tema, Popovski, Schneider e Schweinsteiger (2010) realizaram testes, levando em conta os abalos sísmicos que ocorrem na cidade de Vancouver, para analisar o comportamento dos conectores metálicos. Nesse estudo, foram utilizados painéis de madeira do tipo Abeto europeu, composto por 3 camadas e 94 mm de espessura, sendo que sua dimensão ficou limitada em virtude do transporte, ou seja, 2,30 m x 2,30 m, e os painéis foram confeccionados pela empresa KLM Massivholz GmbH, na Áustria.

Foram realizados 3 tipos de configurações de teste diferentes, considerando as variáveis altura, comprimento e pé direito de parede de 2 pavimentos, sendo efetuados, ao todo, 12 testes.

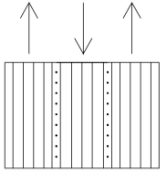
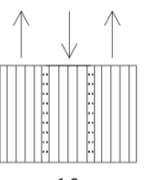
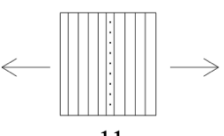
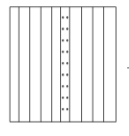
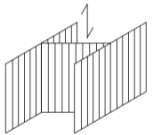
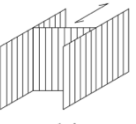
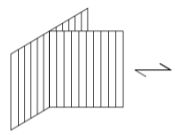
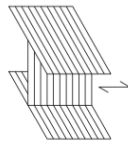
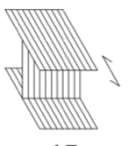
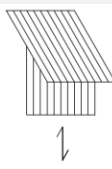
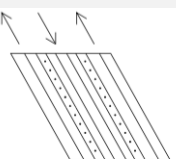
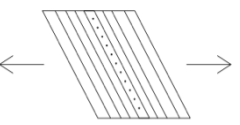
Após a realização dos testes, os pesquisadores concluíram que os conectores ligados ao painel CLT e à fundação tinham desempenho favorável para áreas de abalos sísmicos. Porém, nos casos em que painéis foram sobrepostos para compor dois pavimentos, não foi recomendada a utilização de parafusos longos em ângulos, em áreas onde existam abalos sísmicos, para interligar uma parede a outra, pois a ligação teve um menor comportamento dúctil.

Além desses autores, outros pesquisadores abordaram as ligações como parte fundamental no comportamento estrutural dos painéis CLT.

Gavric, Fragiaco e Ceccotti (2012) realizaram experimentos de conexões típicas de X-Lam, no instituto de pesquisa CNR-IVALSA, objetivando proporcionar uma melhor compressão do desempenho sísmico das ligações nas edificações de madeira laminada cruzada. O experimento foi dividido em três partes principais. Contudo, para o artigo em questão, foram demonstrados apenas os resultados referentes aos ensaios de ligação painel-painel aparafusados.

Foram realizadas ao todo 20 configurações. Porém, para o estudo foram considerados 12 ensaios, conforme demonstrado na Tabela 8, de cisalhamento com pelo menos um teste monotônico e seis cíclicos no plano de conexões mecânicas aparafusadas entre painéis X-Lam parede-parede e piso-piso paralelos adjacentes.

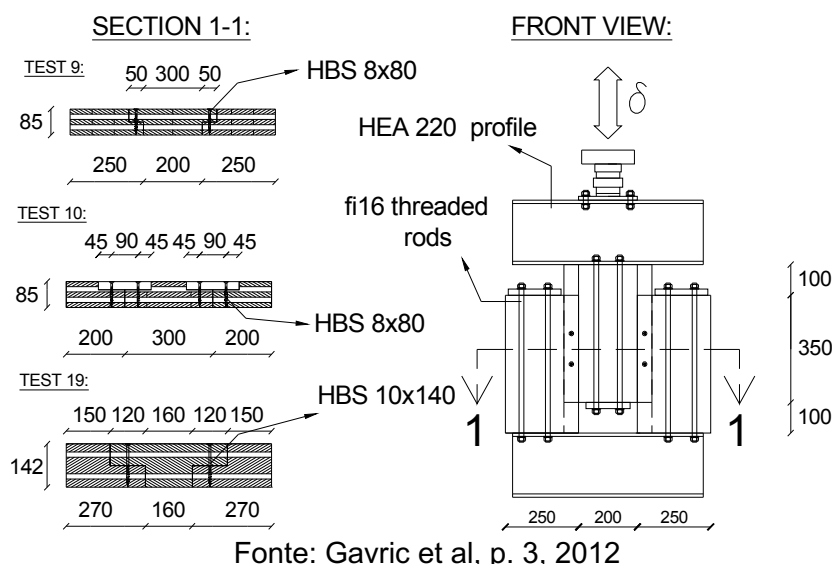
Tabela 8 – Tipos de configurações testadas no programa para as ligações CLT

| <b>Conexões parede – parede (painéis paralelos)</b>  |   |  |   |   |
|--|---|--|---|---|
| <b>Configuração de teste</b>                         |    |     |     |  |
| <b>Direção do carregamento</b>                       | Lateral paralelo (Lap joint)  | Lateral paralelo (Spline joint)  | Lateral perpendicular (Lap joint)   | Lateral perpendicular (Spline joint)  |
| <b>Tipo e número de parafusos</b>                    | HBS $\varnothing$ 8x80<br>2x2 parafusos   | HBS $\varnothing$ 8x80<br>2x4parafusos   | HBS $\varnothing$ 8x80<br>2 parafusos   | HBS $\varnothing$ 8x80<br>2x2 parafusos   |
| <b>Conexões parede – parede (painéis ortogonais)</b> |   |  |   |   |
| <b>Configuração de teste</b>                         |    |     |    |   |
| <b>Direção do carregamento</b>                       | Lateral perpendicular   | Lateral perpendicular  | Carregamento de retirada  |   |
| <b>Tipo e número de parafusos</b>                    | HBS $\varnothing$ 10x180<br>2x2 parafusos   | HBS $\varnothing$ 10x180<br>2x2 parafusos  | HBS $\varnothing$ 10x180<br>4 parafusos   |   |
| <b>Conexões de painéis parede – piso</b>             |   |  |   |   |
| <b>Configuração de teste</b>                         |  |   |  |   |
| <b>Direção do carregamento</b>                       | Lateral perpendicular   | Lateral perpendicular)   | Carregamento de retirada  |   |
| <b>Tipo e número de parafusos</b>                    | HBS $\varnothing$ 10x260<br>2x2 parafusos   | HBS $\varnothing$ 10x260<br>2x4parafusos   | HBS $\varnothing$ 10x260<br>2 parafusos   |   |
| <b>Conexões de painéis piso – piso</b>               |   |  |   |   |
| <b>Configuração de teste</b>                         |  |  |   |   |
| <b>Direção do carregamento</b>                       | Lateral paralelo (Lap joint)  | Lateral perpendicular (Lap joint)  |   |   |
| <b>Tipo e número de parafusos</b>                    | HBS $\varnothing$ 10x140<br>2x2 parafusos   | HBS $\varnothing$ 10x140<br>2 parafusos  |   |   |

Fonte: adaptado de Gavric et al, p.2-3, 2012

Em relação à forma de encaixe das juntas, o estudo utilizou os tipos *lap joint* e *spline joint*, submetendo-as a testes de cisalhamento no plano dos painéis de paredes adjacentes, conforme Figura 26.

Figura 26 – Composição dos testes dos modelos 9, 10 e 19 (medidas em mm)



Foram também realizados ensaios monotônicos e cíclicos conectados ortogonalmente, submetidos aos esforços de cisalhamento e retirada, para poder avaliar as propriedades mecânicas de resistência, rigidez, ductilidade, dissipação de energia, entre outros. Tais testes serviram de referência para fornecer informações que estavam faltando no Eurocode 8 – referente à madeira.

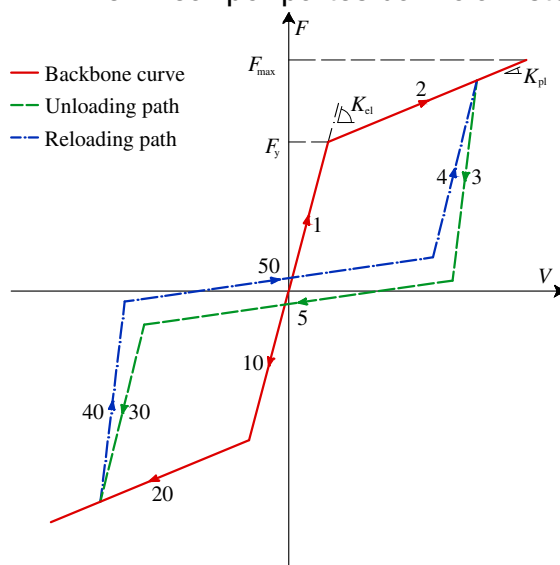
Izzi, Polastri e Fragiaco (2018) propuseram um modelo numérico no qual foi avaliado tanto o comportamento mecânico quanto os mecanismos de falha de um sistema de paredes CLT. Para tal estudo foram realizadas inúmeras pesquisas considerando o comportamento de histerese de conexões mecânicas e resistência às cargas laterais em painéis CLT. Autores como Casagrande *et al* (2016); Flatscher *et al* (2015); Gavric *et al* (2015 a, b, c); Tomasi e Smith (2015) realizaram trabalhos sobre as ligações entre parede-piso e parede-parede, avaliando os efeitos do cisalhamento e da tração. Outros autores como Loggner *et al* (2016); Lu e Lam (2016); Pozza *et al* (2016a) recentemente produziram estudos, executando testes nas ligações, aplicando de maneira simultânea cargas laterais e axiais. Dessa forma, foi possível verificar que, quando se tem a ação do cisalhamento acoplado, o desempenho nas conexões pode ser afetado.

Izzi *et al* (2018) concluíram que um sistema de parede CLT pode ser motivado por inúmeras condições, sendo elas: propriedades mecânicas e layout das conexões, relação de aspecto do painel, presença de abertura e condições de contorno.

Desse modo, a parede e o elemento de ligação foram modelados utilizando corpos sólidos tridimensionais, com malhas de elementos cúbicos e interação reduzida (C3D8R). Para a realização da interação, foram definidos parâmetros entre a parede CLT e o elemento subjacente, no qual foram considerados, no comportamento normal, a situação de contato rígido unilateral, e para o comportamento tangencial foi empregado uma formulação de penalidade atribuída pelo *software* ABAQUS. Foram designados dois componentes de deslocamento simultâneos nas direções axial e cisalhamento, sendo que para esse deslocamento a simulação esteve baseada nas determinações prescritas pelas Avaliações Técnicas Europeias (ETAs) de conectores metálicos para estruturas CLT.

Foram designadas as etapas de descargas e recargas, levando-se em conta as seguintes ramificações: #3, #5 e #30 para descargas; e #40, #50 e #4 para recargas – seguindo as indicações das propriedades mecânicas da conexão. (Figura 27).

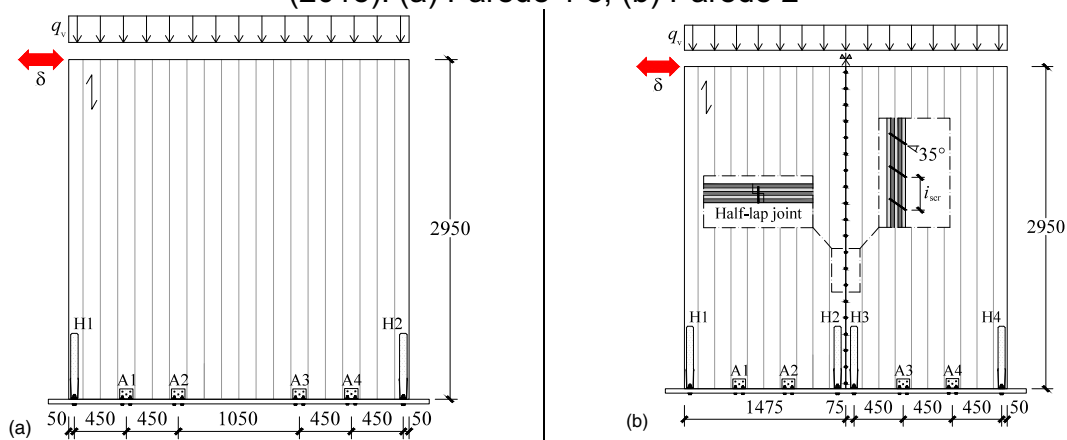
Figura 27 – Lei linear por partes da mola histerética



Fonte: Izzi *et al*, p. 3, 2018

Para esquematizar o comportamento das conexões, foram aplicados testes típicos de estantes de paredes CLT. Esses ensaios foram executados e testados no CNR IVALSA e, em 2015, Gavric *et al* publicaram. Dois modelos de corpos de provas foram montados e designados: Parede 1 e Parede 2 (Figura 28).

Figura 28 – Esquema dos modelos de corpos de provas testados por Gavric *et al* (2015): (a) Parede 1 e, (b) Parede 2



Fonte: Izzi et al, p. 3, 2018

Para melhor entendimento, a Parede 1 foi composta apenas como uma parede quadrada, enquanto a Parede 2 foi montada considerando dois painéis retangulares adjacentes, fixados entre si por juntas do tipo *half-lap*. Todavia, a Parede 2 foi subdividida em duas análises, variando o *layout*: na primeira análise, considerando uma configuração com todos os suportes e, na segunda, considerando a redução dos retentores pela metade, removendo as retenções H<sub>2</sub> e H<sub>3</sub>. A Tabela 9 mostra a configuração para as análises numéricas e experimentais empregadas na pesquisa.

Tabela 9 – Configuração experimental de sistemas de paredes CLT

| Componente               | Parede 1                                     | Parede 2-A                                   | Parede 2-B                                    |
|--------------------------|--|--|---|
| Painéis de parede        | 1 painel CLT (2,950 x 2,950) mm <sup>2</sup> | 2 painel CLT (1,475 x 2,950) mm <sup>2</sup> | 2 painel CLT (1,475 x 2,950) mm <sup>2</sup>  |
| Cantoneiras              | 4 AE116 (11 pregos, 1 parafuso)              | 4 AE116 (11 pregos, 1 parafuso)              | 4 AE116 (11 pregos, 1 parafuso)               |
| Fixadores                | 2 WHT540 (12 pregos, 1 parafuso)             | 2 WHT540 (12 pregos, 1 parafuso)             | 2 WHT540 <sup>a</sup> (12 pregos, 1 parafuso) |
| Juntas <i>half-lap</i>   | Nenhuma                                      | 5 HBS 8 x 80 ( $i_{scr} = 500$ mm)           | 20 HBS 8 x 80 ( $i_{scr} = 150$ mm)           |
| Força vertical ( $q_v$ ) | 18,5 kN/m                                    | 18,5 kN/m                                    | 18,5 kN/m                                     |

<sup>a</sup> Quando H<sub>2</sub> e H<sub>3</sub> são removidos

Fonte: Adaptado de Izzi et al, p. 4, 2018

Para as simulações dos modelos descritos, foram considerados, na investigação do comportamento histerese e para o comportamento mecânico das conexões, os parâmetros sob cargas de cisalhamento e tração acoplados baseados em domínios de uma equação quadrática e discutidas segundo as considerações propostas por Rinaldin *et al* (2013). Para tanto, foram aplicados aos modelos quatro métodos, descritos na Tabela 10.

Tabela 10 – Métodos esquemáticos para avaliar o comportamento das conexões

| Método | Conectores metálicos | Resistência ao cisalhamento | Resistência à tração | Interação <sup>a</sup> |
|--------|----------------------|-----------------------------|----------------------|------------------------|
| A      | Cantoneira           | Sim                         | Sim                  | Sim                    |
|        | Fixadores            | Sim                         | Sim                  | Sim                    |
| B      | Cantoneira           | Sim                         | Sim                  | Não                    |
|        | Fixadores            | Sim                         | Sim                  | Não                    |
| C      | Cantoneira           | Sim                         | Sim                  | Não                    |
|        | Fixadores            | Não                         | Sim                  | Não                    |
| D      | Cantoneira           | Sim                         | Não                  | Não                    |
|        | Fixadores            | Não                         | Sim                  | Não                    |

<sup>a</sup> Interação entre cisalhamento-tração conforme a equação quadrática e discussão de Rinaldin et al (2013)

Fonte: Adaptado de Izzi et al, 2018

Dessa forma, os resultados encontrados consideraram que é necessária a resistência à carga axial nas cantoneiras, com vistas a prever uma capacidade de carga mais realista. Ainda, foi importante ressaltar o atrito entre as paredes, pois presumiram uma dissipação confiável de energia. Quanto à influência da carga vertical aplicada ao topo da parede e à relação dos aspectos dos painéis, inúmeros estudos numéricos paramétricos foram realizados e seus resultados foram discutidos e comparados aos publicados na literatura. E por fim, o comportamento histerese com variação de layout mostrou que a junção vertical influenciou a distribuição das cargas dentro do sistema de paredes, assim como a dissipação da energia. Caso essa junta vertical fosse capaz de impedir o deslizamento entre as paredes, o sistema se comportaria de maneira monolítica. Todavia, como o deslocamento ocorreu, a resposta carga-deslocamento do sistema de paredes foi, em sua maior parte, provocada pela ação das propriedades e da posição das conexões de ancoragem.

Mahr, Sinha e Barbosa (2020) realizaram estudos de conexões típicas de cisalhamento em Madeira Laminada Cruzada, considerando os efeitos térmicos. Para a pesquisa foram utilizadas tanto a investigação experimental quanto a análise numérica. Todavia, o que os autores propuseram como objetivo principal do trabalho foi mostrar a deficiência, na área de conhecimento de degradação térmica, quanto à capacidade de uma ligação típica de cisalhamento de uso frequente nos projetos de sistemas laterais.

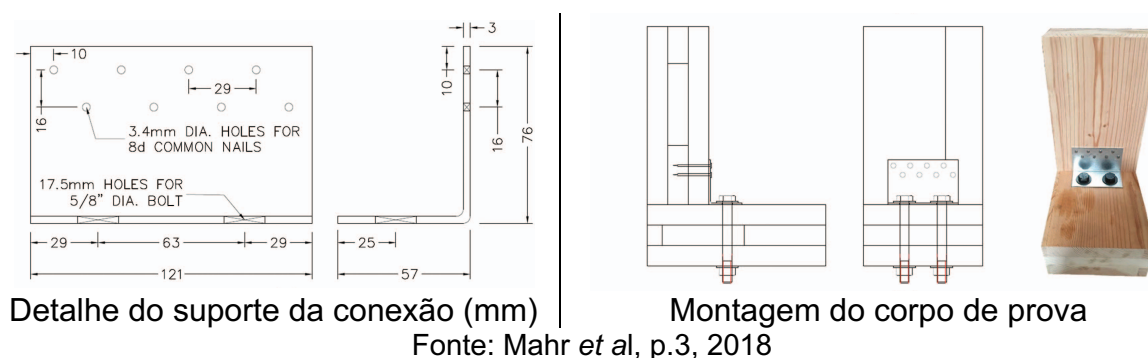
Durante a pesquisa, os autores encontraram muitas referências ao estudo da ação do fogo em relação ao CLT, principalmente na Europa, onde as pesquisas estabeleceram parâmetros que nortearam os métodos de projetos que estimam a taxa

de carbonização e a delaminação entre os painéis de CLT, protegidos ou não protegidos, de diversas espécies e ainda quando tenham sua configuração do *layout* alterada.

Outro aspecto importante da pesquisa feita pelos autores foi o fato de encontrarem muitos estudos referentes a sismos, principalmente no oeste dos Estados Unidos, que estão em andamento. Porém, um grupo de pesquisadores de instituições como Colorado State University (CSU), Oregon State University (OSU), Colorado School of Mines, University of Trieste na Itália, entre outras, iniciou estudos sobre conexões em níveis de testes de cisalhamento de parede. Até a publicação desse artigo, nada havia sido pesquisado sobre a influência de elevadas temperaturas sobre o desempenho no plano de cisalhamento de paredes CLT, considerando que a altura da edificação interfere no desempenho ao fogo. Diante disso, o estudo do comportamento foi necessário para estabelecer parâmetros para novas edificações e novos conceitos para os códigos de edificações.

O método utilizado para realizar os testes considerou a ASNI PRG 320 V1, levando em conta propriedades como teor de umidade e dimensões. As peças para compor o elemento que seria analisado foram ligadas por meio de uma conexão de suporte em L feita de aço galvanizado, conforme a Figura 29.

Figura 29 – Demonstração do elemento analisado



Foram confeccionadas 120 amostras, sendo 4 delas amostras de controle. Essas amostras foram testadas em 28 combinações de exposição a temperaturas elevadas. As amostras de controle foram testadas à temperatura ambiente de 25°C. As outras foram testadas considerando o fator tempo, dividido em quatro tempos (0,5; 1; 1,5; e 2h), e o fator temperatura, dividido em sete temperaturas (75°C, 100°C, 125°C, 165°C, 180°C, 190°C e 200°C). Os critérios de tempo levaram em conta o tempo mínimo descrito no *International Building Code* (IBC) para a classificação de



elementos estruturais para resistência ao fogo, e para a temperatura foi considerada uma máxima de 200°C, evitando que as mostras entrassem em combustão.

A análise foi realizada através de dois modelos analíticos: um considerando o mecanismo de cinética de primeira ordem e o outro utilizando a regressão estatística.

Os resultados encontrados após a exposição a temperaturas elevadas permitiram concluir que a resistência de carga de pico e a rigidez inicial diminuíram em função da duração da exposição, e que a relação entre ambas ocorreu de forma linear.

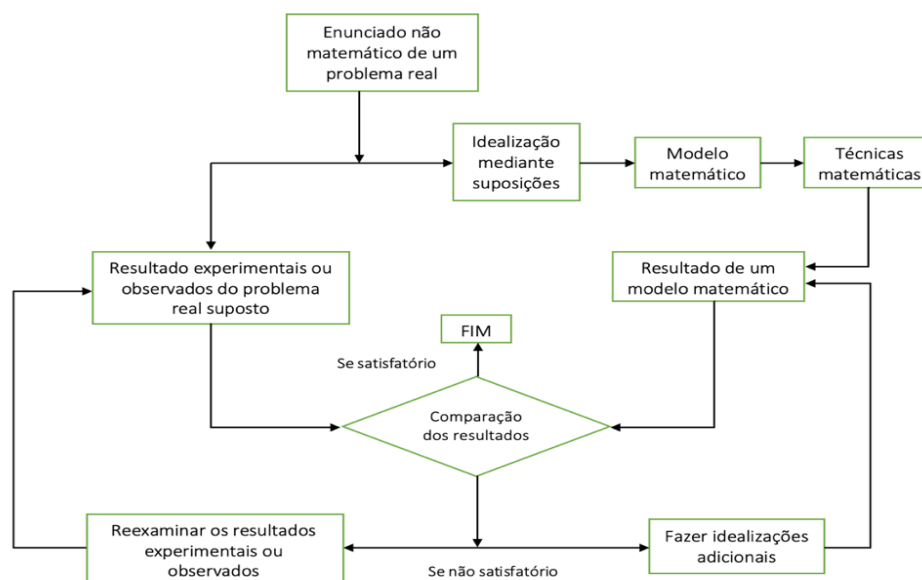
## **2.4 Estudos baseados em simulações numéricas**

Bittencourt (2010) afirma que o Método dos Elementos Finitos (MEF) foi inicialmente desenvolvido para atuar em aplicações de engenharia e tem como base sólida os conceitos matemáticos, os quais criam por meio de métodos numéricos, abrangendo as equações diferenciais ordinárias e parciais, soluções dos Problemas de Valor de Contorno (PVC).

Levando-se em conta que um modelo é normalmente a representação, ou seja, substituição de algo real, pode-se entender que um modelo matemático é uma formulação, equação ou um conjunto de equações. (Brasil *et al*, 2015). Entretanto, para Brasil *et al* (2015), o desafio de se ter uma modelagem matemática não é elaborar o modelo descritivo que seja mais robusto, mas encontrar o modelo mais simples possível e que esteja próximo do fenômeno real, compreendendo as principais características do fenômeno de interesse. Para tanto, pode-se dividir a modelagem primeiramente em ter uma ideia clara dos tipos e leis do problema; segundo, introduzir os pressupostos e transformá-los em equações matemáticas (relações de fenômenos); e, por último, resolver e interpretar os resultados, conhecendo as ferramentas analíticas, numéricas e experimentais. (Brasil *et al*, 2015).

A Figura 30 mostra de maneira sintetizada a configuração de técnicas de modelagem de problemas reais.

Figura 30 – Esquema de técnicas de modelagens reais



Fonte: Adaptado de Brasil *et al*, p. 15, 2015

Segundo Almeida (2019), a modelagem paramétrica é uma ferramenta de trabalho computacional que ajuda no desenvolvimento de projetos por meio de análises estáticas, dinâmicas, térmicas, acústicas, magnéticas de fluido, entre outras. Normalmente essas modelagens têm como princípio básico o MEF.

Estudos utilizando ferramentas computacionais para auxílio no desenvolvimento dos parâmetros de cálculo e propriedades dos materiais têm sido cada vez mais frequentes na engenharia.

Martins (2016) avaliou, para elementos de Madeira Laminada Colada (MLC), a resistência ao fogo considerando a influência das espécies de madeira, bem como sua densidade e o efeito dos tratamentos preservantes. Para esse estudo, a autora realizou um programa experimental, em que as dimensões eram 3m x 4m x 1,5m, que foram testadas em um forno horizontal, no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, enquanto o modelo numérico foi realizado através do software ABAQUS.

Para a análise, foram consideradas a deflexão no meio do vão e a distribuição da temperatura ao longo da profundidade do elemento em relação à seção transversal. Os resultados obtidos, numericamente, foram comparados aos resultados experimentais, e ainda foram comparados os métodos de cálculo das seções em situações de incêndio com os métodos aplicados pelas regulamentações internacionais, com a finalidade de validar os resultados. Constatou-se a importância

e a necessidade de uma regulamentação nacional de taxa de carbonização a ser aplicada às espécies nacionais. Caso contrário, há risco à segurança contra incêndio.

O estudo de aplicação de compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro – GRFP – em ligações cavilhadas de CLT foi desenvolvido por Almeida em 2019, com o intuito de analisar a eficiência desse material, em relação ao desempenho estrutural, frente a ligações parafusadas e pregadas. Para alcançar o objetivo, foi proposto que o estudo se desenvolvesse em etapas, sendo uma delas a modelagem paramétrica, com a utilização do método dos elementos finitos. Para essa etapa utilizou-se o software ANSYS e ensaios laboratoriais.

A partir dos resultados obtidos nas análises, constatou-se que o desempenho das ligações cavilhadas com GRFP foi superior ao apresentado pelos parafusos e pregos, quando se tratou de ligações *half-lap*. No entanto, quando se tratou de ligações de extremidade, a inclinação dos elementos de ligação foi prejudicada em virtude da angulação, fazendo com que a resistência das cavilhas fosse inferior à dos parafusos e pregos.

Mendes (2020) realizou estudos do comportamento estrutural de painéis de *Cross-laminated Timber* (CLT) sob cargas perpendiculares ao seu plano. Para esse estudo, o autor considerou o comportamento estrutural de placas uni e biaxial em regime elástico. Foi utilizado o método numérico por meio do software ANSYS.

Ainda nesse estudo, buscou-se avaliar o comportamento do carregamento de compressão perpendicular ao plano aplicado em parede-laje-coluna. Para tanto, foram utilizados os critérios estabelecidos pela norma EN 16351 (2015). Todavia, por último foi pesquisado o critério de falha anisotrópico descrito por Tsai-Wu (1971) e comparado aos ensaios experimentais.

Como resultado, foi constatado que para as análises à flexão em elementos finitos de casca é recomendado empregar uma relação de esbeltez mínima de 15 e desejável de 20. Para a compressão, foi verificada uma semelhança entre os métodos analítico exato e o simplificado, o que também ocorreu quando comparado aos ensaios experimentais sobre o critério de escoamento de Hill. Finalmente, o critério de falha foi considerado útil para a unidade estrutural entre as camadas de CLT quando submetidos a diversos tipos de carregamento.

Gomes (2022) analisou, por meio de simulação termomecânica, ligações de aço-madeira submetidas a ações de tração e exposição ao fogo. Seu estudo compreendeu a análise de três tipos de ligação entre peças metálicas e madeira com

cavilhas metálicas, sendo uma ligação totalmente em madeira e pinos e as outras duas com chapas metálicas no interior e no exterior dos elementos de madeira. (Figura 31)



Na realização de sua pesquisa, Gomes (2022) fez uso das simulações numéricas para determinar o campo de tensões de origem térmicas e mecânicas. Primeiramente, foram calculadas as temperaturas através do módulo de transiente térmico do programa *Ansys*, o qual estipula, através de um determinado instante de tempo, a ação do fogo na estrutura e como ela se desempenha. Em seguida, com essa carga térmica e com a carga de tração aplicada nos elementos, foi possível apontar a máxima resistência mecânica nas ligações. Com isso, Gomes (2022) concluiu que a influência da massa volumétrica da madeira e a resistência das ligações quando expostas à ação do fogo diminuem sua capacidade resistente.

Palma *et al* (2019) realizaram a modelagem da resistência ao fogo de conexões cavilhadas entre peças de aço-madeira pilar e viga, para cargas perpendiculares às fibras da madeira. Para tanto, eles fizeram uso da combinação de transferência de calor por método dos elementos finitos e atribuíram modelos de carga do tipo Johansen.

O estudo de Palma *et al* (2019) teve como base um estudo paramétrico já testado experimentalmente. Entretanto, a análise numérica viria para comprovar os dados encontrados anteriormente. (Figura 32)

Figura 32 – Modelo experimental após o teste ao fogo



Fonte: Palma et al, p.57, 2019

A comparação dos resultados demonstrou que as transferências de calor forneceram uma boa estimativa medida no modelo, bem como a capacidade de carga

atribuída. O parâmetro estabelecido entre a razão da força pela resistência ao fogo ( $E_{fi}/R_{20} \approx 0,3$ ) foi capaz de prever o modo de falha das cavilhas e também a capacidade de carga esperada. As simulações demonstraram que a espessura da viga influencia na resistência ao fogo das ligações. Entretanto, a influência dos espaçamentos entre os pinos não foi esclarecida, pois dependem do diâmetro dos pinos utilizados. Os autores perceberam que, nos casos em que foram utilizados diâmetros menores, as peças obtiveram resultados melhores de resistência ao fogo quando aplicadas menores temperaturas ou quando usadas vigas mais finas. Todavia, tais soluções comprometem a capacidade de carga a temperaturas normais.

Outros trabalhos relevantes foram realizados empregando os métodos numéricos para auxiliar na determinação dos resultados, como pode ser visto no Quadro 2.

| Quadro 2 – Trabalhos utilizando o emprego de métodos numéricos |   |  |
|--|---|--|
| <b>Autores</b>   | <b>Título</b>   | <b>Enfoque</b>   |
| Bañó et al (2016)  | <i>Experimental and numerical evaluation of Cross-Laminated Timber (CLT) panels produced with pine timber from thinnings in Uruguay</i> | Avaliar as propriedades das madeiras de manejo florestal empregadas no Uruguai, para determinação da condição de uso de painéis CLT para aplicação em piso. Para tanto, foram realizados ensaios experimentais com ênfase na classe de resistência, bem como verificação dos resultados através de análise numérica. |
| Franzoni et al (2016)  | <i>Bending behavior of regularly spaced CLT panels</i>  | Analisar, por meio de uma abordagem numérica através de modelagem em elementos finitos, os efeitos dos vazios em placas de painéis CLT mais leves, considerando uma abordagem simplificada, que prevê a flexão, porém não a rigidez ao cisalhamento dos painéis.   |
| He, Sun e Li (2018)  | <i>Bending and compressive properties of cross-laminated timber (CLT) panels made from Canadian hemlock</i>                             | Investigar as propriedades de flexão e compressão fora do plano da Cicutá Canadense. No estudo, foram consideradas as análises experimentais e numéricas para prever a rigidez, a flexão e a capacidade da carga final de resistência.   |
| Hassanieh et al (2017)   | <i>Modelling of steel-timber composite connections: Validation of finite element model and parametric study</i>                         | Investigar o comportamento mecânico das ligações mistas aço-madeira por meio do método dos elementos finitos. Os modelos desenvolvidos foram criados para capturar o critério de falha baseado na mecânica do dano contínuo, para prever o comportamento não linear e o critério de falha da madeira.                |
| Fonte: A autora, 2022  |   |  |

O quadro 2 traz como enfoque a importância dos estudos numéricos. Muitas dessas pesquisas combinaram estudos numéricos com experimentais. Todavia,

quando não existe a possibilidade de fazer tal junção, os valores das pesquisas são validados por meio das normas e regulamentações sobre os temas.

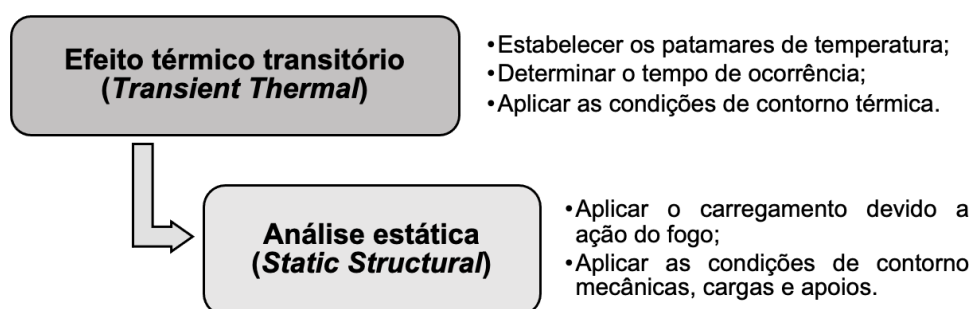
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo optou-se por balisar a pesquisa na literatura sobre a capacidade de desempenho mecânico das estruturas CLT, segundo foi abordado nos capítulos anteriores, mais especificamente nas conexões e seus impactos na estrutura quando submetidas a elevadas temperaturas.

Para isso, foi realizada a modelagem computacional por meio do software Ansys versão 21, que possui como base o método dos elementos finitos.

A Figura 33 sintetiza o mecanismo do processo metodológico utilizado.

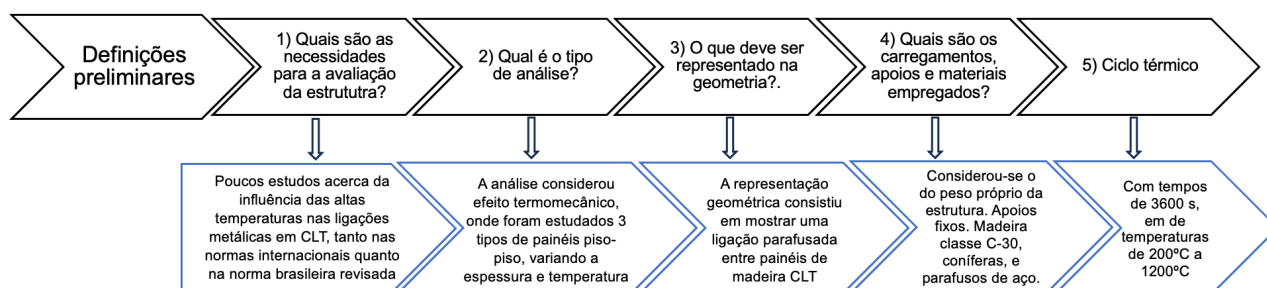
Figura 33 – Etapas do processo adotado



Fonte: a autora, 2023

Antes de iniciar a abordagem das etapas estudadas no processo de simulação, foi necessário responder a alguns quesitos importantes que permitiram desenvolver a pesquisa com base na literaturas. Além disso, foi possível também compreender a necessidade de estudos mais aprofundados sobre o tema, em virtude de uma carência na área de segurança contra incêndio em estruturas CLT (Figura 34).

Figura 34 – Perguntas e respostas direcionadas da pesquisa



Fonte: a autora, 2023

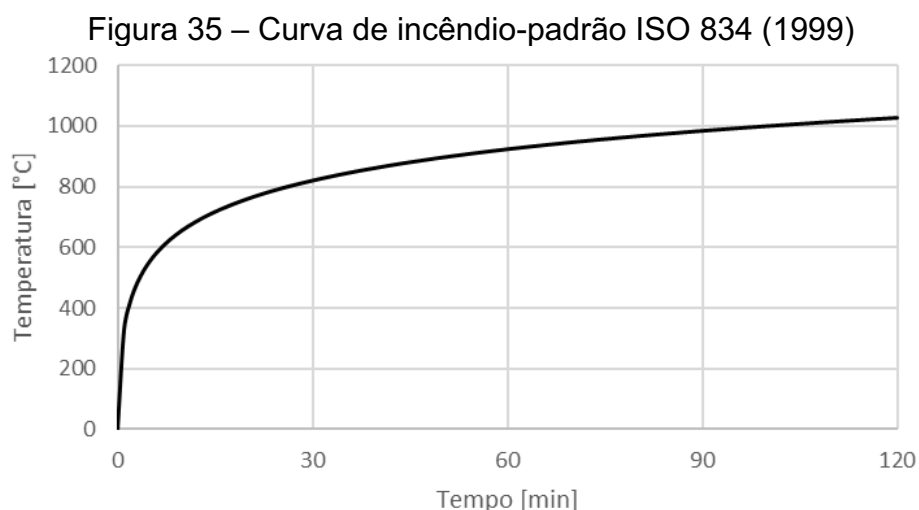
Após essa primeira abordagem e entendimento da importância do estudo, deu-se início à etapa de simulações.

Para a pesquisa foram desenvolvidos testes de simulação computacional, nos quais se tomou por base as especificações técnicas da empresa Amata-Urbem para os painéis, e da empresa Rothoblaas para os parafusos. Os testes seguiram as determinações prescritas nas NBR 7190 (ABNT, 2022), EN 1995-1-2 (2004) e NBR 5628 (ABNT, 2001).

No total, foram realizados dezoito testes simulando painéis de piso-piso. Todavia, em virtude das limitações computacionais, optou-se por fazer uso de dimensões reduzidas, seguindo os princípios de arranjos propostos por Gavric *et al* (2012) e Almeida (2019).

Antes, contudo, de realizar os efeitos das situações de incêndio aplicadas às estruturas, determinou-se por meio do dimensionamento numérico os valores dos esforços devido à flexão, cisalhamento, cálculo dos esforços nas ligações e sua rigidez à temperatura ambiente.

Após a determinação desses esforços, definidos a partir dos cálculos dos painéis em condição de temperatura ambiente para posterior avaliação dos efeitos das altas temperaturas, aplicou-se o que preconiza a NBR 7190 (ABNT, 2022), que considera o modelo de incêndio-padrão, definido pela curva “temperatura x tempo”, também aplicado pela norma ISO 834 (1999). (Figura 35)



Fonte: adaptado de ISO 834, 1999

Os testes de simulação aplicados nos painéis tiveram como objetivo avaliar o comportamento da capacidade resistente nas regiões das ligações, o deslocamento dos parafusos e seu deslizamento horizontal, em virtude dos carregamentos aplicados, e a representação da temperatura ao longo dos painéis.



### 3.1 Descrição dos painéis CLT

Foram considerados como parâmetro para as simulações numéricas os dados fornecidos da Empresa Urbem.

A Urbem é uma empresa brasileira que possui fábrica no Paraná, atuando com alta tecnologia para atender à demanda de materiais e produtos em âmbito nacional. A matéria prima empregada é a madeira da espécie *Pinus taeda*, uma espécie de conífera. (Urbem, 2022).

Sua produção é realizada a partir de camadas de lamelas coladas transversalmente, submetidas a alta pressão por meio de prensa hidráulica, resultando na confecção de painéis de alto desempenho mecânico. Todos os produtos passam por rigoroso processo de inspeção. A madeira considerada é aquela que apresenta um teor de umidade de 12% (+/- 2). Toda a matéria prima empregada na confecção do material é oriunda de florestas de manejo sustentáveis, é certificada pela FSC® e cumpre com todas as determinações regulamentares e normas florestais. (Urbem, 2022).

A Figura 36 ilustra as etapas do processo produtivo dos painéis CLT, desde a floresta plantada até a entrega e montagem em obras.



Fonte: Urbem, 2022

A Tabela 11 e a Tabela 12 mostram as dimensões máximas e larguras de faturamento, bem como os detalhes técnicos para o uso comercial dos painéis CLT.

Tabela 11 – Dimensões máximas e larguras de faturamento

|                    |   |
|--------------------|---|
| <b>Comprimento</b> | até 15 m  |
| <b>Largura</b>     | 10 a 30 cm (incremento a cada 5 cm)   |
| <b>Altura</b>      | até 120 cm (incremento a cada 4 cm) *em casos especiais podem chegar até 150 cm |

Fonte: adaptado da Urbem, 2022

Tabela 12 – Detalhes técnicos

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| <b>Nome do produto</b>        | X-Amata Painel  |
| <b>Outros nomes</b>           | <i>Cross-Laminated Timber (CLT)</i>   |
| <b>Aplicação</b>              | Elementos estruturais de paredes, lajes e coberturas  |
| <b>Categoria de uso</b>       | 1, 2 e 3 de acordo com a ABNT NBR 16143   |
| <b>Tratamento preservante</b> | CCA em autoclave  |
| <b>Espécie da madeira</b>     | Pinus ssp.  |
| <b>Montagem do Painel</b>     | 3, 5 e 7 camadas e pedidos especiais  |
| <b>Lamelas</b>                | Espessura de 20, 30 e 40 mm, secas e estufa a 12% de umidade, classificadas e unidas por <i>finger joint</i>                      |
| <b>Classe de Resistência</b>  | Classe C24 de acordo com a NBR 7190, máximo permitido 10% de C16  |
| <b>Adesivo</b>                | Adesivo poliuretano (PUR) livre de formaldeído, resistente ao fogo, aprovado para uso estrutural em ambientes internos e externos |
| <b>Pressão da laminação</b>   | Ao menos 0,8 N/mm <sup>2</sup>  |
| <b>Teor de umidade</b>        | 12% (+/-2%) na entrega  |
| <b>Dimensões máximas</b>      | Comprimento de 12000 mm, largura 3000 mm, espessura 280 mm  |
| <b>Largura disponível</b>     | 2,4 / 2,6 / 2,8 / 3,0 m   |
| <b>Qualidade superficial</b>  | Qualidade não-visual (QNV), Qualidade visual industrial (QVI)<br>Superfície aplainada. Acabamentos especiais sob consulta         |
| <b>Densidade</b>              | 450 – 650 kgf/m <sup>3</sup>  |
| <b>Estanqueidade</b>          | Os painéis Urbem são herméticos   |
| <b>Reação ao fogo</b>         | Classe IV-A, de acordo com IT-10 CB   |
| <b>Resistência ao fogo</b>    | Em função das dimensões dos painéis   |

Fonte: adaptado de Urbem, 2022

Optou-se pelas composições de painéis da Urbem em virtude de suas características dimensionais, pois atendem à proposta desta pesquisa, qual seja, analisar 3 (três) painéis com variação de espessura, sendo de 3, 5 e 7 camadas. (Figura 37)

Considerando que a empresa se baseia no que prediz a norma brasileira NBR 7190 (2022), foram empregadas na pesquisa as propriedades e classe de resistências da madeira apresentadas na Tabela 13.

Figura 37 – Proposta de painéis

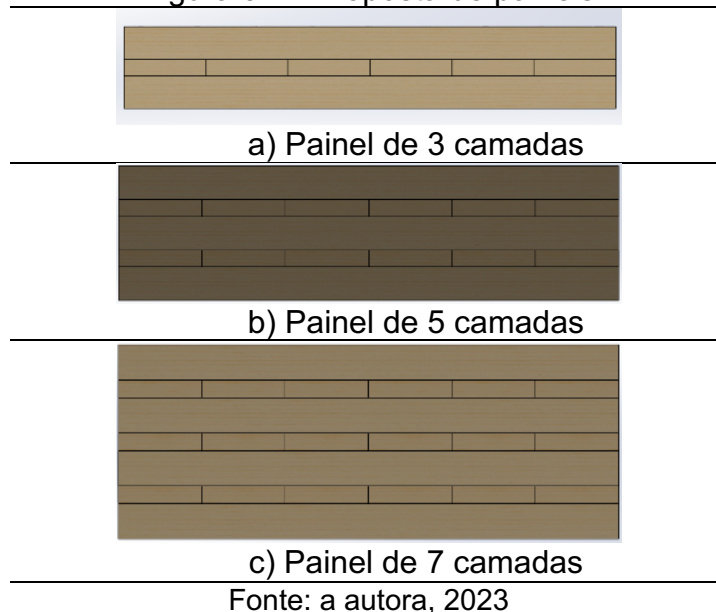


Tabela 13 – Propriedades da madeira

| <b>Coníferas</b>                         |              |     |
|--|--------------|-----|
| Classe da madeira                        | C-30         |     |
| <b>Propriedade de resistência (MPa)</b>  |              |     |
| Flexão                                   | $f_{b,k}$    | 30  |
| Tração paralela                          | $f_{t,0,k}$  | 18  |
| Tração perpendicular                     | $f_{t,90,k}$ | 0,4 |
| Compressão paralela                      | $f_{c,0,k}$  | 23  |
| Compressão perpendicular                 | $f_{c,90,k}$ | 2,8 |
| Cisalhamento                             | $f_{v,k}$    | 4,0 |
| <b>Propriedade de rigidez (GPa)</b>      |              |     |
| Módulo de elasticidade 0° médio          | $E_{0,m}$    | 12  |
| Módulo de elasticidade 0° característico | $E_{0,05}$   | 7,7 |
| Módulo de elasticidade a 90° médio       | $E_{90,m}$   | 0,4 |
| Módulo de elasticidade transversal médio | $G_m$        | 0,8 |
| <b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>      |              |     |
| Densidade característica                 | $\rho_k$     | 380 |
| Densidade média                          | $\rho_m$     | 460 |

Fonte: adaptado de NBR 7190, 2022

As espessuras variaram em virtude do número de camadas dos painéis, considerando os parâmetros dimensionais de largura e comprimento aplicados, os

quais foram citados anteriormente e também são apresentados na Tabela 14. Para as peças longitudinais e transversais, foram especificadas espessuras de 4 cm e 2 cm, respectivamente.

Tabela 14 – Dimensões dos painéis

| Largura (cm) | Comprimento (cm) | Espessura (cm) |
|--------------|------------------|----------------|
| 40           | 60               | VAR            |

Fonte: a autora, 2023

Após definidas as configurações dos painéis, passou-se a realizar a confecção dos modelos no sistema computacional. Para a criação dos modelos foram consideradas duas etapas. A primeira foi utilizar o software *SolidWorks* (na função criar e montar) para criar as peças, tanto os painéis quanto os parafusos. A segunda etapa foi gerar a simulação no software *Ansys*. Ainda na segunda etapa foi determinado o tipo de vinculação adotada, qual seja, a bi-engastada (maiores detalhes em 3.3.1).

### 3.2 Dimensionamento dos painéis à flexão.

Antes de inserir os parâmetros para a modelagem computacional, efetuaram-se os cálculos dos esforços de rigidez dos elementos em CLT e das ligações, para verificação em temperaturas ambientes e em elevadas temperaturas.

Foi atribuída para o cálculo uma situação de painéis de piso-piso com vinculação bi-engastada, unidos por parafusos, sendo considerada a laje de uma edificação residencial, com classes de carregamento de longa duração, classe 2 de umidade e situação normal de uso.

A norma NBR 7190 (ABNT, 2022) estabelece que, para painéis de MLCC, a verificação dos Estados Limites Últimos (ELU) deve ser feita com o valor de seção transversal líquida, sem considerar o efeito das deformações por cisalhamento. Normalmente, a direção do carregamento se manifesta predominantemente distribuída, e assim o painel pode ser calculado como uma viga.

Adotou-se então para os painéis carregamento uniformemente distribuído ao longo de sua superfície, como o peso próprio da estrutura, uma carga permanente e uma carga acidetal.

A NBR 7190 (ABNT, 2022) especifica que, para os Estados Limites de Serviços (ELS), a deformação por cisalhamento deve considerar a seção transversal efetiva,

como os determinados por peças compostas, considerando a adaptação do valor  $\gamma$ . Ela ainda prediz que, em casos de cargas perpendiculares ao plano do painel, para o estado limite de utilização é necessário realizar o cálculo por meio da seção transversal líquida.

Para o dimensionamento das ligações, seguiu-se o determinado na norma, como é visto nas seções seguintes. Como se trata de uma estrutura submetida a esforços de flexão composta por lamelas coladas, foi necessária a determinação da rigidez da ligação, ou seja, o efeito de deslizamento provocado por esses esforços.

Para a determinação dos esforços, foram adotados os seguintes dados de projeto. (Tabela 15)

Tabela 15 – Dados dos painéis para o cálculo

| <b>Painel 1 - 3 camadas</b> |                       |                                   |                                  |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| <b>Camadas</b>              | <b>Espessura (cm)</b> | <b><math>E_{0,m}</math> (MPa)</b> | <b><math>G_{90}</math> (MPa)</b> |
| L1                          | 4                     | 12000                             | 0                                |
| T1                          | 2                     | 0                                 | 800                              |
| L2                          | 4                     | 12000                             | 0                                |
| <b>Painel 2 - 5 camadas</b> |                       |                                   |                                  |
| <b>Camadas</b>              | <b>Espessura (cm)</b> | <b><math>E_{0,m}</math> (MPa)</b> | <b><math>G_{90}</math> (MPa)</b> |
| L1                          | 4                     | 12000                             | 0                                |
| T1                          | 2                     | 0                                 | 800                              |
| L2                          | 4                     | 12000                             | 0                                |
| T2                          | 2                     | 0                                 | 800                              |
| L3                          | 4                     | 12000                             | 0                                |
| <b>Painel 3 - 7 camadas</b> |                       |                                   |                                  |
| <b>Camadas</b>              | <b>Espessura (cm)</b> | <b><math>E_{0,m}</math> (MPa)</b> | <b><math>G_{90}</math> (MPa)</b> |
| L1                          | 4                     | 12000                             | 0                                |
| T1                          | 2                     | 0                                 | 800                              |
| L2                          | 4                     | 12000                             | 0                                |
| T2                          | 2                     | 0                                 | 800                              |
| L3                          | 4                     | 12000                             | 0                                |
| T3                          | 2                     | 0                                 | 800                              |
| L4                          | 4                     | 12000                             | 0                                |

Sendo:  
L para as camadas longitudinais;  
T para a camadas transversais

Fonte: a autora, 2023

Ações de carregamento e coeficiente de ponderações (Tabela 16)

Tabela 16 – Valores do carregamento e coeficientes de ponderação

|  |                       |
|--|-----------------------|
| <b>Carga permanente (kN/m<sup>2</sup>)</b>           | $g_{k} = 1,5$         |
| <b>Carga acidental (kN/m<sup>2</sup>)</b>            | $q_{k} = 2,5$         |
| <b>Peso específico da madeira (kN/m<sup>3</sup>)</b> | $\gamma_{mad.} = 4,5$ |
| <b>Coeficiente de tensões normais</b>                | $\gamma = 1,4$        |
| <b>Coeficiente de tensões de cisalhamento</b>        | $\gamma = 1,8$        |
| <b>Coeficiente de modificação 1</b>                  | $K_{mod,1} = 0,7$     |
| <b>Coeficiente de modificação 2</b>                  | $K_{mod,2} = 0,9$     |

Fonte: a autora, 2023

Com os dados de projeto definidos, passou-se aos cálculos dos painéis e ligações em temperaturas ambiente e elevadas. Para as temperaturas elevadas, foram adotados patamares de temperatura entre 200°C, 400°C, 600°C, 800°C, 1000°C e 1200°C, nos tempos determinados de 15, 30, 45 e 60 minutos.

### 3.2.1 Temperatura ambiente

Conforme já mencionado anteriormente, os cálculos seguiram as determinações das NBR 7190 (ABNT, 2022). Essa norma enfatiza que a avaliação de resistência ao fogo das estruturas de madeira é baseada no conceito da diminuição da seção transversal, em virtude das propriedades mecânicas e da ação térmica.

Para o ELU, a relação de tensão normal devido à flexão ( $\sigma_{M,d}$ ) não deve exceder a resistência à flexão ( $f_{b,d}$ ), conforme Equação 11

$$f_{b,d} \geq \sigma_{M,d} \quad \text{Equação 11}$$

Dessa maneira, foi necessário fazer a verificação dos esforços mediante os critérios estabelecidos nas seções 3.1 e 3.2.

A resistência à flexão do painel foi calculada de acordo com a seguinte Equação 12.

$$f_{b,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{b,k}}{\gamma_w} \quad \text{Equação 12}$$

Sendo  $k_{mod}$  um fator de modificação em função da classe de carregamento e da classe de umidade, e  $f_{b,k}$  o valor característico de resistência à flexão da madeira.

Para a determinação da tensão normal à flexão foi utilizada a Equação 13

$$\sigma_{M,d} = \frac{E_i}{E_c} \cdot \frac{M_{y,d}}{W_{0,liq}} \quad \text{Equação 13}$$

Onde  $E_i$  é o módulo de elasticidade longitudinal da camada  $i$ ;  $E_c$  é o módulo de elasticidade de referência;  $M_{y,d}$  é o momento fletor e  $W_{0,liq}$  é o módulo resistente à flexão líquido determinado de acordo com a Equação 14

$$w_{0,liq} = \frac{I_{0,liq}}{\max.\{|Z_{sup}|; |Z_{inf}|\}} \quad \text{Equação 14}$$

Em que  $I_{0,liq}$  é o momento de inércia líquido;  $Z_{sup}$  e  $Z_{inf}$  são as distâncias superior e inferior da borda da primeira e da última camada de lamela, respectivamente, até o centro de gravidade do painel.

Para a determinação dos esforços de cisalhamento, fez-se uso da seguinte Equação 15:

$$\tau_d = \frac{V_d \cdot S}{b \cdot I_{0,liq}} \quad \text{Equação 15}$$

Onde o  $V_d$  é o valor da força cortante,  $S$  é o momento estático do painel,  $b$  é a largura do painel e  $I_{0,liq}$  é o momento de inércia.

Na determinação das ligações em temperatura ambiente também foi seguido o que determina a NBR 7190 (ABNT, 2022), em sua seção 7.1.2 – Critério de dimensionamento, que estabelece a seguinte relação de segurança. (Equação 16)

$$R_{d,lig} \geq S_{d,lig} \quad \text{Equação 16}$$

Onde  $R_{d,lig}$  é o valor de cálculo da resistência da ligação e  $S_{d,lig}$  é o valor de cálculo das solicitações nela atuantes. O valor de cálculo pode ser determinado a partir do valor da resistência característica da ligação, conforme Equação 17:

$$R_{d,lig} = k_{mod} \cdot \frac{R_{v,k}}{\gamma_{lig}} \quad \text{Equação 17}$$

Os valores de  $k_{mod}$  são os mesmo definidos para a tensão normal, e o coeficiente de minoração das propriedades de ligação é definido como sendo 1,4, conforme prescreve a norma brasileira em sua seção 7.1.2 – Critério de dimensionamento.

Com o intuito de realizar as ligações entre os elementos dos painéis CLT, levou-se em conta o que prediz a NBR 7190-1 (ABNT, 2022), na seção 7.1.9, alíneas b) e c), que menciona as características dos elementos de ligação, os quais devem atender às seguintes dimensões e resistências mínimas: (NBR 7190-1, 2022)

- b) os parafusos estruturais passantes com porca e arruela com cabeça sextavada devem ser de diâmetro nominal  $d$  mínimo de 9,5 mm, serem feitos de aço com baixo teor de carbono atendendo as especificações da ASTM A307, ASTM A 325, ASTM A 490, ou ISO 898-1. As porcas e arruelas devem ser feitas de aço com baixo teor de carbono e resistência característica de escoamento  $f_{y,k}$  de pelo menos 250 MPa. As arruelas devem ser utilizadas em ambos os lados do parafuso;
- c) os parafusos de rosca soberba devem ser de diâmetro nominal  $d$  mínimo de 9,5 mm, e devem ser feitos de aço com baixo teor de carbono, atendendo a resistência mínima característica de escoamento  $f_{y,k}$  de pelo menos 250 MPa.

Nos cálculos do espaçamento entre os elementos, levaram-se em conta as prescrições normativas da NBR 7190-1 (ABNT, 2022). Essa norma recomenda que os espaçamentos e distâncias mínimas em ligações com pinos metálicos (pregos com pré-furação, parafusos passantes com porcas e arruelas, parafusos de rosca soberba, parafusos ajustados e pinos lisos) e anéis metálicos devem seguir o proposto na Tabela 17.



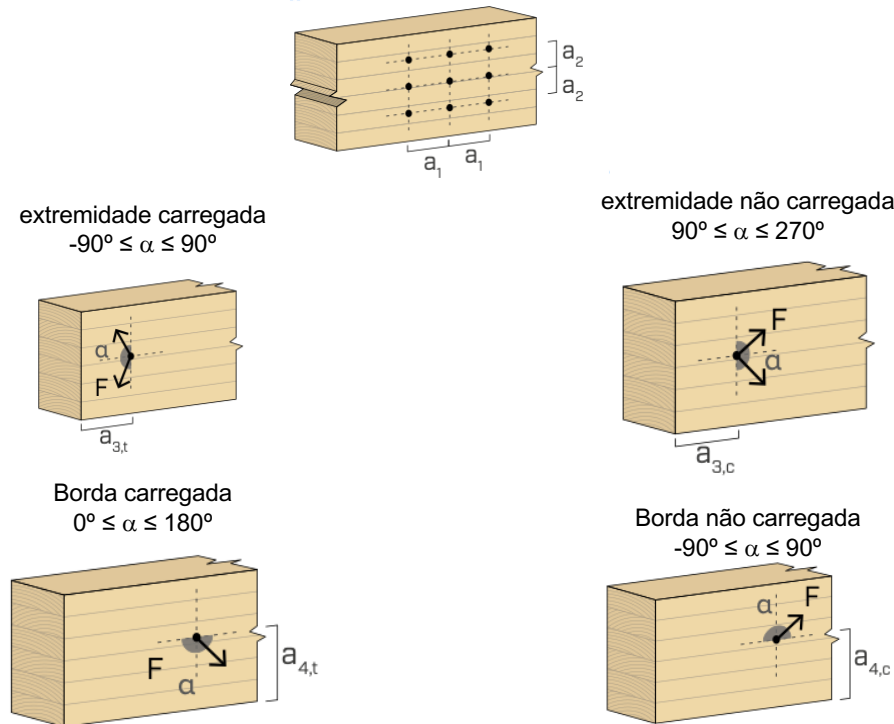
Tabela 17 – Espaços e distâncias mínimas para ligações com pinos metálicos

| Espaço ou distância                               | Ângulo $\alpha$                        | Pregos com pré-furação | Parafusos passantes, parafusos de rosca soberba e parafusos ajustados | Pinos lisos                                   |
|---|--|------------------------|---|---|
| Espaço $a_1$ (paralelo às fibras)                 | $0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$   | $(4+3 \cos \alpha ) d$ | $(4+3 \cos \alpha ) d$  | $(3+3 \cos \alpha ) d$                        |
| Espaço $a_2$ (perpendicular às fibras)            | $0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$   | $(3+6 \sin \alpha ) d$ | 4 d   | 3 d   |
| Distância $a_{3,t}$ (extremidade carregada)       | $-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$  | $(7+5 \cos \alpha ) d$ | Maior entre 7 d e 80 mm   | Maior entre 7 d e 80 mm                       |
| Distância $a_{3,c}$ (extremidade não carregada)   | $90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$  | 7 d                    | $(1+6 \sin \alpha) d$   | Maior entre $[(a_{3,t}  \sin \alpha ) d]$ e d |
|   | $150^\circ \leq \alpha \leq 210^\circ$ | 7 d                    | 4 d   | 3 d   |
|   | $210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$ | 7 d                    | $(1+6 \sin \alpha) d$   | Maior entre $[(a_{3,t}  \sin \alpha ) d]$ e d |
| Distância $a_{4,t}$ (borda lateral carregada)     | $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$   | Para $d < 5$ mm        | Maior entre $(2+2 \sin \alpha) d$ e 3 d                               | Maior entre $(2+2 \sin \alpha) d$ e 3 d       |
|   |  | Para $d > 5$ mm        | $(3+4 \cos \alpha ) d$  | 3 d   |
| Distância $a_{4,c}$ (borda lateral não carregada) | $180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$ | 3 d                    | 3 d   | 3 d   |

Fonte: adaptado da NBR 7190-1, 2022

As representações das distâncias e espaçamentos são mostradas na Figura 38.

Figura 38 – Distribuição dos espaçamentos e distâncias entre elementos



Fonte: adaptado da NBR 7190-1, 2022

Neste trabalho foram empregados parafusos do tipo HBS  $\varnothing$  10TX80 espaçados a cada 10 cm ao longo do comprimento do painel.

Com os espaçamentos definidos, foi possível prosseguir com os cálculos. Primeiramente, foram determinadas a resistência ao embutimento e a rigidez da ligação, conforme as Equação 18 e Equação 19

$$f_{e\alpha,k} = \frac{f_{e,0,k}}{k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} - (N/mm^2) \quad \text{Equação 18}$$

$$K_u = \frac{2}{3} \cdot K_{ser} \quad \text{Equação 19}$$

Onde  $f_{e,0,k} = 0,082 \cdot (1 + 0,01d) \cdot \rho_k \rightarrow (N/mm^2)$  e  $k_{90} = 1,35 + 0,015d \rightarrow$  (para madeiras coníferas);  $K_{ser}$  é a rigidez de serviço de uma seção de corte de um pino metálico expresso em N/mm e pode ser determinado por  $K_{ser} = \rho_{med}^{1,5} \frac{d}{23}$

Com os valores dos módulos de deslizamento K, o espaçamento definido e os valores obtidos pelos esforços internos do painel, pode-se determinar o valor de cálculo da força aplicada no conector por meio da Equação 20

$$F_i = \gamma_i \cdot E_i \cdot A_{o,liq} \cdot a_i \cdot s_i \cdot \frac{V}{(EI)_{ef}} \quad \text{Equação 20}$$

Sendo  $\gamma_i$  o fator de redução da inércia das camadas longitudinais, determinado por meio da Equação 21

$$\gamma_i = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot A_{o,liq} \cdot h_j}{L_{ef}^2 \cdot G_t \cdot b}} \quad \text{Equação 21}$$

Onde  $E_i$  é o módulo de elasticidade,  $A_{o,liq}$  é a área líquida da seção transversal,  $L_{ef}$  é o vão efetivo (que para o caso estudado é igual a  $L_{ef}=0,8L$ ),  $G_t$  é o módulo de elasticidade transversal,  $b$  é a largura do painel e  $h_j$  é a altura da camada  $j$  do painel,  $a_i$  é a distância do centróide,  $s_i$  é o valor do espaçamento,  $V$  é o valor da força cortante de cisalhamento e  $(EI)_{ef}$  é a rigidez efetiva, considerando a rigidez da ligação, a qual é determinada pela Equação 22

$$(EI)_{ef} = \sum E_i \cdot I_{0,liq} + \gamma_i \cdot E_i \cdot A_{0,liq} \cdot a_i^2 \quad \text{Equação 22}$$

Após a determinação da força no conector devido aos esforços internos, determinou-se a força resistente característica da ligação, de acordo com as Equação 23 a Equação 26.

|   |   |            |
|---|---|------------|
| $F_{v,Rk}$ é o < dos valores dentre os resultados | $F_{v,Rk1} = f_{e1,k} t_1 d$  | Equação 23 |
|   | $F_{v,Rk2} = 0,5 f_{e1,k} t_2 d \beta$  | Equação 24 |
|   | $F_{v,Rk3} = 1,05 \frac{f_{e1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,k}}{f_{e1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$ | Equação 25 |
|   | $F_{v,Rk4} = 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,k} f_{e1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$   | Equação 26 |

Onde,

$F_{v,Rk}$  – é a resistência característica de um pino, correspondente a uma dada seção de corte;

$f_{e1,k}$  e  $f_{e2,k}$  – são as resistências ao embutimento dos elementos de madeira 1 e 2, respectivamente;

$t_1$  – é a menor espessura dentre os elementos de madeira laterais em mm;

$t_2$  – é a espessura do elemento de madeira central para os casos em cortes duplos em mm;

$M_{y,k}$  – é o momento resistente do parafuso em N.mm -  $M_{y,k} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6}$

$d$  – é o diâmetro nominal do pino em mm;

$f_{u,k}$  – é a resistência última característica à tração do aço do pino metálico (MPa);

$F_{ax,Rk}$  – contribuição do efeito de confinamento;

$\beta$  - é a razão entre as resistências de embutimento -  $\beta = \frac{f_{e2,k}}{f_{e1,k}}$

O dimensionamento dos painéis à temperatura ambiente estão dispostos no Anexo 1.

### 3.2.2 Elevadas temperaturas

No que tange às elevadas temperaturas, foi visto na seção 2.2 o comportamento das estruturas de madeira, bem como o comportamento das ligações que a NBR 7190 (2022) e a EN 1995-1-2 (2004) estabelecem como critérios.

Para o dimensionamento dos painéis e das ligações em situação de incêndio foram empregadas as ações de segurança estabelecidas pelas equações definidas na seção 2.2.4 sobre os valores encontrados nos cálculos da seção 3.2.1.

Conforme mencionado, para intervalos de tempo de 15 a 60 minutos foram definidos 06 (seis) patamares de temperatura, denominados de T1 a T6, sendo T1=200°C, T2= 400°C, T3= 600°C, T4= 800°C, T5= 1000°C e T6= 1200°C. Obtidos os resultados, foi possível aplicar os valores em modelos computacionais, determinando as variáveis de deslocamento e influência da temperatura nas regiões de ligação. O dimensionamento das altas temperaturas está disposto no Anexo 1.

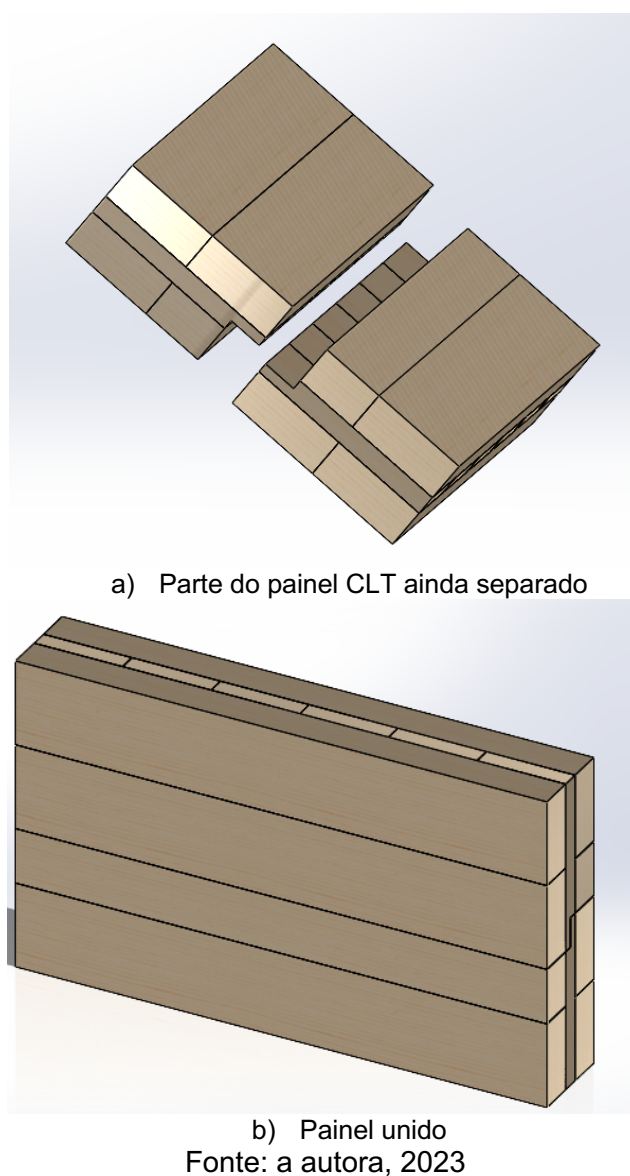
De acordo com a NBR 7190 (ABNT, 2022), não é adequado que os elementos de ligação estejam diretamente expostos ao fogo, ou seja, é necessário que sejam protegidos por elementos de madeira ou por outros elementos de revestimento, como o gesso, por exemplo.

## 3.3 Estruturação da modelagem computacional.

### 3.3.1 Descrição da montagem das peças no *SolidWorks*

A fim de realizar os modelos numéricos, a modelagem foi subdivida em duas fases, sendo a primeira a criação dos elementos a serem utilizados, através do software *SolidWorks*. Nesse software foram elaboradas as camadas de lamelas longitudinais e transversais dos painéis, de forma separada, sendo posteriormente unidas para formar o painel (Figura 39). Para considerar a junção dos elementos, o programa entende que a união das faces sem espaço entre elas denota a convergência dos componentes.

Figura 39 – Confeção do painel CLT com três camadas de lamelas com junção tipo *Half-lap*



Os mesmos procedimentos de criação e montagem foram realizados para os painéis com 5 camadas e 7 camadas, seguindo as especificações de dimensões de 40 x 60 cm, e variando a espessura. As espessuras dos elementos utilizados para a composição seguiram o previsto nas orientações, sendo para as peças longitudinais dimensões de 40 mm e para as peças transversais 20 mm.

Em seguida, ainda no *SolidWorks*, foram criados os parafusos do tipo HBS, parafusos de cabeça de embeber, tomando como referência as especificações do catálogo da Rothoblaas, que segue as diretrizes das normas europeias EN 12512 e EN 14592. Adotou-se esse tipo em virtude de ser o mais recomendado para o uso em

painéis CLT. Ainda em relação aos aspectos característicos do elemento parafuso, ele apresenta elevada resistência à ruptura de tensão do aço ( $f_{u,k} = 1000 \text{ N/mm}^2$ ) e elevada resistência à torção. (Figura 40)

Figura 40 – Parafuso HBS – parafuso de cabeça de embeber (características)

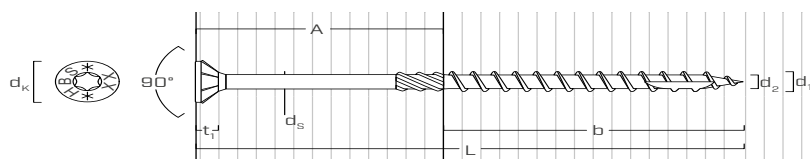


Características:  
 Focus – gama extremamente completa  
 Cabeça – de embeber com nervura sub-cabeça  
 Diâmetro – 3,5 a 12 mm  
 Comprimento – de 30 a 60 mm

Fonte: adaptado de Rothoblaas, 2020

Para a confecção do parafuso foram adotadas as seguintes características geométrica e mecânicas, possibilitando ao programa gerar o elemento e posteriormente adicioná-lo ao painel CLT. (Figura 41 e Tabela 18)

Figura 41 – Característica geométrica



Fonte: Rothoblaas, 2020

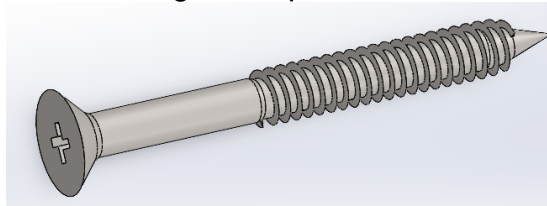
Tabela 18 – Características mecânicas do parafuso

| <b>Diâmetro nominal</b>                            | <b>d1</b>    | <b>mm</b>         | <b>3,5</b> | <b>4</b> | <b>4,5</b> | <b>5</b> | <b>6</b> | <b>8</b> | <b>10</b> | <b>12</b> |
|--|--------------|-------------------|------------|----------|------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| Diâmetro da cabeça                                 | $d_k$        | mm                | 7,00       | 8,00     | 9,00       | 10,00    | 12,00    | 14,50    | 18,25     | 20,75     |
| Diâmetro do núcleo                                 | $d_2$        | mm                | 2,25       | 2,55     | 2,80       | 3,40     | 3,95     | 5,40     | 6,40      | 6,80      |
| Diâmetro da haste                                  | $d_s$        | mm                | 2,45       | 2,75     | 3,15       | 3,65     | 4,40     | 5,80     | 7,00      | 8,00      |
| Espessura da cabeça                                | $t_1$        | mm                | 2,20       | 2,80     | 2,80       | 3,10     | 4,50     | 4,50     | 5,80      | 7,20      |
| Diâmetro do pré-furo                               | $d_v$        | mm                | 2,0        | 2,5      | 2,5        | 3,0      | 4,0      | 5,0      | 6,0       | 7,0       |
| Momento de cedência característico                 | $M_{y,k}$    | Nm                | 2,1        | 3,0      | 4,1        | 5,4      | 9,5      | 20,1     | 35,8      | 48,0      |
| Parâmetro característico de resistência à extração | $f_{ax,k}$   | N/mm <sup>2</sup> | 11,7       | 11,7     | 11,7       | 11,7     | 11,7     | 11,7     | 11,7      | 11,7      |
| Densidade associada                                | $\rho$       | Kg/m <sup>3</sup> | 350        | 350      | 350        | 350      | 350      | 350      | 350       | 350       |
| Parâmetro característico de penetração da cabeça   | $f_{head,k}$ | N/mm <sup>2</sup> | 10,5       | 10,5     | 10,5       | 10,5     | 10,5     | 10,5     | 10,5      | 10,5      |
| Resistência característica à tração                | $f_{ten,k}$  | N/mm <sup>2</sup> | 3,8        | 5,0      | 6,4        | 7,9      | 11,3     | 20,1     | 31,4      | 33,9      |

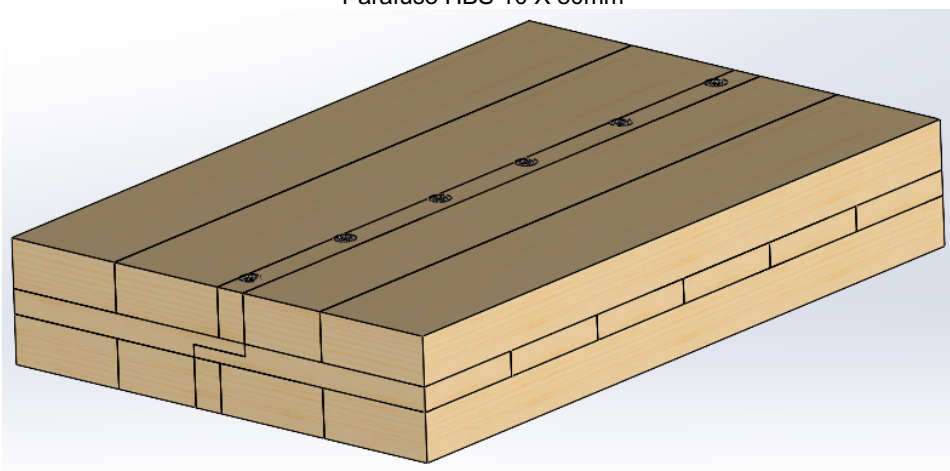
Fonte: adaptado de Rothoblaas, 2020

Com essas especificações dos painéis e dos parafusos, foi possível voltar ao programa *SolidWorks*. Na parte de montagem, os parafusos foram unidos ao painel CLT. As propriedades mecânicas de cada material foram atribuídas seguindo as especificações das empresas de referência. Todo o procedimento descrito foi realizado para os painéis de 5 e 7 camadas, respectivamente (Figura 42, Figura 43, Figura 44).

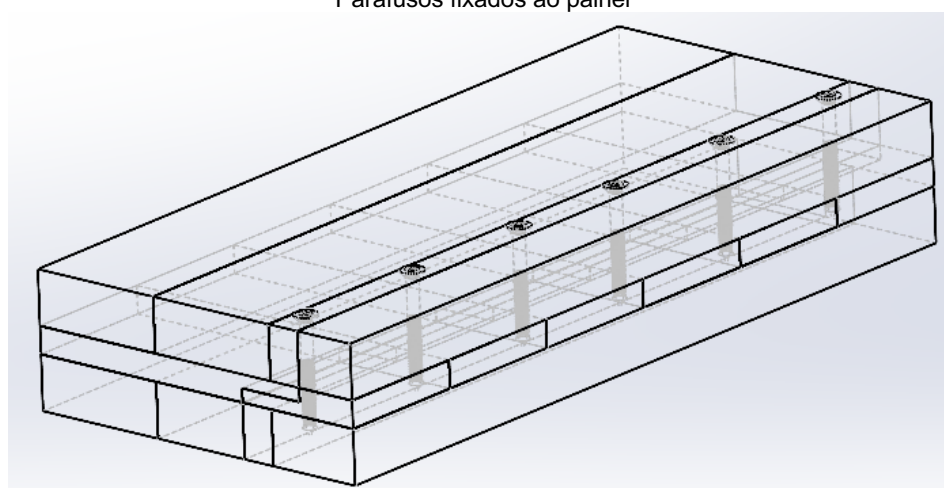
Figura 42 – Montagem do painel CLT de 3 camadas



Parafuso HBS 10 X 80mm



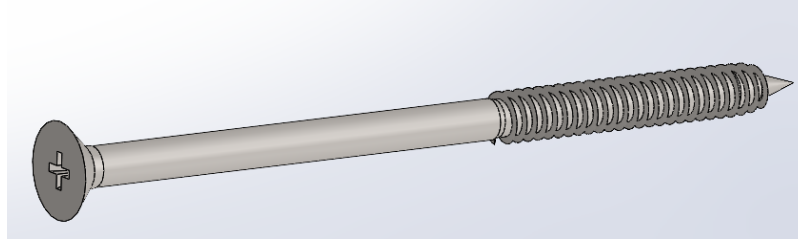
Parafusos fixados ao painel



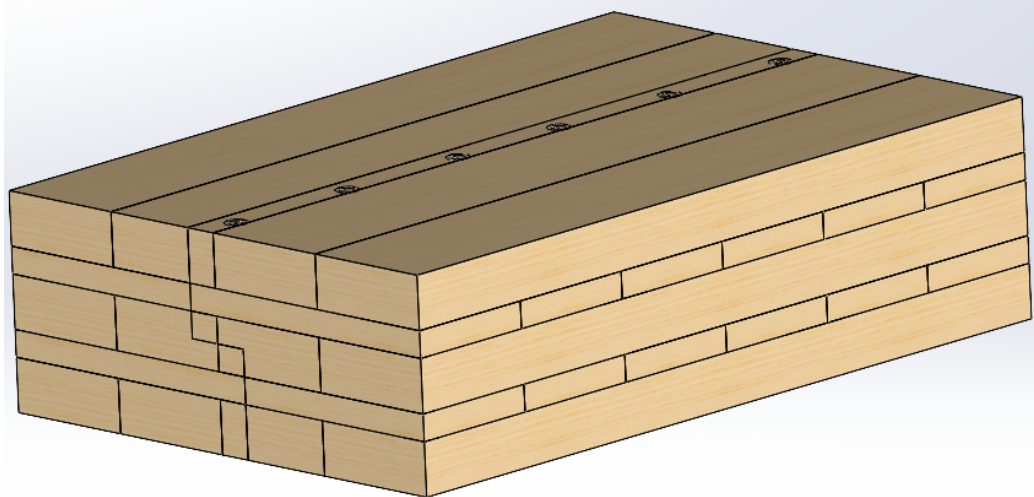
Vista da disposição dos parafusos no painel

Fonte: a autora, 2023

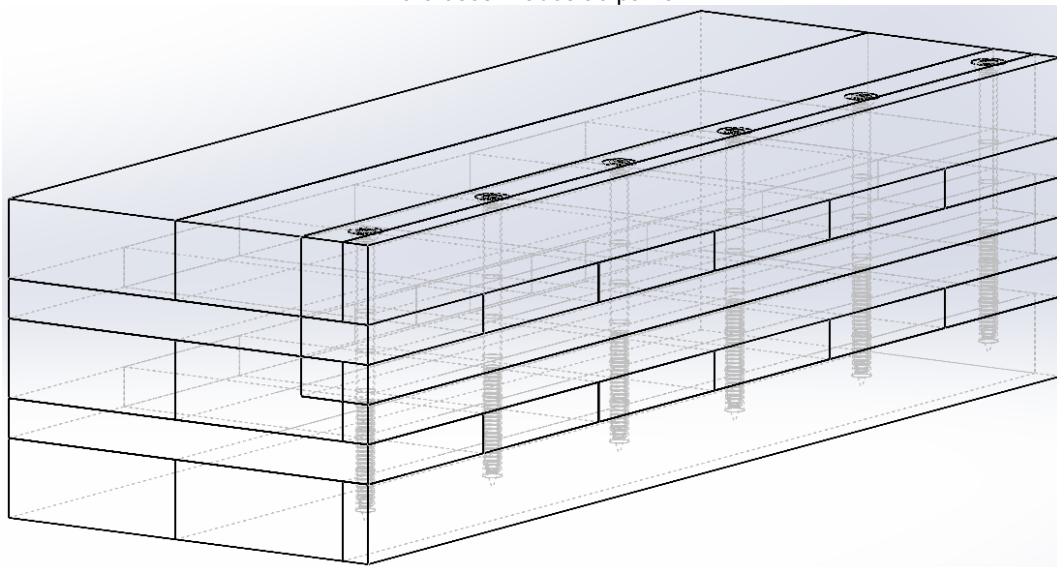
Figura 43– Montagem do painel CLT de 5 camadas



Parafuso HBS 10 X 140mm



Parafusos fixados ao painel

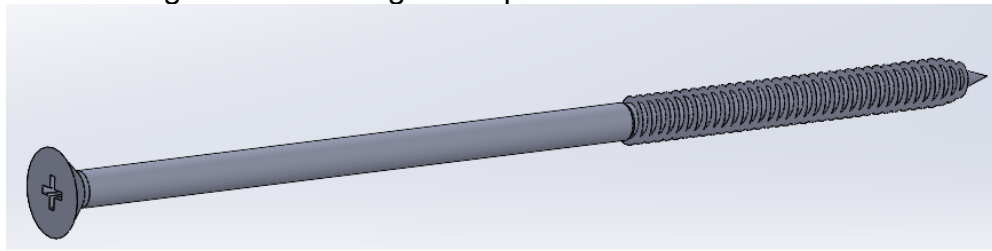


Vista da disposição dos parafusos no painel

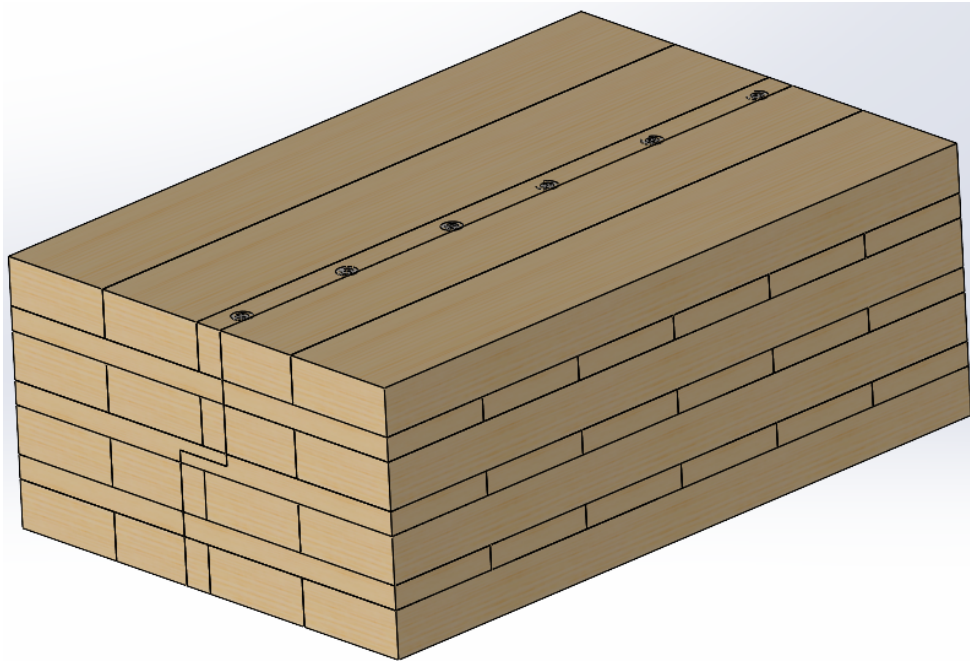
Fonte: a autora, 2023



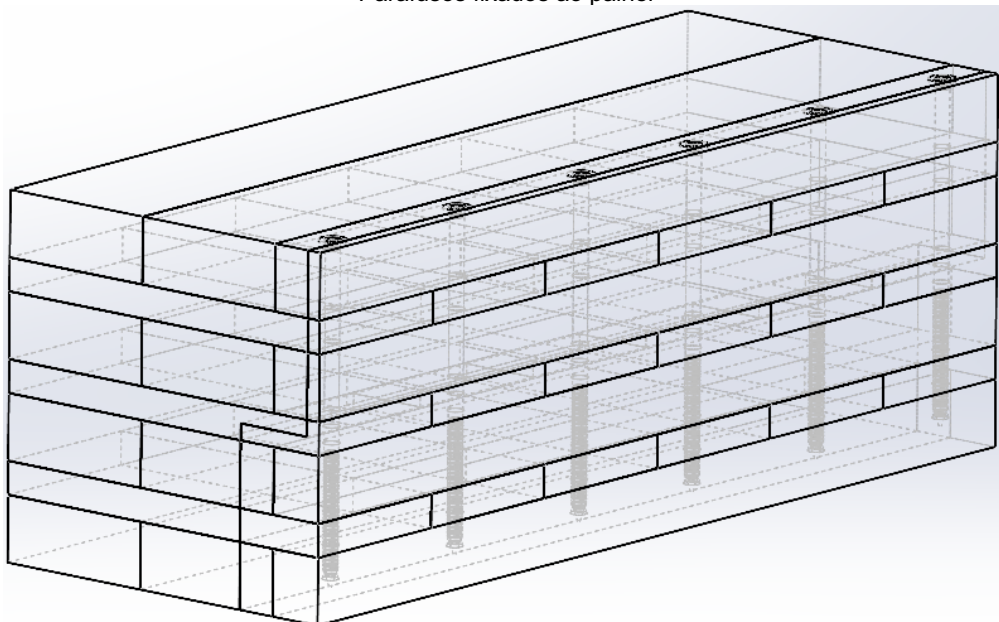
Figura 44– Montagem do painel CLT de 7 camadas



Parafuso HBS 10 X 200mm



Parafusos fixados ao painel

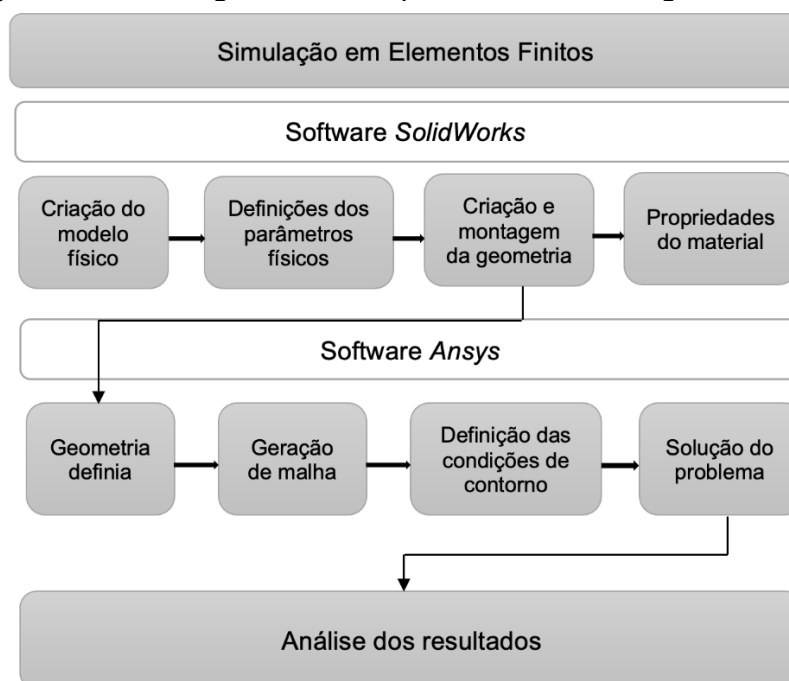
Vista da disposição dos parafusos no painel  
Fonte: a autora, 2023

### 3.3.2 Descrição da modelagem no *Ansys*

Após a criação e montagem das peças, passou-se para a modelagem por meio do programa *Ansys*. Neste trabalho foi usada a versão 2021R2.

A modelagem, para simulação e cálculo em programas que utilizam elementos finitos, compõe-se de alguns passos. Entre eles estão: a definição do modelo físico, parâmetros físicos que definirão as condições de contorno, propriedades mecânicas dos materiais empregados, elaboração da geometria, malha, solução do problema numérico e análise dos resultados. O fluxograma da Figura 45 mostra a sequência da modelagem em softwares que tem como base o Método dos Elementos Finitos (MEF).

Figura 45 – Fluxograma da sequência da modelagem em MEF



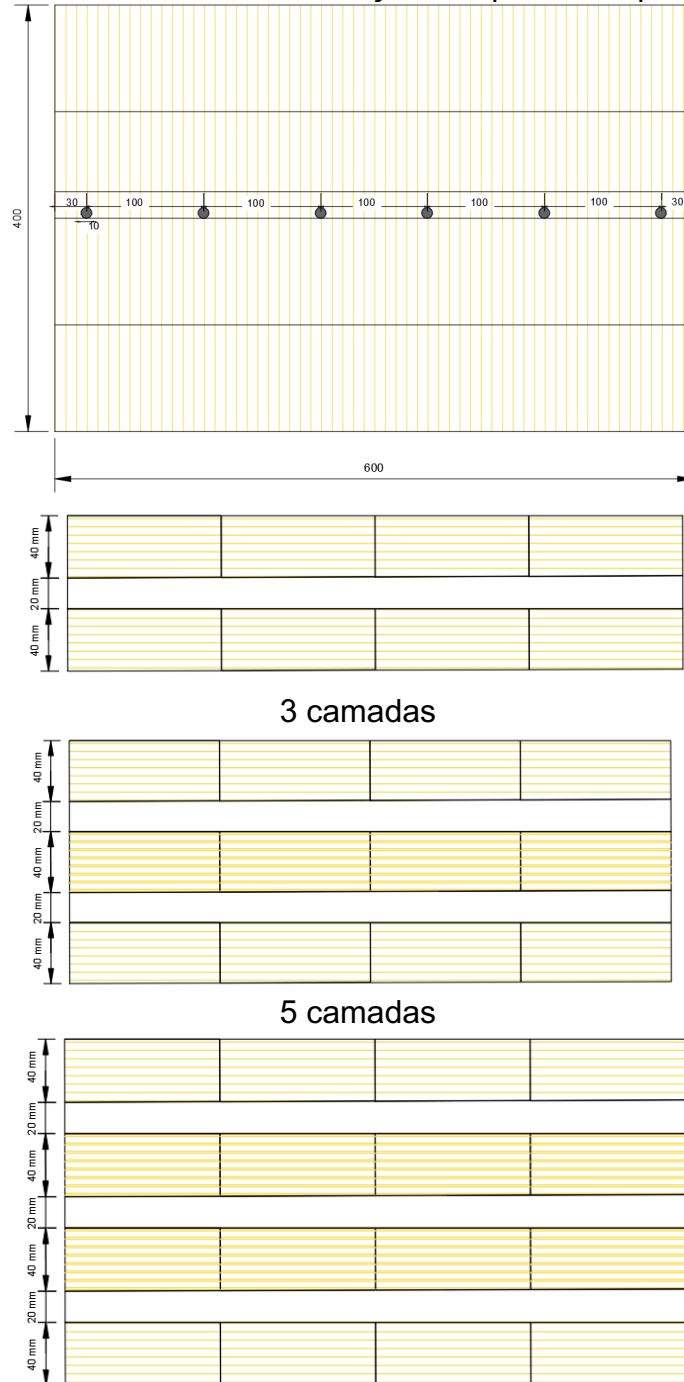
Fonte: autora, 2023

Para o progresso do processo, inicialmente foi empregado o que já pré-existia na biblioteca interna do programa *Ansys*, tanto para a análise térmica quanto para a análise mecânica.

Quanto à geometria empregada, foram utilizados os dados encontrados pelo dimensionamento dos painéis à temperatura ambiente. Como os painéis possuem espessura variável, o carregamento de cada um variou conforme seu peso próprio. Painel 1, painel 2 e painel 3, respectivamente, são os painéis com 3, 5 e 7 camadas, como as seguintes cargas distribuídas  $q_1 = 6,19 \text{ kN/m}^2$ ,  $q_2 = 6,53 \text{ kN/m}^2$  e  $q_3 = 6,86$

kN/m<sup>2</sup>. O diâmetro dos parafusos foi de 10 mm, e o espaçamento entre eles ao longo da placa foi de 10cm. A Figura 46 demonstra as dimensões em mm e a distribuição das ligações nos painéis.

Figura 46 – Dimensões e distribuição dos pinos nos painéis (mm)

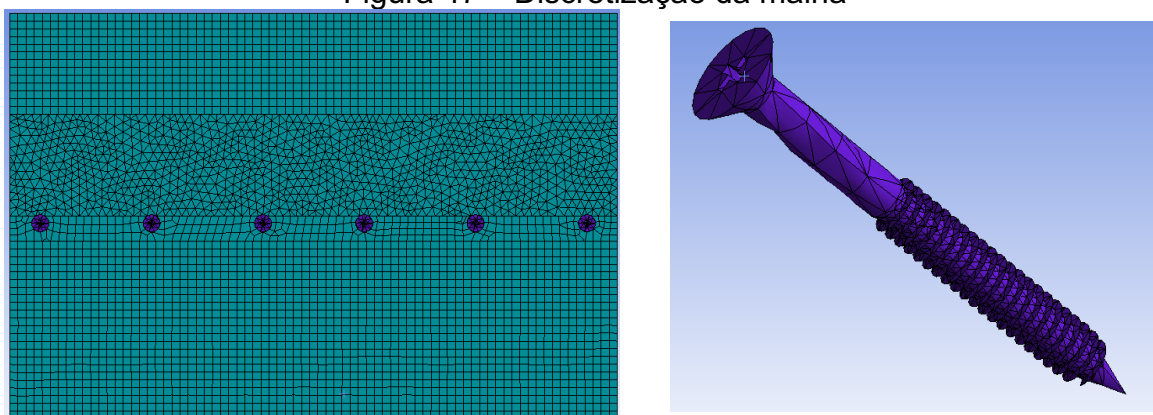


7 camadas  
Fonte: autora, 2023

Foram modelados, para cada uma das três propostas, modelos geométricos tridimensionais, atendendo ao plano geométrico da peça e seus carregamentos. Uma observação quanto ao tamanho dos painéis: fazendo a simetria de um painel com dimensões reais, não houve sucesso na modelagem. Dessa forma, optou-se por fazer uma versão reduzida dos painéis com os recursos disponíveis.

A malha atribuída foi designada em função de uma convergência que pudesse interagir em toda a estrutura. Para tanto, foi determinado, através de um controle, o tamanho de 10 mm para todos os elementos. Contudo, em alguns casos, foi necessário inserir uma malha mais refinada, introduzindo os métodos de *patch independent* com variação de tamanho de 10 mm, bem como *hex dominant method*, fixando a configuração dos elementos, todos quadrangulares, para deixar a estrutura mais próxima da convergência e para que os resultados das análises pudessem ser mais precisos. A Figura 47 apresenta a discretização da malha nos painéis.

Figura 47 – Discretização da malha



Fonte: autora, 2023

Com as propriedades mecânicas e térmicas dos materiais definidas, conforme visto nas seções anteriores, foi possível seguir para os modelos apresentados. Foram realizadas primeiramente as análises térmicas, seguidas das análises mecânicas, variando o gradiente de temperatura para os três modelos.

A análise termomecânica, como é chamada, foi realizada em duas etapas. A primeira foi a de simulação térmica, em que as estruturas foram submetidas a situação de incêndio para que pudessem ser calculados os valores das temperaturas em um regime transiente (análise térmica). Em seguida, passou-se para a análise mecânica, em que foram adicionadas as ações de carregamento e as condições de contorno dos apoios, sendo imposto a essa análise o efeito da carga devido à ação do fogo, para

um determinado instante de tempo de exposição ao fogo. É de salientar que ambas as análises são realizadas de forma individual, embora a análise térmica, em função das ações de elevação da temperatura, influenciem na análise mecânica, nos resultados de tensões e deformações a que a peça esteja submetida. Todavia, a análise mecânica nada influencia na térmica.

É importante destacar ainda que, para a análise termomecânica operar de maneira coerente, as definições geométrica e de discretização de malhas devem ser iguais para as duas etapas, ou seja, as definições estabelecidas na etapa térmica serão transmitidas para a etapa mecânica, de modo que seja garantido o mesmo número de elementos para as duas análises.

Embora seja complexo, e neste caso envolva tanto o uso de um regime de transiente térmico quanto a ação mecânica, o estudo de modelagem numérica computacional permite uma maior flexibilidade do cálculo e dos parâmetros que se pretende verificar.

### 3.3.3 Desenvolvimento da análise térmica

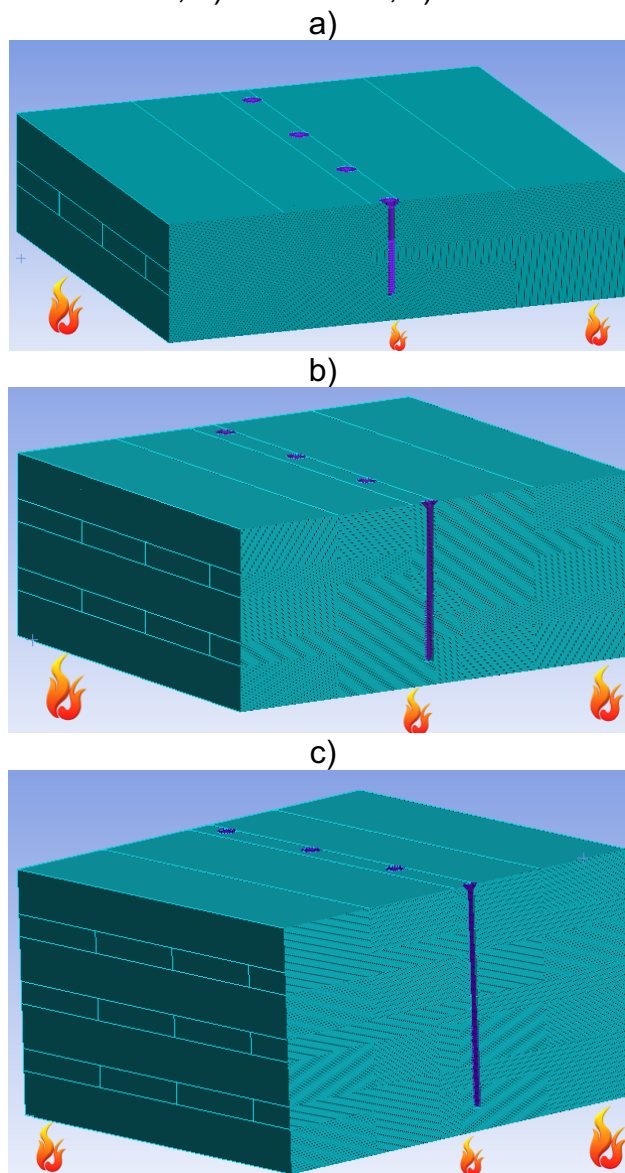
O desenvolvimento da análise térmica traduz-se no comportamento nodal em função das temperaturas aplicadas no regime transiente, nos modelos dos painéis. Nessa análise são aplicadas as condições de contorno térmicas, como os graus de temperatura, a convecção e a radiação. Destaque-se que, em um primeiro momento, aplicou-se a radiação aos modelos numéricos. Contudo, para esta pesquisa, foi desconsiderado o efeito da ação da radiação, em virtude de ela não alterar os valores nas análises finais.

Nesta pesquisa, simulam-se três modelos de painéis CLT com variação em suas espessuras, ligados por meio do sistema de junção *Half-lap* com parafusos de 10 mm de diâmetro. Esses painéis são expostos a situação de incêndio durante 3600s (60 min), com uma temperatura inicial de 20°C.

A condição de contorno da ação do fogo nas estruturas foi aplicada na parte inferior dos painéis, conforme mostra a Figura 48. Ficaram estabelecidas, para melhor visualização, as cores roxa para os parafusos e ciano para a madeira. Também foram aplicados às condições de contorno os coeficientes de convecção da madeira e do aço, sendo 25 W/m<sup>2</sup> K para a madeira e 5 W/m<sup>2</sup> K para os parafusos, em conformidade

com a EN 1995 (2004). Ao final dessa primeira análise, unicamente térmica, foram obtidos os valores dos patamares de temperatura, evoluindo em função do tempo.

Figura 48 – Modelos dos painéis com a face inferior exposta ao fogo: a) 3 camadas; b) 5 camadas; c) 7 camadas

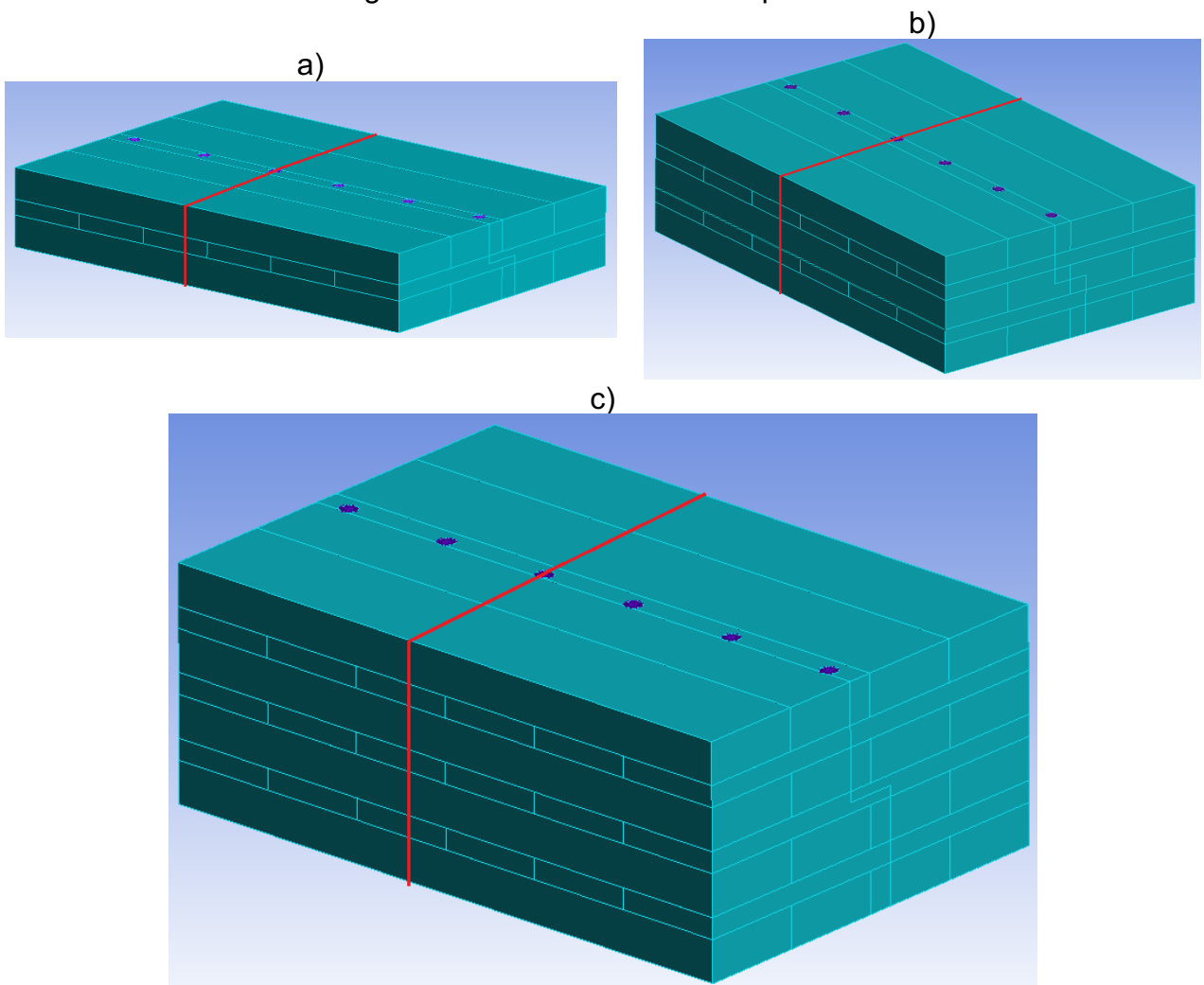


Fonte: autora, 2023

Com os resultados das análises térmicas, foi executado um plano de corte nos modelos, no qual a seção transversal correspondesse a um seccionamento próximo de um parafuso. Nessa seção de corte (Figura 49), optou-se por escolher 9 (nove) pontos, os quais foram determinados através da interseção do ponto central, e, de maneira equidistante, foram conseguidos os pontos externos e internos, sendo 4 pontos nas extremidades externas (E), 4 pontos internos (I) e 1 ponto central (C), com

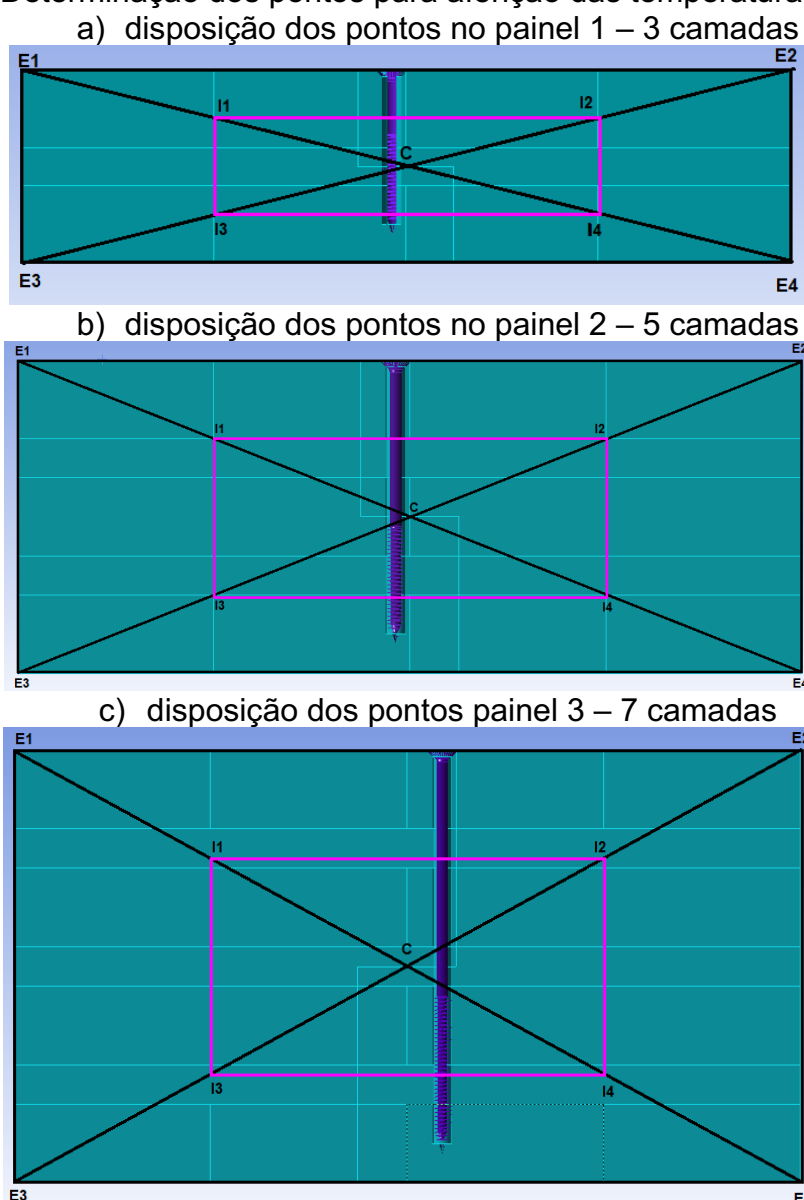
o intuito de aferir a temperatura nesses pontos. Ficou designada a seguinte nomenclatura para esses pontos:  $E_1$  a  $E_4$  para as temperaturas na região mais externa do painel;  $I_1$  a  $I_4$  para as temperaturas nas regiões mais internas. A Figura 50 demonstra como ficou a distribuição dos pontos de aferição de temperatura nas seções de corte de cada painel.

Figura 49 – Plano de corte dos painéis.



Fonte: autora, 2023

Figura 50 – Determinação dos pontos para aferição das temperaturas dos painéis.



Fonte: autora, 2023

### 3.3.4 Desenvolvimento da análise mecânica

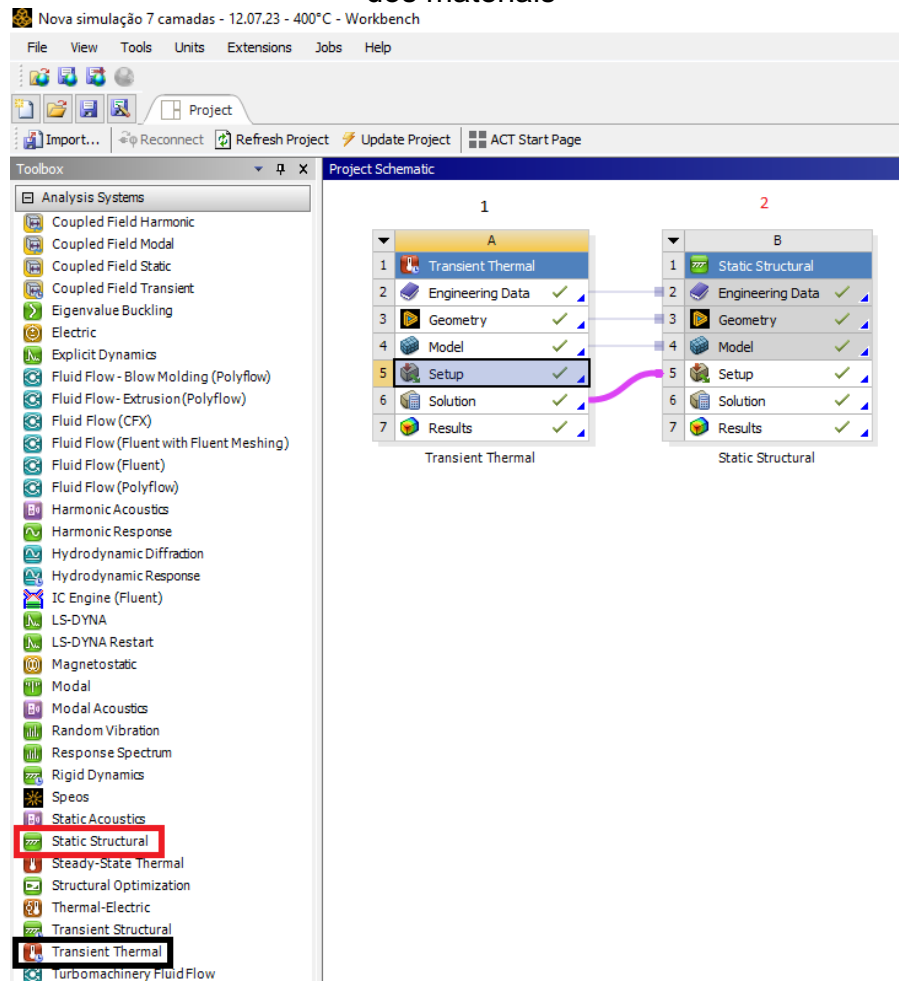
A análise mecânica foi realizada com base nos cálculos para as estruturas em condição de temperatura ambiente. Também foram usados os dados obtidos pela análise térmica, seguidos pela adição das condições de contorno de fixação e carregamentos.

Essa análise permite discernir as tensões e deformações causadas pelas condições de contorno aplicadas nas estruturas, determinar a máxima carga na ligação, bem como o deslocamento horizontal que as ligações podem sofrer ao serem submetidas a elevadas temperaturas, sem contudo exceder os limites dos materiais.



Para tanto, as estruturas deveriam obedecer aos mesmos critérios de malhas e números de nós atribuídos na análise térmica. Partindo desse princípio, o *Ansys* possui em suas configurações uma capacidade múltifísica que permite ligar os parâmetros das propriedades físicas e mecânicas entre as análise que se deseja executar, conforme a Figura 51.

Figura 51 – Configuração dos parâmetros das propriedades físicas e mecânicas dos materiais



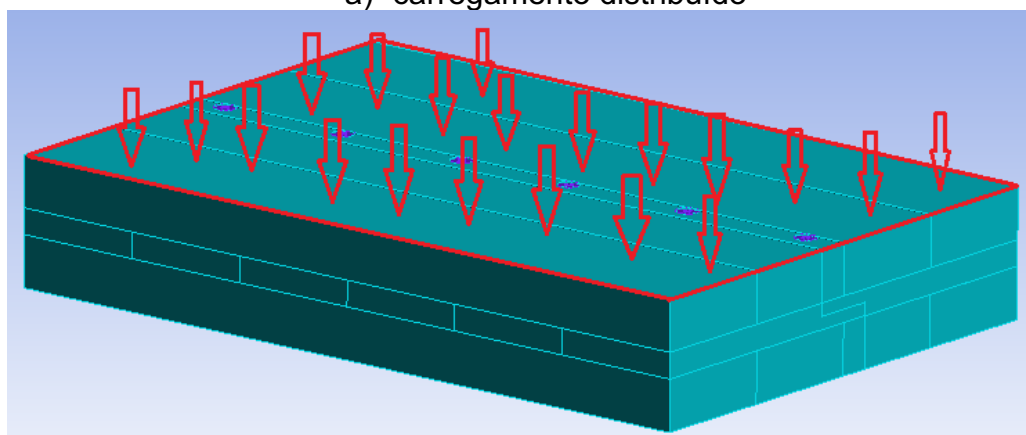
Fonte: autora, 2023

Conforme mostra a Figura 51, dentro da interface do programa foram escolhidos os critérios de análise, sendo o número 1 a análise térmica e o número 2 a análise mecânica. Todavia, pode-se perceber que existe uma ligação entre os dois módulos, onde as propriedades físicas, geométricas e modelagem seguem os mesmos critérios de configuração, e os resultados do módulo 1 são transferidos para o módulo 2, juntando-se aos esforços aplicados.

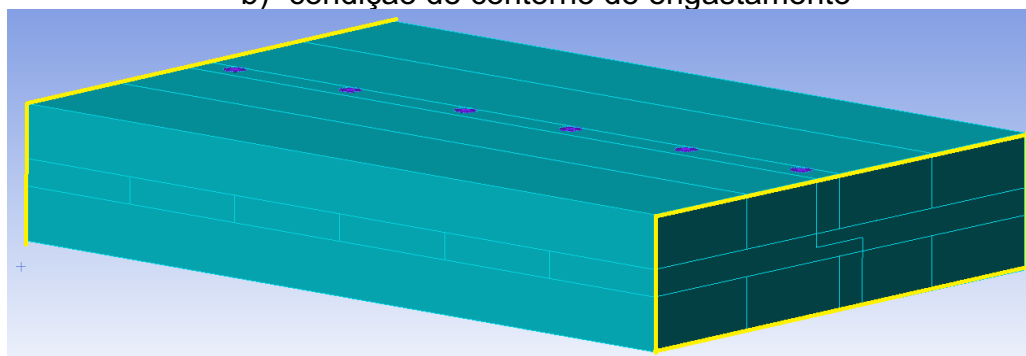
Diante dessas ponderações e atentando para o fato de que os painéis estudados foram tidos como lajes bi-engastadas, o carregamento e as condições de contorno dos apoios estão caracterizados na Figura 52.

Figura 52 – Determinação do carregamento e condições de apoio

a) carregamento distribuído



b) condição de contorno de engastamento



Fonte: autora, 2023

O carregamento empregado e as condições de apoio atribuídas como bi-engastadas foram efetuados segundo os cálculos obtidos pelas ações em condição ambiente. Com os resultados encontrados nas soluções, partiu-se para o pós-processamento, ou seja, um diagnóstico mais aprofundado dos dados encontrados. Com a ajuda dos gráficos e dos conhecimentos técnicos acerca das condições de contorno estabelecidas, bem como das bases referenciadas na literatura, pode-se averiguar o efeito das ligações em situação de incêndio.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme visto na revisão bibliográfica, os estudos referentes às ligações em madeira em situação de incêndio, de um modo geral, ainda são limitados, apesar dos avanços nas pesquisas e das determinações presentes nas normas técnicas. Muitos estudos relacionados a estruturas de madeira tratam de ligações referentes aos esforços de tração ou compressão causados pela ação das forças entre a confluência dos elementos, como viga-coluna, viga-laje, viga-viga, entre outras interseções.

Os estudos numéricos envolvendo tais situações, via de regra, abordam a evolução da temperatura e o comportamento térmico dos elementos. Como visto na literatura, a madeira tem um bom comportamento quando submetida a elevadas temperaturas. Entretanto, pouco se tem acerca de estudos sobre o comportamento das ligações em painéis de CLT e o seu desempenho termomecânico. A norma brasileira NBR 7190 (ABNT, 2022), bem como a europeia EN 1995-1-2 (2004), não versam muito sobre a evolução da temperatura em ligações entre diferentes materiais, mas apenas sugerem um dimensionamento em que devem ser adotados materiais e detalhes construtivos para a fixação de um revestimento e um tratamento nas juntas com comprovada resistência ao fogo.

Assim sendo, para a análise térmica foram observados os efeitos internos do progresso da temperatura em pontos próximos às extremidades externas, pontos internos e central, a fim de captar as implicações do aquecimento dos parafusos na madeira. Da mesma maneira, foi avaliada a progressão da ação do fogo nos painéis à medida que iam aumentando os patamares de temperatura tanto na madeira quanto nos parafusos, sendo considerada como temperatura de carbonização a linha isotérmica de 300°C para todos os resultados.

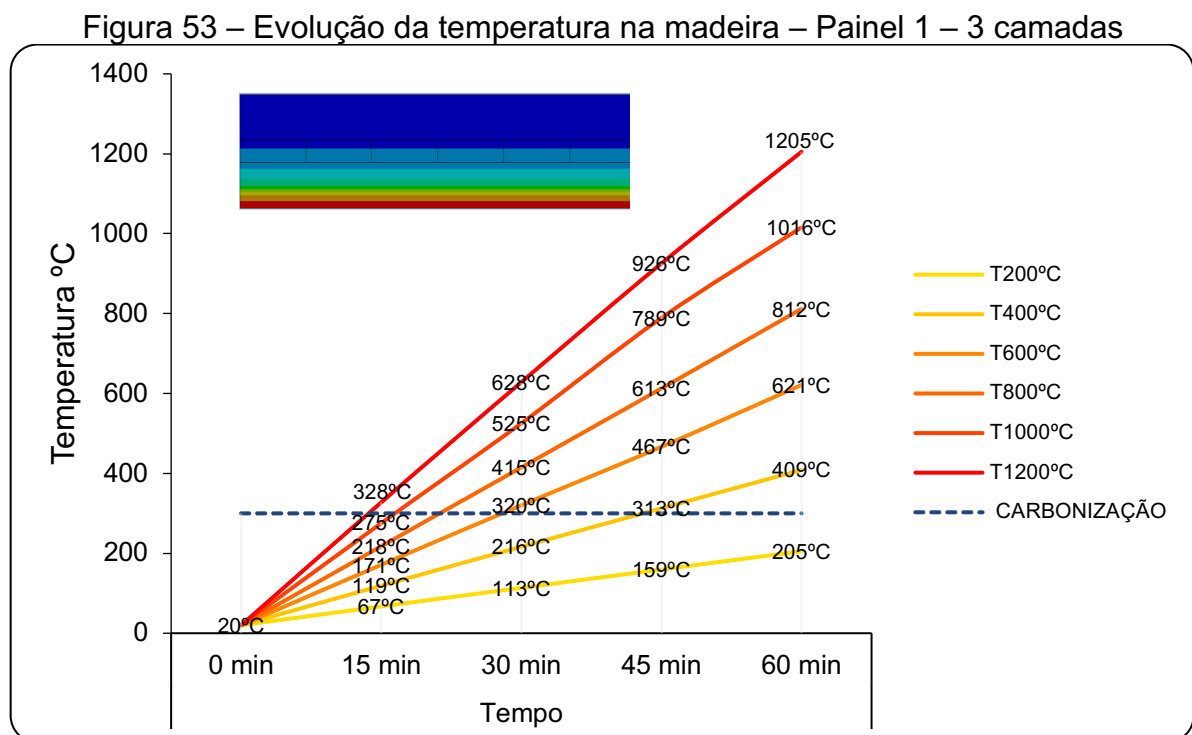
No que se refere à análise termomecânica, avaliou-se a capacidade que as ligações têm de resistir aos efeitos das elevações de temperaturas e às ações de carregamento distribuídas ao longo dos painéis, considerados como lajes. Foram averiguados seus deslocamentos verticais e horizontais equivalentes, em virtude da elevação de temperatura.

Os resultados e suas análises constam nos capítulos a seguir.

#### 4.1 Evolução da temperatura nos painéis CLT

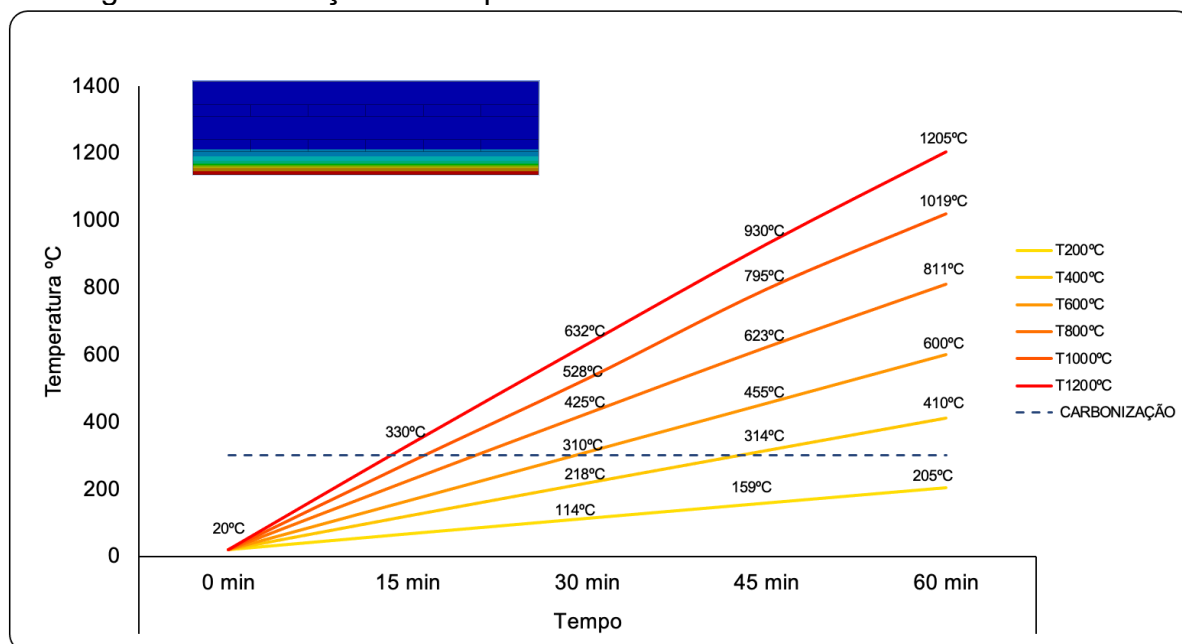
Em conformidade com a descrição da metodologia aplicada, os testes de simulação numérica identificaram como os painéis de madeira CLT e suas ligações se comportam ao serem submetidos a vários patamares de temperatura elevada. Para tanto, à medida que se aumentou a temperatura, aumentou-se também o tempo de exposição, o que permitiu deduzir elementos para a análise da evolução da temperatura nos painéis, a aferição da temperatura no interior da seção transversal e o deslocamento máximo nas ligações.

A distribuição da temperatura ao longo dos painéis foi registrada considerando os patamares de T200°C a T1200°C, para os Painéis 1, 2 e 3, diferenciados pelo número de camadas de cada um. Os resultados dessas evoluções nos painéis de madeira estão demonstrados nas Figura 53, Figura 54 e Figura 55.



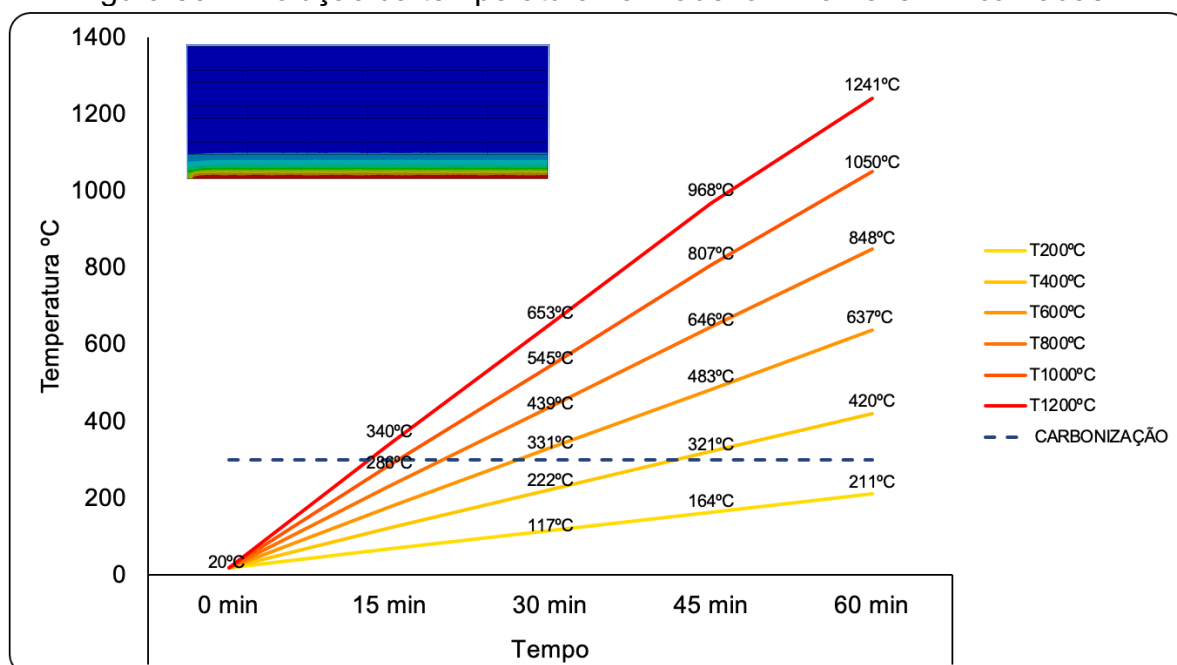
Fonte: autora, 2023

Figura 54 – Evolução da temperatura na madeira – Pannel 2 – 5 camadas



Fonte: autora, 2023

Figura 55– Evolução da temperatura na madeira – Pannel 3 – 7 camadas



Fonte: autora, 2023

A progressão da elevação da temperatura ao longo dos 60 minutos de exposição em situação de incêndio nos três painéis ocorre de maneiras distintas, como já era previsto. No Painel 1, montado com 3 camadas de lamelas, percebeu-se que a distribuição foi progressiva ao longo da seção transversal e que, até próximo da metade dessa seção transversal, houve uma influência térmica nos elementos. Entretanto, nos painéis 2 e 3 a distribuição do regime transiente térmico teve pouca evolução, concentrando-se mais nas lamelas inferiores, conservando a seção transversal quase inalterada.

Durante os testes, observou-se que a velocidade de progressão do fogo nas estruturas se desenvolveu de forma linear, no exterior das peças. Conforme mencionado, foi admitida a carbonização da madeira em torno de 300°C. Para Schmid *et al* (2021) e Vairo (2022), é constante o uso da temperatura para a determinação da espessura de carvão criada nas peças em ensaios de incêndio em estruturas de madeira. Sendo assim, nos testes realizados nos três painéis, considerando o tempo de 30 minutos e o valor de  $\beta_0 = 0,65$  mm/min, determinado pela NBR 7190 (ABNT, 2022), encontrou-se o valor de 1,95 mm/min para a taxa de carbonização, sendo conferido com o valor calculado (Klippel *et al*, 2018).

Por meio desse valor, observou-se que as lamelas inferiores, ou seja, as lamelas que estavam expostas diretamente ao fogo, sofreram redução, o que gerou na estrutura uma redução considerável na seção transversal, principalmente no painel com 3 camadas. Nos painéis de 5 e 7, essa diminuição não foi tão influente.

Klippel *et al* (2018) constataram em seu estudo que os modelos adotados pelos métodos europeus de carbonização são considerados conservadores, significando que a profundidade prevista no modelo europeu pode ser maior do que a profundidade carbonizada gerada no teste de fogo.

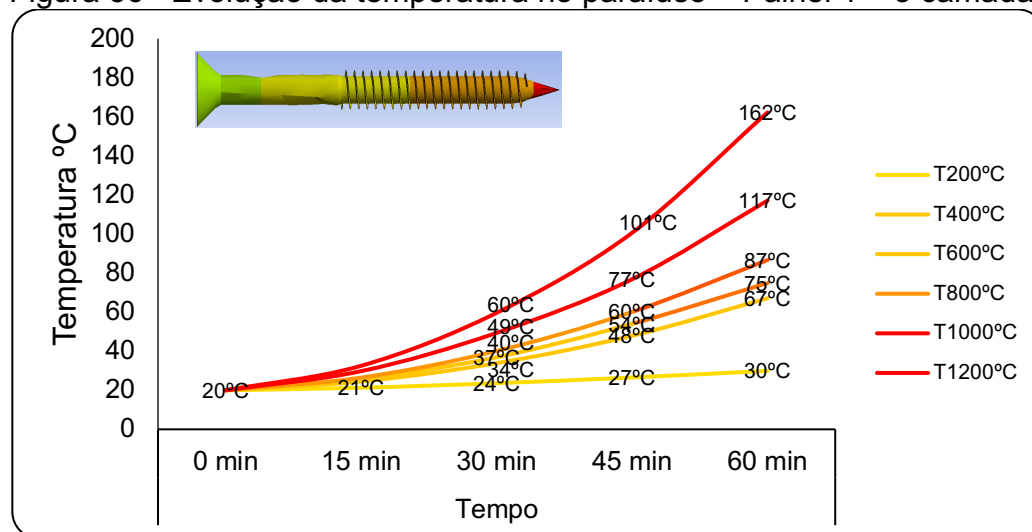
Para Frangi *et al* (2009), os painéis com camadas de espessura maior desempenham um melhor comportamento se comparados a painéis com camadas de espessura menor. Isso se deve à camada protetora de carvão, que deveria proteger, sofrer desprendimento e cair após cada camada estar completamente carbonizada. Martins (2016) diz que a taxa de carbonização tende a diminuir à medida que as peças de madeira ficam expostas ao fogo, chegando a um valor constante, pois essa camada carbonizada isola termicamente o interior da seção transversal, conforme pode ser verificado nas figuras anteriormente expostas.

Todavia, observa-se que, à medida que a temperatura evolui, mais propriamente nos patamares de T1000°C e T1200°C, a partir dos 45 min da ação do fogo a progressão começa a mostrar uma pequena não-linearidade. Isso se deve ao fato de que o comportamento linear obtido experimentalmente pode-se distanciar do comportamento obtido na prática de ensaio, em que às vezes verifica-se que o comportamento não ocorre de maneira linear. Isso pode acontecer por alguns motivos, como a ocorrência de possíveis falhas de colagem entre as peças de madeira (Frangi *et al*, 2009; Martins, 2016; Mohammad *et al*, 2019). Em suma, a carbonização da madeira pode acontecer com velocidade e formato distintos do aspecto linear trazido pelo software, e isso deve ser levado em consideração no dimensionamento (Marh *et al*, 2020).

Pinto *et al* (2016), ao realizarem estudos de composição química, retração, análise termogravimétrica e medições de poder calorífico, encontraram resultados que indicam que as espécies estudadas apresentavam níveis estáveis de evolução até 250°C. Considerou-se a taxa de carbonização importante, pois isola o interior da madeira quando os elementos são expostos a altas temperaturas.

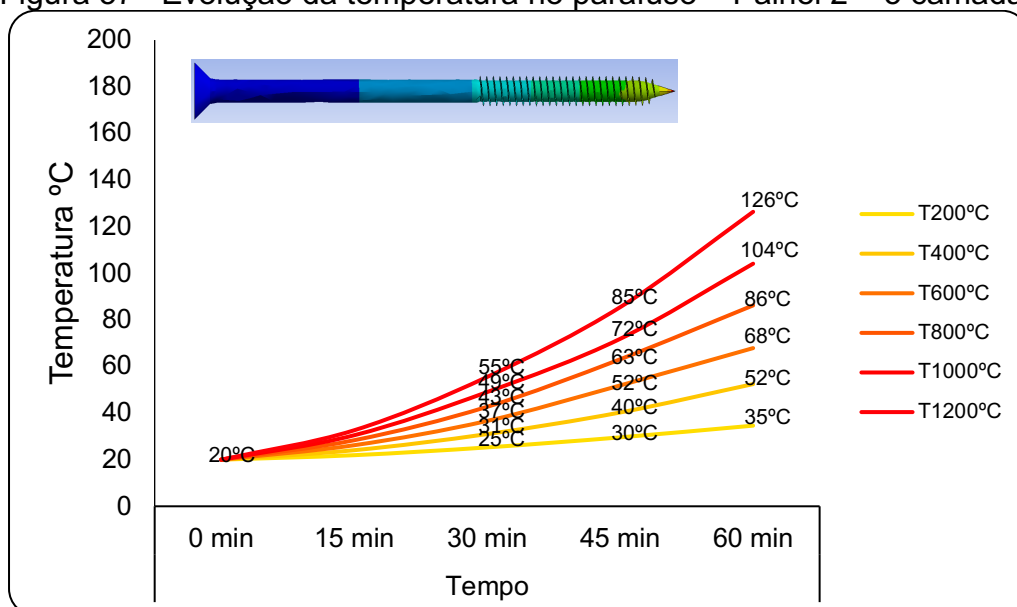
A evolução da temperatura internamente, mais propriamente nos parafusos, considerando os mesmos patamares usados nas medições dos painéis de madeira, está demonstrada nas Figura 56, Figura 57 e Figura 58.

Figura 56– Evolução da temperatura no parafuso – Painel 1 – 3 camadas



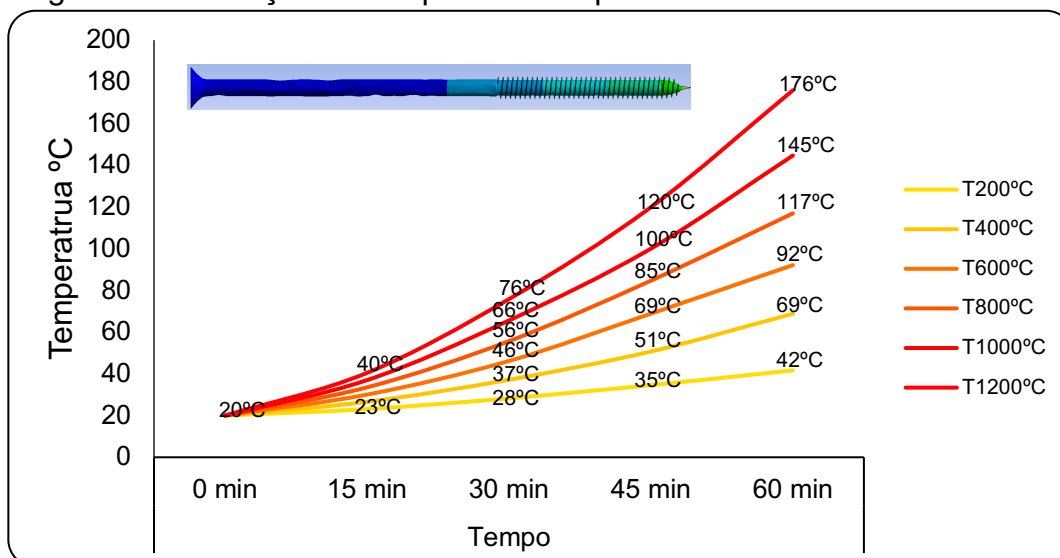
Fonte: autora, 2023

Figura 57– Evolução da temperatura no parafuso – Pannel 2 – 5 camadas



Fonte: autora, 2023

Figura 58– Evolução da temperatura no parafuso – Pannel 3 – 7 camadas



Fonte: autora, 2023

Para Palma (2016), os parafusos e outros conectores em temperatura normal tendem a transferir para a madeira uma carga perpendicular ao longo do seu eixo longitudinal, a qual é eficiente e amplamente adotada. Contudo, trata-se de um elemento que, quando exposto a uma temperatura elevada, e caso não exista um agente de proteção inibindo a ação do fogo, pode se tornar um ponto frágil da estrutura (Gomes, 2022).

Todavia, o que se percebeu ao longo da exposição foi que apenas o parafuso do painel 3 sofreu maiores interferências em virtude da influência do fogo, chegando



a atingir uma temperatura máxima de 175,95°C, em T1200°C, no tempo de 3600s, mesmo com todas as camadas de lamelas de proteção. Esse valor foi aferido na ponta mais próxima às lamelas em que incidiu a ação do fogo.

Os parafusos dos painéis 1 e 2 tiveram interferências distintas da ação do fogo no regime transiente de temperatura, à medida que esta se elevava. Para o mesmo patamar T1200°C, os parafusos dos painéis 1 e 2 atingiram temperaturas máximas de 162,27°C e 126,33°C, respectivamente. Isso se explica pela quantidade de camadas envolvendo o parafuso, ou seja, quanto menor a quantidade de lamelas distribuídas na seção transversal, maior será a possibilidade de o elemento de ligação interno se deformar e perder sua capacidade resistente (Mahr *et al*, 2020).

Em seu estudo sobre ligações submetidas a elevadas temperaturas, Palma *et al* (2019) afirmam que, quanto à resistência dos parafusos ao fogo, existe uma clara influência das espessuras nas ligações. Apesar disso, não se pode descartar o efeito indireto da ação do fogo nos parafusos, pois eles, ao se aquecerem, mesmo que com uma intensidade menor, perdem parte de sua seção transversal, causando no local efeitos de instabilidade na ligação (Mahr *et al*, 2020).

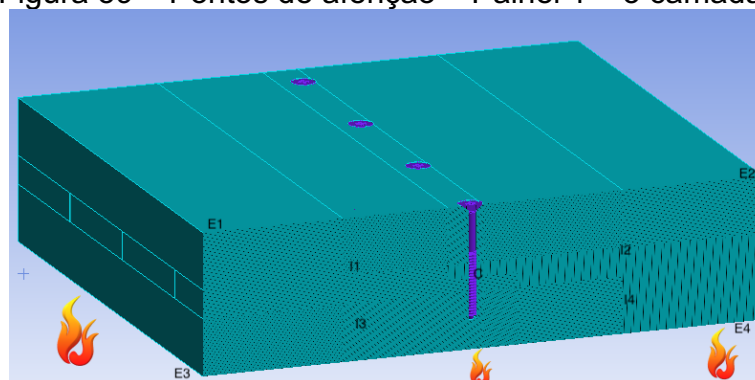
#### **4.2 Aferição de temperatura em pontos nodais**

A evolução da temperatura em diferentes pontos da seção transversal dos painéis estudados foi registrada conforme detalhado na seção 3.3.3 e demonstrado na figura 49.

Optou-se por analisar os pontos externos, internos e central da seção transversal, para aferir a evolução da temperatura à proporção que se aumentavam os patamares de temperatura ao longo do tempo de 3600s (60 min). Para facilitar o entendimento, foram escolhidos nove pontos e designada a seguinte nomenclatura: E para as temperaturas externas, subdivididas em E1, E2, E3 e E4; I para as temperaturas internas, subdivididas em I1, I2, I3 e I4; e C para as temperaturas centrais. Os pontos de aferição da evolução da temperatura, conforme a nomenclatura utilizada, estão descritos no capítulo anterior.

Os resultados obtidos para cada intervalo de tempo, bem como para os patamares de temperatura nos pontos nodais escolhidos, estão apresentados nas Figura 59, Figura 60 e Figura 61, e Tabela 19, Tabela 20 e Tabela 21, para os Painéis 1, 2 e 3, respectivamente com 3, 5 e 7 camadas de lamelas.

Figura 59 – Pontos de aferição – Pannel 1 – 3 camadas



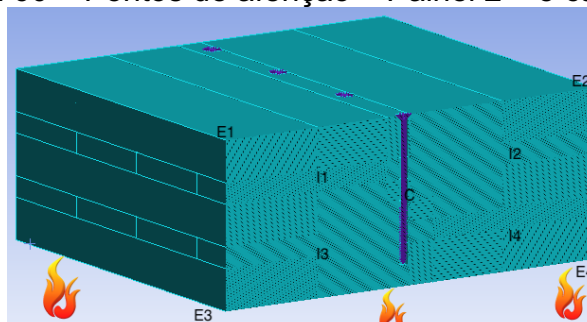
Fonte: autora, 2023

Tabela 19 - Aferição das temperaturas nos pontos nodais – Pannel 1

| T200°C  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| TEMPO   | E1     | E2     | E3     | E4     | C      | I1     | I2     | I3     | I4     |
| 15      | 20,209 | 20,028 | 52,569 | 52,569 | 20,389 | 20,099 | 20,238 | 26,467 | 24,687 |
| 30      | 20,167 | 20,167 | 90,075 | 110    | 22,163 | 20,497 | 20,499 | 38,963 | 38,98  |
| 45      | 20,533 | 20,554 | 129,05 | 115    | 24,633 | 21,853 | 21,947 | 55,634 | 55,634 |
| 60      | 21,352 | 21,352 | 168,8  | 168,8  | 33,491 | 23,112 | 23,524 | 75,162 | 75,196 |
| T400°C  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 15      | 20,059 | 20,059 | 99,447 | 83,413 | 21,533 | 20,343 | 20,343 | 28,331 | 28,416 |
| 30      | 20,349 | 20,349 | 184,66 | 157,89 | 25,729 | 21,62  | 21,484 | 46,058 | 46,285 |
| 45      | 21,153 | 21,153 | 274,43 | 238,59 | 33,623 | 24,411 | 24,605 | 71,809 | 72,271 |
| 60      | 22,817 | 22,817 | 370,23 | 400    | 48,553 | 29,191 | 29,098 | 105,67 | 106,17 |
| T600°C  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 15      | 20,09  | 20,09  | 165    | 157,3  | 22,616 | 20,51  | 20,521 | 32,844 | 33,153 |
| 30      | 20,528 | 20,528 | 310    | 299,65 | 30,314 | 22,394 | 22,367 | 59,47  | 60,47  |
| 45      | 21,743 | 21,743 | 455    | 440,95 | 51,358 | 26,571 | 26,684 | 100,01 | 100,09 |
| 60      | 24,193 | 24,194 | 600    | 578,75 | 67,404 | 33,38  | 33,343 | 142,57 | 150,81 |
| T800°C  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 15      | 20,121 | 20,121 | 208,78 | 215    | 23,704 | 20,704 | 20,637 | 37,256 | 37,267 |
| 30      | 20,713 | 20,713 | 400,44 | 410    | 30,403 | 23,3   | 23,216 | 73,232 | 73,558 |
| 45      | 22,365 | 22,365 | 589,66 | 605    | 46,81  | 28,963 | 28,874 | 128,12 | 130,71 |
| 60      | 25,78  | 25,781 | 785,84 | 800    | 63,665 | 38,463 | 38,501 | 194,84 | 202,59 |
| T1000°C |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 15      | 20,152 | 20,152 | 255,47 | 265    | 24,403 | 20,885 | 20,864 | 39,907 | 41,702 |
| 30      | 20,902 | 20,902 | 495,7  | 510    | 37,049 | 24,049 | 24,1   | 87,226 | 88,427 |
| 45      | 22,885 | 22,885 | 734,7  | 755    | 58,244 | 30,965 | 30,693 | 149,51 | 144,78 |
| 60      | 26,904 | 26,902 | 987,19 | 1000   | 91,416 | 42,193 | 42,013 | 234,33 | 238,76 |
| T1200°C |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 15      | 20,183 | 20,183 | 315    | 274,11 | 24,958 | 21,037 | 21,059 | 46,131 | 46,674 |
| 30      | 21,087 | 21,087 | 610    | 562,08 | 39,626 | 24,943 | 25,031 | 102,77 | 104,55 |
| 45      | 23,535 | 23,535 | 905    | 827,95 | 97,573 | 33,243 | 33,07  | 180,51 | 182,86 |
| 60      | 28,61  | 28,611 | 1200   | 1179,7 | 134,37 | 47,903 | 47,769 | 304,93 | 310,97 |

Fonte: autora, 2023

Figura 60 – Pontos de aferição – Painel 2 – 5 camadas



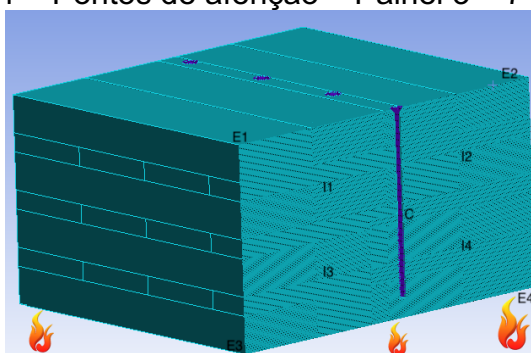
Fonte: autora, 2023

Tabela 20 – Aferição das temperaturas nos pontos nodais – Painel 2

| T200°C  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| TEMPO   | E1     | E2     | E3     | E4     | C      | I1     | I2     | I3     | I4     |
| 15      | 20     | 20     | 65     | 65     | 20,24  | 20,003 | 20,003 | 21,883 | 21,782 |
| 30      | 20,002 | 20,002 | 101,99 | 110    | 20,937 | 20,019 | 20,019 | 26,359 | 26,353 |
| 45      | 20,009 | 20,009 | 144,55 | 155    | 21,896 | 20,07  | 20,071 | 33,693 | 33,778 |
| 60      | 20,028 | 20,027 | 187,46 | 200    | 23,434 | 20,188 | 20,191 | 43,625 | 43,594 |
| T400°   |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 15      | 20     | 20     | 114,15 | 115    | 20,609 | 20,006 | 20,006 | 23,963 | 23,762 |
| 30      | 20,004 | 20,004 | 209,65 | 210    | 22,416 | 20,004 | 20,004 | 33,39  | 33,257 |
| 45      | 20,017 | 20,017 | 299,17 | 305    | 23,866 | 20,148 | 20,144 | 48,5   | 48,558 |
| 60      | 20,056 | 20,056 | 393,52 | 400    | 27,753 | 20,398 | 20,4   | 69,839 | 69,881 |
| T600°C  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 15      | 20,001 | 20,001 | 158,54 | 165    | 20,092 | 20,009 | 20,009 | 26,004 | 25,753 |
| 30      | 20,006 | 20,006 | 299,21 | 310    | 23,067 | 20,06  | 20,06  | 40,233 | 39,887 |
| 45      | 20,028 | 20,028 | 442,49 | 455    | 25,981 | 20,222 | 20,222 | 63,206 | 63,617 |
| 60      | 20,084 | 20,084 | 580,59 | 600    | 30,729 | 20,59  | 20,598 | 93,501 | 91,853 |
| T800°C  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 15      | 20,001 | 20,001 | 215    | 182,98 | 21,07  | 20,012 | 20,012 | 27,716 | 27,616 |
| 30      | 20,008 | 20,008 | 410    | 355,71 | 23,835 | 20,082 | 20,081 | 46,927 | 46,966 |
| 45      | 20,035 | 20,035 | 605    | 533,36 | 28,657 | 20,306 | 20,301 | 79,797 | 90,229 |
| 60      | 20,114 | 20,114 | 800    | 723,66 | 35,709 | 20,775 | 20,809 | 124,14 | 120,68 |
| T1000°C |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 15      | 20,001 | 20,001 | 265    | 265    | 21,537 | 20,016 | 20,013 | 30,027 | 29,701 |
| 30      | 20,01  | 20,01  | 510    | 470,51 | 24,439 | 20,012 | 20,104 | 54,339 | 54,296 |
| 45      | 20,044 | 20,044 | 755    | 692,73 | 31,607 | 20,373 | 20,371 | 90,424 | 88,942 |
| 60      | 20,139 | 20,139 | 1000   | 934,69 | 37,97  | 20,987 | 20,988 | 141,64 | 142,74 |
| T1200°C |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 15      | 20,001 | 20,001 | 315    | 273,35 | 21,625 | 20,019 | 20,018 | 31,704 | 32,422 |
| 30      | 20,012 | 20,012 | 610    | 549,77 | 25,964 | 20,126 | 20,125 | 61,502 | 61,162 |
| 45      | 20,053 | 20,053 | 905    | 822,2  | 33,177 | 20,428 | 20,447 | 107,28 | 107,06 |
| 60      | 20,171 | 20,171 | 1200   | 1174,5 | 45,239 | 21,234 | 21,226 | 180,33 | 180,31 |

Fonte: autora, 2023

Figura 61 – Pontos de aferição – Painel 3 – 7 camadas



Fonte: autora, 2023

Tabela 21 – Aferição das temperaturas nos pontos nodais – Painel 3

| T200°C  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| TEMPO   | E1     | E2     | E3     | E4     | C      | I1     | I2     | I3     | I4     |
| 15      | 20     | 20     | 65     | 65     | 20,025 | 20     | 20     | 20,352 | 20,462 |
| 30      | 20     | 20     | 105,08 | 110    | 20,046 | 20,001 | 20,001 | 22,205 | 21,958 |
| 45      | 20     | 20     | 146,32 | 155    | 20,303 | 20,003 | 20,004 | 25,391 | 24,844 |
| 60      | 20     | 20     | 192,51 | 200    | 20,644 | 20,009 | 20,014 | 27,631 | 29,247 |
| T400°C  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 15      | 20     | 20     | 115    | 105,4  | 20,093 | 20     | 20,001 | 20,348 | 20,834 |
| 30      | 20     | 20     | 210    | 192,92 | 20,406 | 20,001 | 20,009 | 22,373 | 23,494 |
| 45      | 20     | 20     | 305    | 282,92 | 21,31  | 20,007 | 20,036 | 26,919 | 28,633 |
| 60      | 20,001 | 20,001 | 400    | 374,38 | 22,537 | 20,034 | 20,102 | 34,56  | 36,656 |
| T600°C  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 15      | 20     | 20     | 156,19 | 151,83 | 20,069 | 20,001 | 20     | 21,089 | 21,137 |
| 30      | 20     | 20     | 295,76 | 290,26 | 20,363 | 20,005 | 20,002 | 24,822 | 24,865 |
| 45      | 20     | 20     | 438,48 | 432,45 | 20,892 | 20,018 | 20,014 | 32,341 | 32,408 |
| 60      | 20,001 | 20,001 | 574,1  | 565,48 | 21,997 | 20,059 | 20,043 | 43,733 | 43,931 |
| T800°C  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 15      | 20     | 20     | 196,93 | 173,93 | 20,033 | 20,001 | 20,001 | 21,49  | 21,505 |
| 30      | 20     | 20     | 406,22 | 347,65 | 20,495 | 20,006 | 20,004 | 26,508 | 26,562 |
| 45      | 20     | 20     | 598,61 | 524,76 | 20,67  | 20,026 | 20,015 | 36,223 | 36,158 |
| 60      | 20     | 20     | 794,34 | 731,42 | 21,656 | 20,078 | 20,057 | 51,388 | 51,332 |
| T1000°C |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 15      | 20     | 20     | 251,82 | 222,77 | 20,041 | 20,001 | 20,001 | 21,921 | 21,902 |
| 30      | 20     | 20     | 490,34 | 447,59 | 20,25  | 20,005 | 20,007 | 28,26  | 28,294 |
| 45      | 20,001 | 20,001 | 726,3  | 664,48 | 21,605 | 20,023 | 20,031 | 40,432 | 40,182 |
| 60      | 20,002 | 20,002 | 972,24 | 947,35 | 22,767 | 20,006 | 20,078 | 60,487 | 59,462 |
| T1200°C |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 15      | 20     | 20     | 313,86 | 315    | 20,174 | 20,001 | 20,001 | 22,337 | 22,276 |
| 30      | 20     | 20     | 608,27 | 610    | 20,303 | 20,01  | 20,006 | 29,927 | 30,043 |
| 45      | 20,001 | 20,001 | 904,71 | 905    | 21,014 | 20,033 | 20,028 | 44,698 | 44,262 |
| 60      | 20,003 | 20,003 | 1199   | 1200   | 22,55  | 20,146 | 20,088 | 70,194 | 68,317 |

Fonte: autora, 2023

Os valores nodais apresentados nas tabelas para os três painéis mostraram-se bastante semelhantes.

Nos pontos externos onde a ação do fogo foi mínima ou quase remota, os valores ficaram próximos da temperatura de 20°C. A simetria dos valores dos pontos nodais E1 e E2, em todos os patamares, foi observada nos testes dos três painéis.

Nos pontos internos, os valores encontrados para os nós acima do ponto central, ficaram próximos aos 20°C a 21°C para os painéis 2 e 3. Essa pouca variação ocorre em virtude do número de camadas que impedem diretamente que o fogo invada o interior das peças de madeira, comprometendo a estrutura. Contudo, para o painel 1 essa variação foi bem diversa, com temperaturas variando entre 20°C e 25°C, à proporção que se elevava a temperatura e se aumentava o tempo.

Para Klippel *et al* (2018) e Pinto *et al* (2016), a madeira por si é um material combustível. Assim, quando se aplica uma determinada elevação da temperatura, ocorrerá uma degradação térmica. Porém, em virtude da camada de carbonização que cresce e avança, ao mesmo tempo que reduz a seção transversal do painel, ela também impede que o fogo e o calor sejam transmitidos para o interior da peça. Por isso, na parte superior dos painéis analisados o efeito da ação do fogo, foi praticamente imperceptível.

Os valores dos pontos nodais E3 e E4, que estavam próximos da exposição ao fogo, evoluíram de forma gradativa, conforme a temperatura aumentava e o tempo de exposição avançava. À medida que se eleva a temperatura, ocorre no interior da madeira a redistribuição e o deslocamento da umidade por difusão, o que de certa forma está associado ao pico do teor de umidade (Pinto, 2005). Notou-se que todos os pontos analisados ultrapassaram a taxa de carbonização adotada de 300°C em T400°C entre os instantes de 45-60 min, ou seja, no instante  $t=50\text{min}$ , aproximadamente.

Quanto aos pontos internos I3 e I4, que se aproximaram mais da face exposta ao fogo, as temperaturas máximas alcançadas nos painéis 2 e 3 foram, respectivamente, de 180,33°C e 70,19°C, permanecendo bastante distante da linha de carbonização (Gomes, 2022; Vairo, 2022). Todavia, no painel 1, composto por 3 camadas de lamelas ortogonalmente dispostas, a influência do regime de transiente de temperatura afetou o interior do painel, chegando, nos patamares de T1000°C e T1200°C, a valores próximos da linha de carbonização, o que possivelmente compromete o desempenho estrutural do painel.

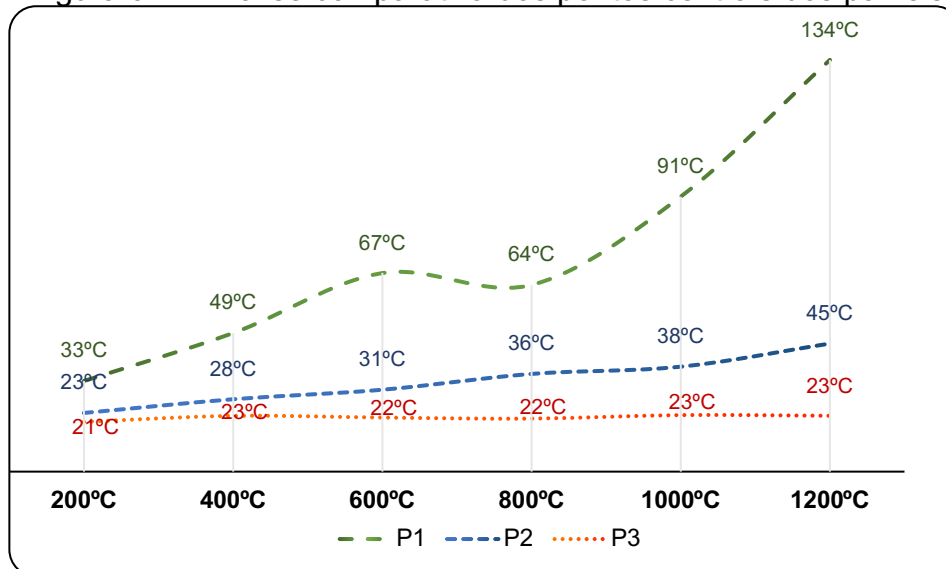
Nos pontos centrais das peças estudadas, a evolução das temperaturas seguiu o critério do número de camadas em cada painel. No Painel 1, os valores foram gradualmente progressivos, ou seja, à medida que iam se elevando as temperaturas em função do tempo, os valores para esse nó ficavam mais sujeitos à ação do regime transiente de temperatura. Os valores foram de 20,4°C a 134,4°C. Nos painéis 2 e 3, em virtude de a ação do fogo ser menos influente, essa variação foi menor, indo de 20,3°C até 45°C, no painel 2, e de 20,02°C até 22,5°C no painel 3.

### 4.3 Síntese e análise comparativa dos pontos de aferição

Com o intuito de averiguar o comportamento e o desempenho das temperaturas dentro da seção transversal, foram obtidos valores nodais para partes externas, internas e centrais dos painéis, conforme visto na seção anterior.

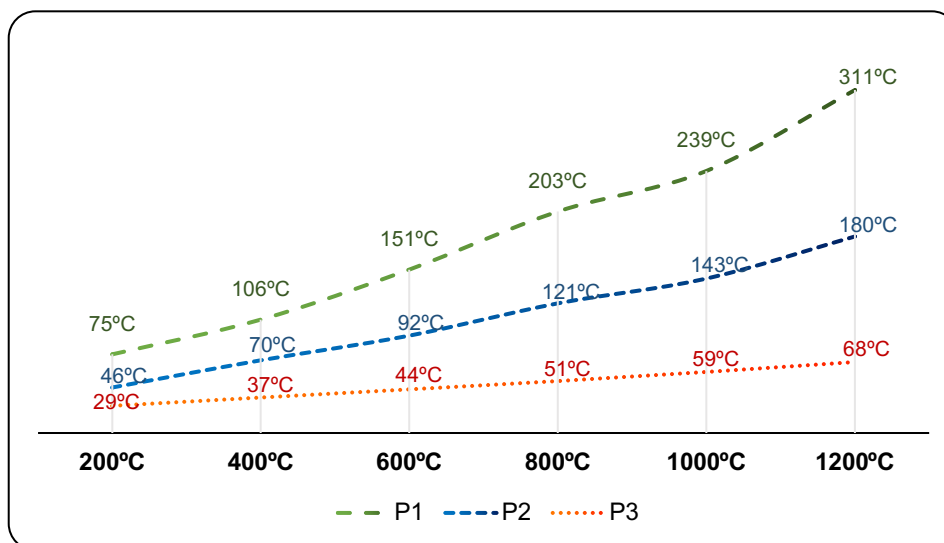
Todavia, para uma análise mais concisa, optou-se por explorar os valores das maiores temperaturas para os pontos externos e internos, e da mesma maneira para os pontos centrais, no tempo máximo de 60 minutos, fazendo-se a comparação entre os dados obtidos em cada painel. Os painéis de 3, 5 e 7 camadas são designados P1, P2 e P3, respectivamente. As comparações podem ser observadas nas Figura 62, Figura 63 e Figura 64.

Figura 62 – Análise comparativa dos pontos centrais dos painéis



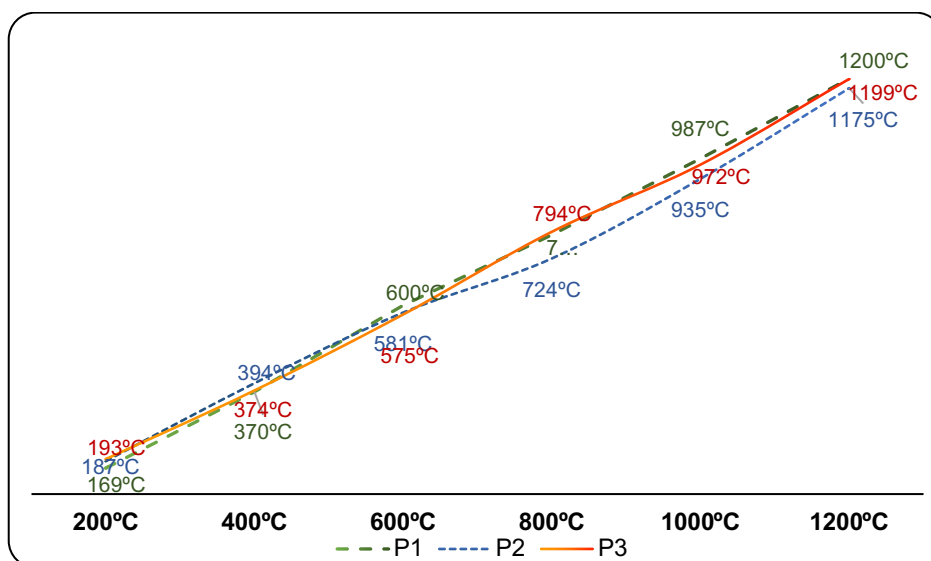
Fonte: autora, 2023

Figura 63 – Análise comparativa dos pontos internos de maiores temperaturas



Fonte: autora, 2023

Figura 64 – Análise comparativa dos pontos externos de maiores temperaturas



Fonte: autora, 2023

Para os pontos centrais dos painéis, observa-se que o comportamento, apesar de progressivo, não foi linear. As curvas de temperatura em função do tempo foram obtidas a partir das bases de dados dos maiores valores (Molina *et al*, 2012). Isso ocorre devido à transmissão do calor dentro dos materiais, sendo a madeira um material com bom isolamento térmico e o aço um bom condutor de calor (Molina *et al*, 2012).

Nota-se que no painel P1, constituído de 3 camadas coladas, o desempenho térmico ao longo dos patamares de elevação de T200°C a T1200°C variou de 33°C a 134°C. Nesse intervalo, houve uma queda da temperatura para T800°C, onde o valor atingido foi de 64°C.

No entanto, nos painéis P2 e P3, que tinham mais camadas em suas configurações geométricas, a atuação da incidência de calor ao longo dos pontos nodais no centro da seção transversal não foi significativa. Deve-se destacar que nesses pontos havia também a influência do efeito da incidência de calor do parafuso. Mesmo assim, a variação da temperatura foi de 23°C – 45°C para o painel P2, e de 21°C – 23°C para o painel P3, nos mesmos patamares de elevação, pouco influenciando no comportamento dos elementos.

Em relação aos pontos internos, foram considerados aqueles que estavam abaixo do ponto central, ou seja, mais próximos da face exposta ao fogo. Observou-se que, à medida que se elevava a temperatura aos níveis pré-estabelecidos, ao longo da seção transversal, a distribuição se manifestava de forma progressiva e conservadora (Klippel *et al*, 2018), porém não-linear, trazendo o estudo para mais próximo do que ocorreria em uma situação de ensaio experimental.

As variações de temperatura observadas para os intervalos de T200°C a T1200°C foram de 75°C – 311°C, 46°C – 180°C e 29°C – 68°C, respectivamente para os painéis P1, P2 e P3, sendo que o painel P3 apresentou uma pequena linearidade em sua evolução. Apesar de os pontos internos considerados estarem próximos à face mais exposta ao fogo, somente no Painel P1 o valor ultrapassou 300°C, ou seja, antes de atingir o patamar de 1200°C, ele já havia ultrapassado o valor da carbonização. O mesmo não ocorreu com os outros dois painéis, P2 e P3, que permaneceram abaixo de 200°C.

Ao contrário do que se observou nas sínteses comparativas entres os valores centrais e internos com maiores temperaturas, os valores de maior temperatura para os pontos externos dos painéis apresentaram pouca variação, sendo quase idênticos, independentemente da espessura do painel. Isso se explica pelo fato de, em todos os três painéis, esses valores terem sido obtidos das chapas expostas à ação do fogo. Esses pontos geralmente são escolhidos de maneira aleatória, e podem levar a resultados equivocados. Dessa forma, é necessário um bom estudo de quais pontos serão considerados e como serão distribuídos ao longo da seção transversal, para que sejam tão precisos quanto possível (Schmid *et al*, 2021).



#### 4.4 Deslocamentos nos painéis de madeira devido à elevação da temperatura.

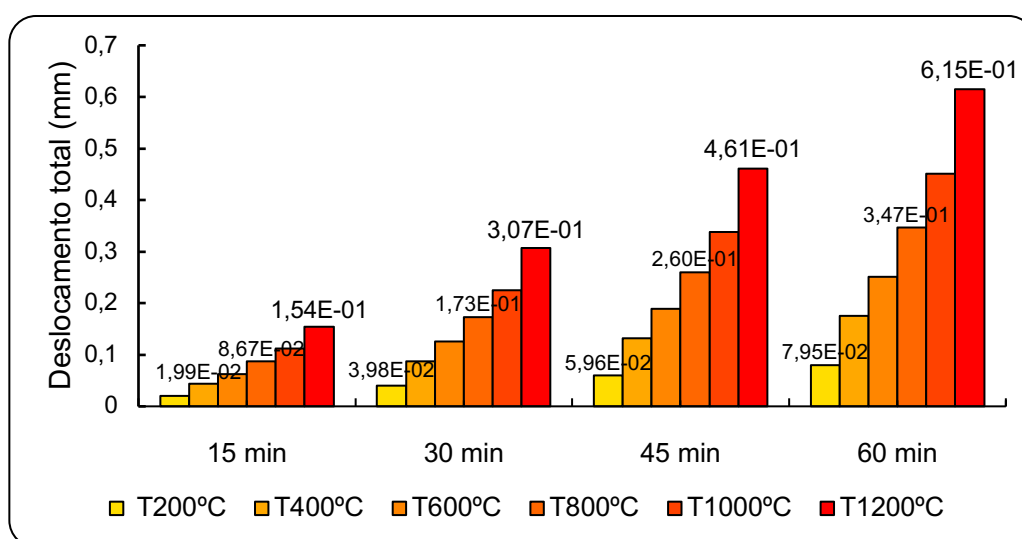
No modelo termomecânico, foi avaliado o deslocamento das ligações em função das ações dos carregamentos verticais. Foram considerados os painéis como laje bi-engastada e as cargas devido à influência da ação do fogo.

Para que fosse possível fazer essa análise, primeiramente efetuou-se o dimensionamento dos painéis em temperatura ambiente, como pode ser visto no Anexo 1. Os resultados encontrados no instante  $t$  inicial de 20°C mostram que as estruturas resistiram aos carregamentos impostos, sem o efeito da curva incêndio-padrão ISO 834. Tais resultados para esse instante podem ser comparados com os valores encontrados nos cálculos das ligações, nos quais foram utilizadas as equações simplificadas descritas na NBR 7190 (ABNT, 2022). Os valores são semelhantes, o que valida a metodologia aplicada ao estudo.

Quando expostas ao fogo, as ligações sofrem variações em suas seções, causando a perda dessa seção em alguns casos, dependendo da intensidade da temperatura aplicada (Pinto *et al*, 2016; Mahr *et al*, 2020).

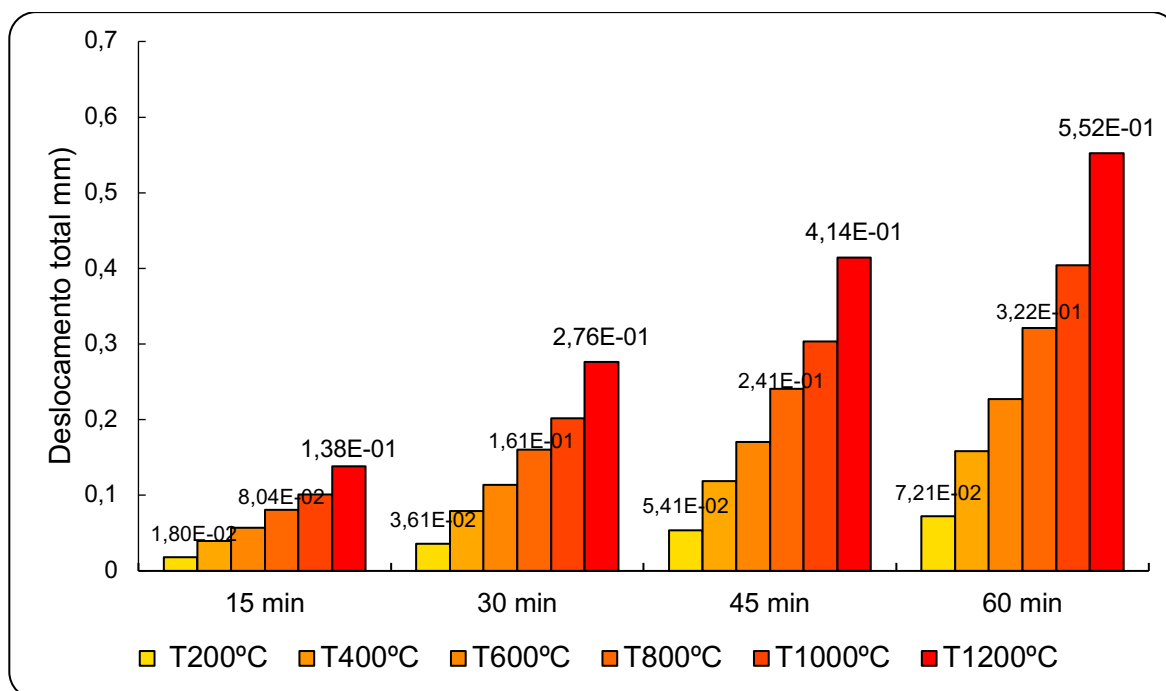
Junto com essa perda, ocorrem deformações e tensões que geram danos à estrutura (Mahr *et al*, 2020; Pereira, 2019). Nas Figura 65, Figura 66 e Figura 67 pode-se observar como os painéis se comportaram à medida que a temperatura aumentava no instante final  $t=3600s$ .

Figura 65 – Deslocamento total – Painel 1 – 3 camadas



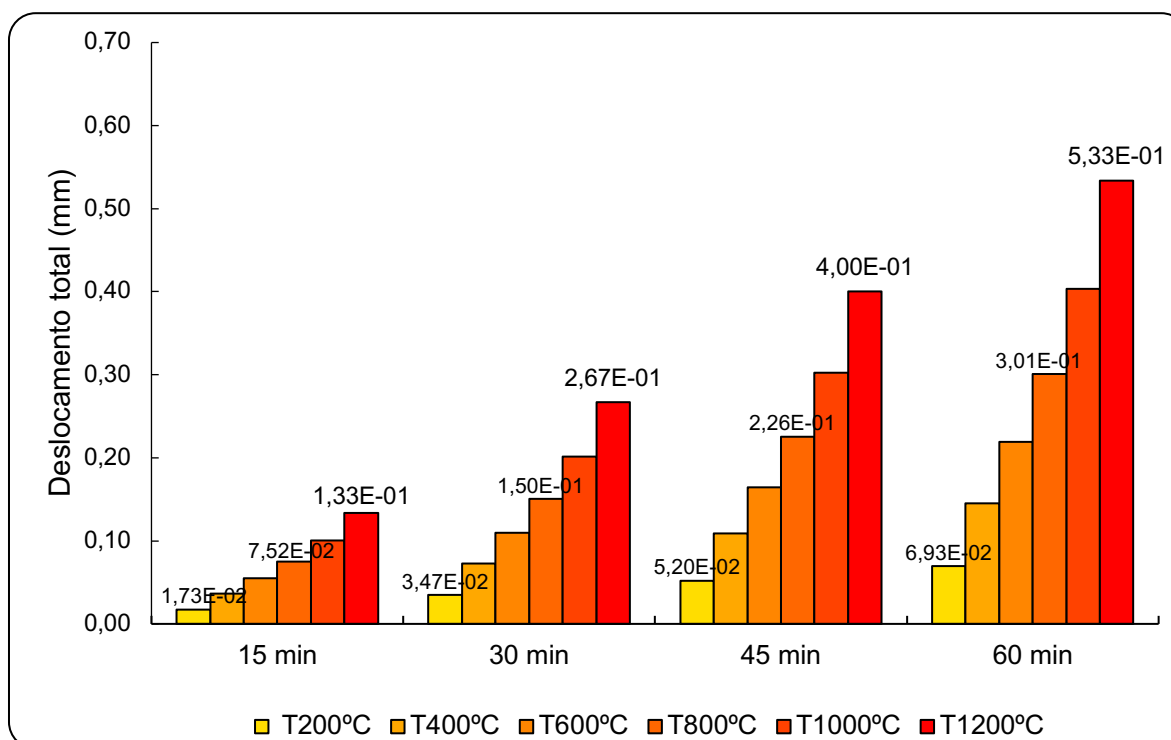
Fonte: autora, 2023

Figura 66 – Deslocamento total – Pannel 2 – 5 camadas



Fonte: autora, 2023

Figura 67 – Deslocamento total – Pannel 3 – 7 camadas



Fonte: autora, 2023

Os resultados apresentados nos gráficos acima seguiram uma distribuição dos deslocamentos nos três painéis de maneira semelhante, ou seja, à medida que o tempo aumentava, os efeitos do carregamento distribuído aplicado e da ação do fogo na estrutura dos painéis se deslocaram de maneira linear.

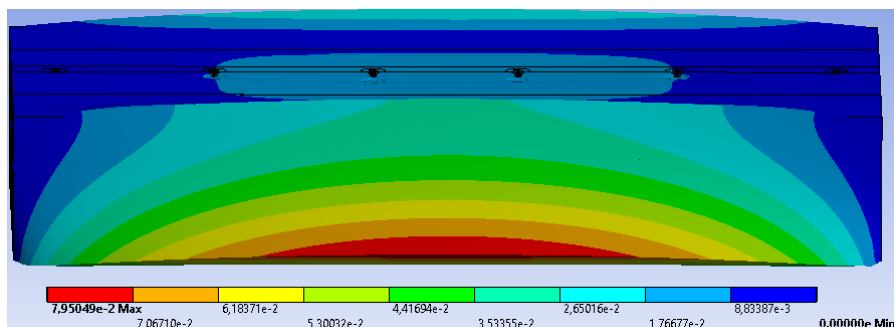
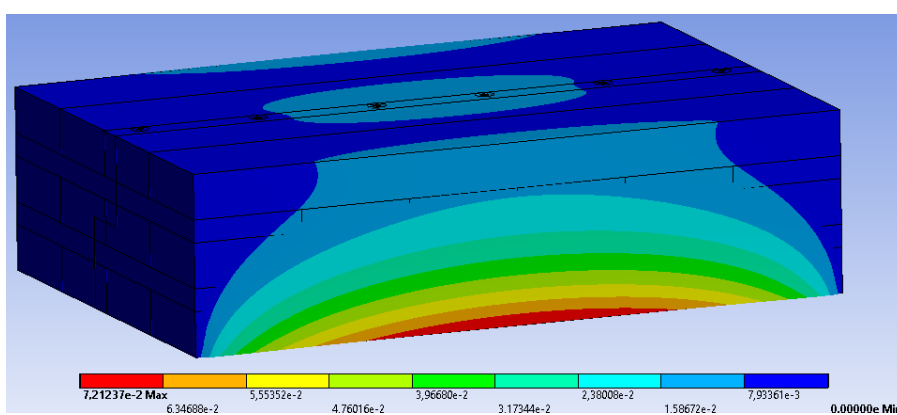
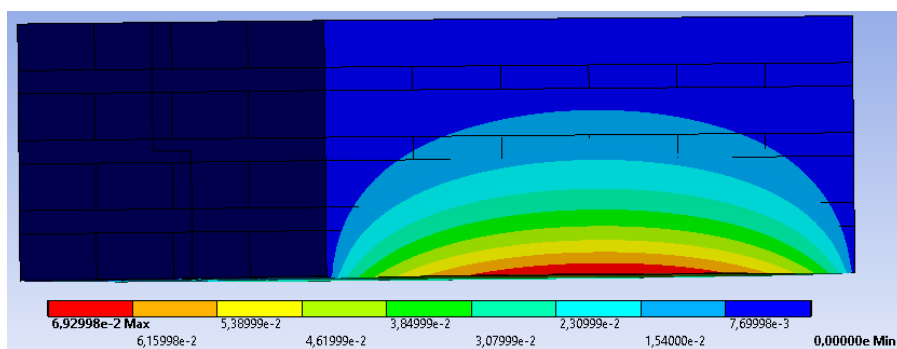
Contudo, o painel 1, com três camadas de lamelas sobrepostas, deslocou-se mais do que os painéis 2 e 3, com 5 e 7 camadas de lamelas sobrepostas. Isso se deve ao fato de que a quantidade de camadas e o tipo de vinculação atribuído influenciam na análise do comportamento estrutural. Dessa forma, para a análise estrutural, que segue os preceitos básicos da rigidez, sua execução está relacionada às forças aplicadas aos deslocamentos e às deformações que são provocadas nos elementos estruturais. (Maggi, 2004)

As Figura 68, Figura 69 e Figura 70 demonstram a comparação dos deslocamentos nos intervalos de temperatura T200°C, T800°C e T1200°C dos três painéis para um instante  $t=3600s$ , demonstrando assim a evolução do deslocamento total dos elementos.

As linhas contínuas aparentes representam o estado inicial dos elementos. À medida que se elevaram as temperaturas, pretendeu-se demonstrar os efeitos dos deslocamentos verticais e como cada painel se comportou com a distribuição dos esforços.

Considerou-se a direção dos esforços na direção z, seguindo o critério de sinais positivos com orientação voltada para cima. Quanto às tensões principais e deformações específicas, não foram objeto deste trabalho, constando como sugestão para trabalhos futuros.

Figura 68 – Deslocamento total dos painéis em T200°C

a) Deslocamento total do painel 3 camadas  $\delta=7,95 \times 10^{-2}$  mmb) Deslocamento total do painel 5 camadas  $\delta=7,21 \times 10^{-2}$  mmc) Deslocamento total do painel 7 camadas  $\delta=6,93 \times 10^{-2}$  mm

Fonte: autora, 2023

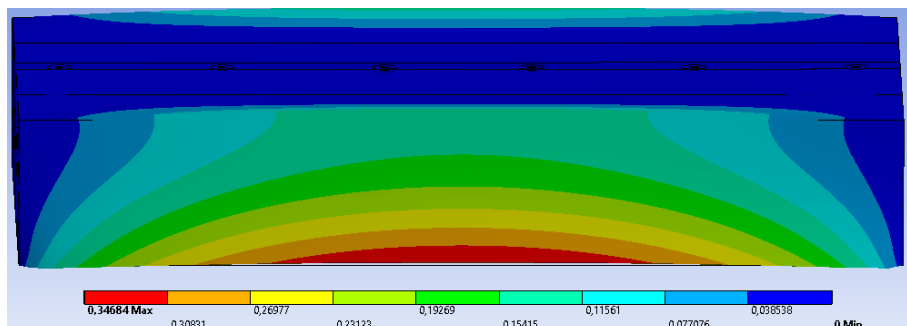
Ao observar os painéis analisados, notou-se que o Painel 3, foi o que menos se deslocou. Seu deslocamento máximo vertical em T1200°C foi de  $5,33 \times 10^{-1}$  mm. Nos painéis 1 e 2, para o mesmo T1200°C, os deslocamentos foram de  $6,15 \times 10^{-1}$  mm e  $5,52 \times 10^{-1}$  mm, respectivamente.

Considerando que os painéis estudados foram tidos como elementos de laje submetidos à flexão, o comportamento observado condiz com os efeitos causados pela ação dos esforços à flexão (Parucker, 2018; Pereira, 2019).

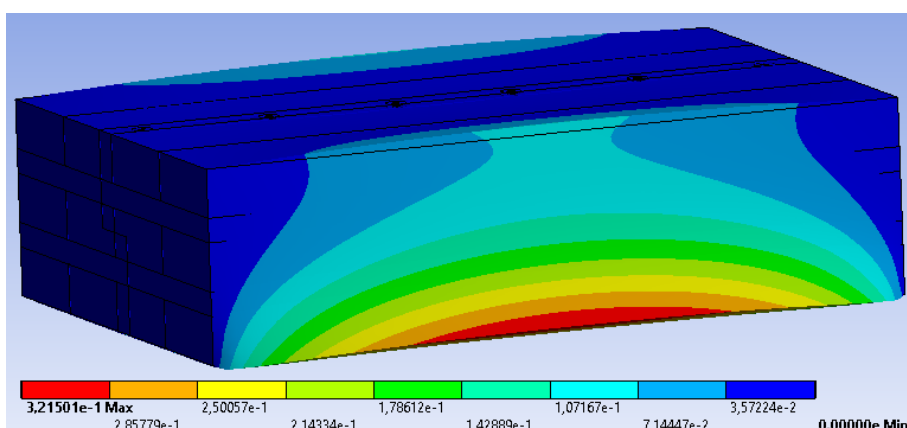
Nota-se que há maior concentração de tensões na parte inferior do painel 1, de três camadas, devido à tensão de tração provocada pelos esforços internos, tendendo a não dissipar para próximo aos apoios de engastamento, os quais produzem menores tensões nessa região (Paracker, 2018).

Figura 69– Deslocamento total dos painéis em T800°C

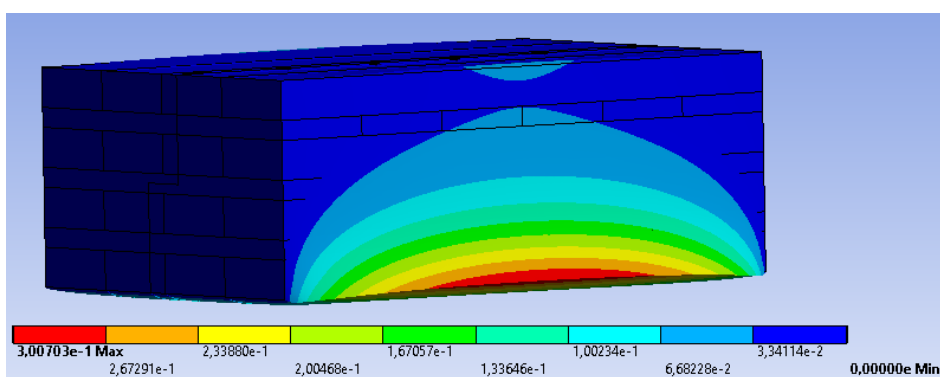
a) Deslocamento total do painel 3 camadas  $\delta=3,47 \times 10^{-1}$  mm



b) Deslocamento total do painel 5 camadas  $\delta=3,22 \times 10^{-1}$  mm



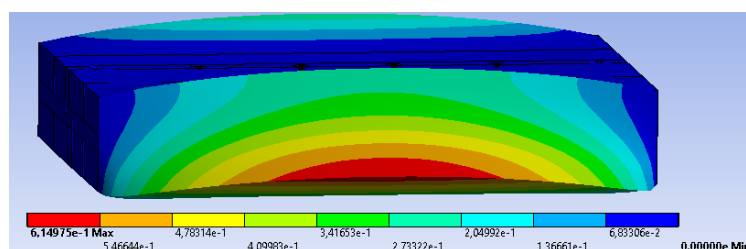
c) Deslocamento total do painel 7 camadas  $\delta=3,01 \times 10^{-1}$  mm



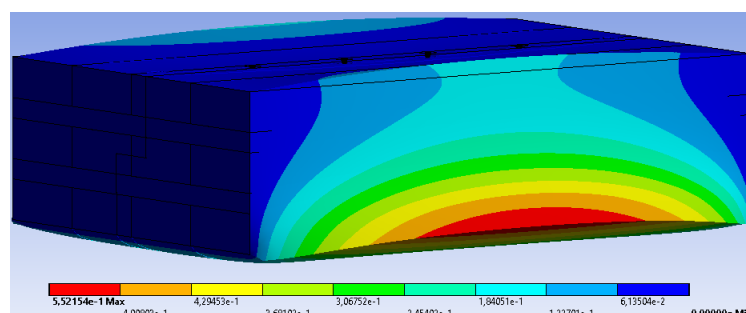
Fonte: autora, 2023

Figura 70 – Deslocamento total dos painéis em T1200°C

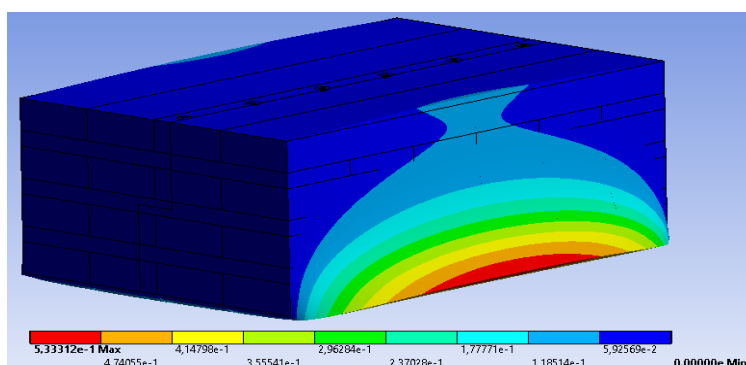
a) Deslocamento total do painel 3 camadas  $\delta=6,15 \times 10^{-1}$  mm



b) Deslocamento total do painel 5 camadas  $\delta=5,52 \times 10^{-1}$  mm



c) Deslocamento total do painel 7 camadas  $\delta=5,33 \times 10^{-1}$  mm



Fonte: autora, 2023

À medida que se aumentava a temperatura, os deslocamentos nos painéis também cresciam, como pode ser percebido nas imagens ilustradas acima. Isso se deve ao fato de que, com o carregamento e o efeito da elevação da temperatura agindo de forma conjunta, a estrutura passa a sofrer esforços e tensões. Isso, por sua vez, pode gerar o deslocamento das lamelas nos elementos de CLT, o que muitas vezes contribui para aumentar a taxa de carbonização (Klippel, 2014, Pinto *et al*, 2018; Oliveira, 2018; Mahr *et al*, 2020).

Pereira (2019) afirma que, para painéis curtos e vãos pequenos, os ensaios à flexão costumam investigar os efeitos de ruptura por cisalhamento, ou seja, *Rolling shear*. Esse efeito, no entanto, não foi abordado neste trabalho.

## 4.5 Resistência mecânica dos parafusos

Da mesma maneira que as placas de madeira se deslocaram com os carregamentos impostos, os parafusos que fizeram parte da ligação também sofreram com esse efeito.

A NBR 7190 (ABNT, 2022), que está fundamentada no Eurocode 5, diz que os critérios de dimensionamento para os principais tipos de ligação em temperatura ambiente dependerão da resistência ao embutimento, bem como do momento resistente do conector (Vairo, 2022).

Assim, foi determinada a resistência das ligações para cada um dos três painéis estudados em situação de incêndio, sendo encontrados 18,7 MPa de resistência ao embutimento e 2150,5 N de força resistente na ligação, conforme descrito no Anexo 1.

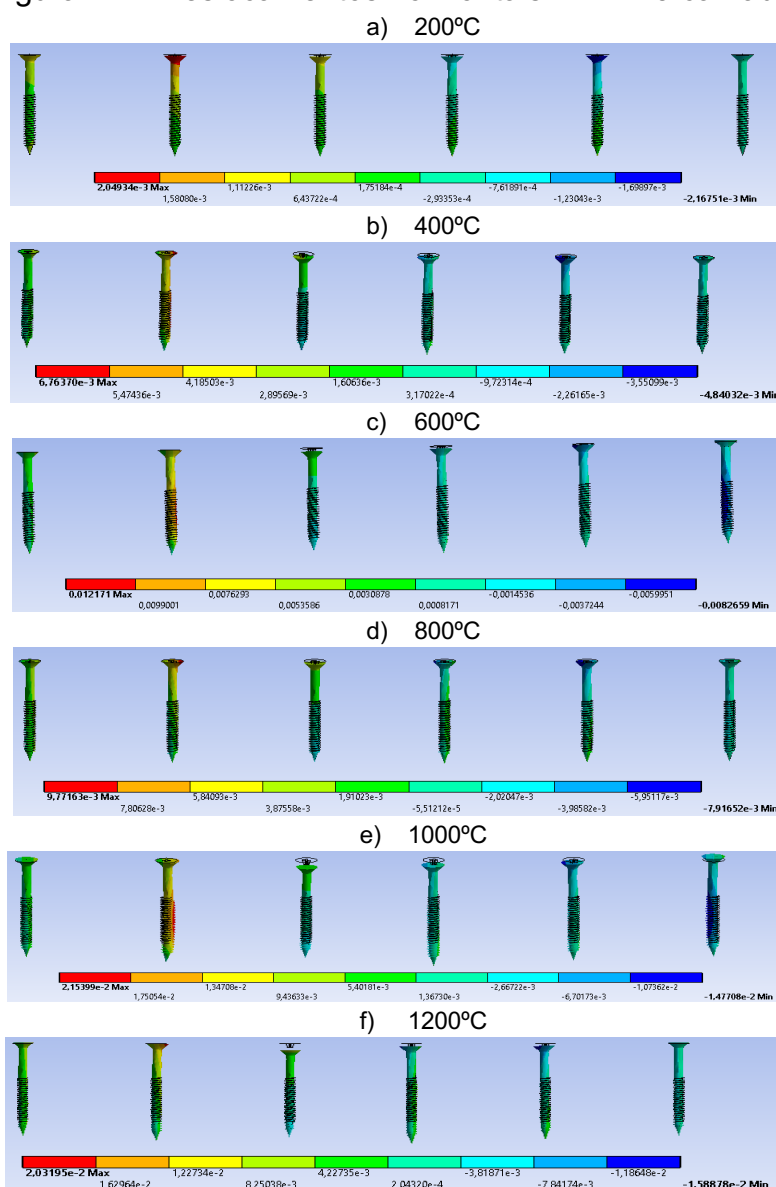
Ao se discutir estruturas de madeira em caso de incêndio, as conexões costumam ser um elemento crítico. Em virtude da alta condutividade térmica dos metais empregados, como o aço ou o alumínio, essas peças, quando expostas ao fogo, tendem a transmitir calor para o interior da madeira, podendo resultar na carbonização ao redor dos conectores, o que pode acarretar a redução ou perda da capacidade resistente e da rigidez da ligação. (FPInovation, 2019; Vairo, 2022)

Outro ponto importante a se verificar são os deslocamentos ou deformações causados pelos carregamentos. Neste estudo foram observados os deslocamentos horizontais e verticais dos parafusos após a ação das cargas e do efeito da elevação de temperatura nos patamares de T200°C a T1200°C para um tempo  $t=3600s$  (60 min).

### 4.5.1 Deslocamentos horizontais nos parafusos

Conforme citado anteriormente, os efeitos dos carregamentos causaram o deslocamento dos parafusos internos nos painéis estudados. À proporção que se aumentavam as temperaturas e o tempo, os parafusos se deslocaram lateralmente (Hassanieh *et al*, 2017; Santos, 2021). As Figura 71, Figura 72 e Figura 73 demonstram a progressão desses deslocamentos lineares para os painéis 1, 2 e 3, respectivamente de 3, 5 e 7 camadas de lamelas.

Figura 71 – Deslocamentos horizontais – P1 – 3 camadas



Fonte: autora, 2023

Considerou-se que os deslocamentos horizontais dos painéis se deram na direção x, bem como as coordenadas admitidas no programa *Ansys*, no qual foi adotado que a direção positiva tinha o sentido para a esquerda.

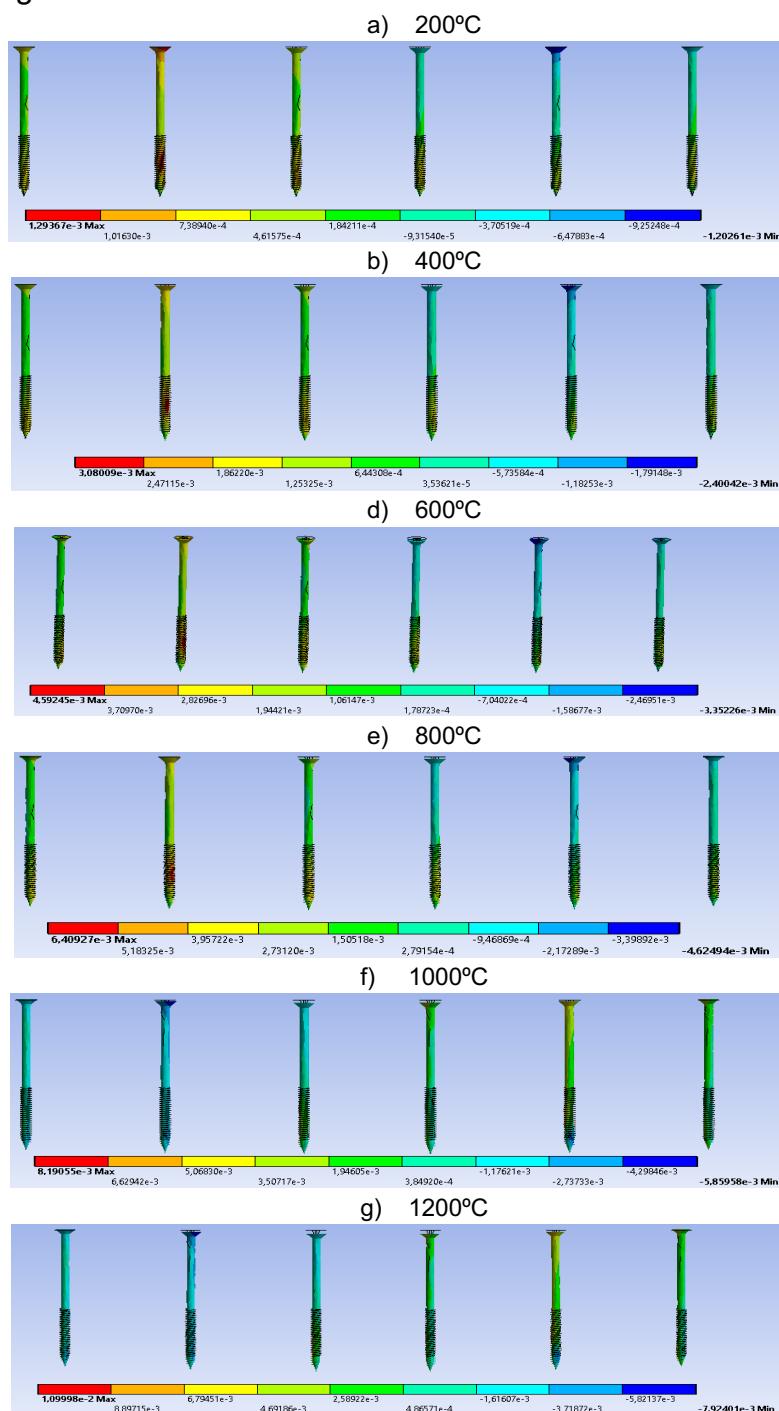
Dessa forma, percebeu-se que no Painel 1 (P1) os deslocamentos foram bem pequenos, com valores variando de  $2,05 \times 10^{-3}$  mm a  $2,03 \times 10^{-2}$  mm entre os patamares de temperaturas de 200°C e 1200°C. Assim, a máxima variação do deslocamento sofrido para os parafusos inseridos no Painel 1 foi da ordem de  $\Delta\delta = 1,82 \times 10^{-2}$  mm. Isso se deve ao fato de que o elemento foi considerado rígido em suas extremidades laterais, sendo tido como bi-engastado, o que dificulta os elementos de ligação se movimentarem internamente. Com isso, os valores das rigidezes das ligações nos



Estados Limites Últimos e de Serviços (ELU e ELS) geram influência em virtude do módulo de deslizamento. (Mahr *et al*, 2020; Santos, 2021).

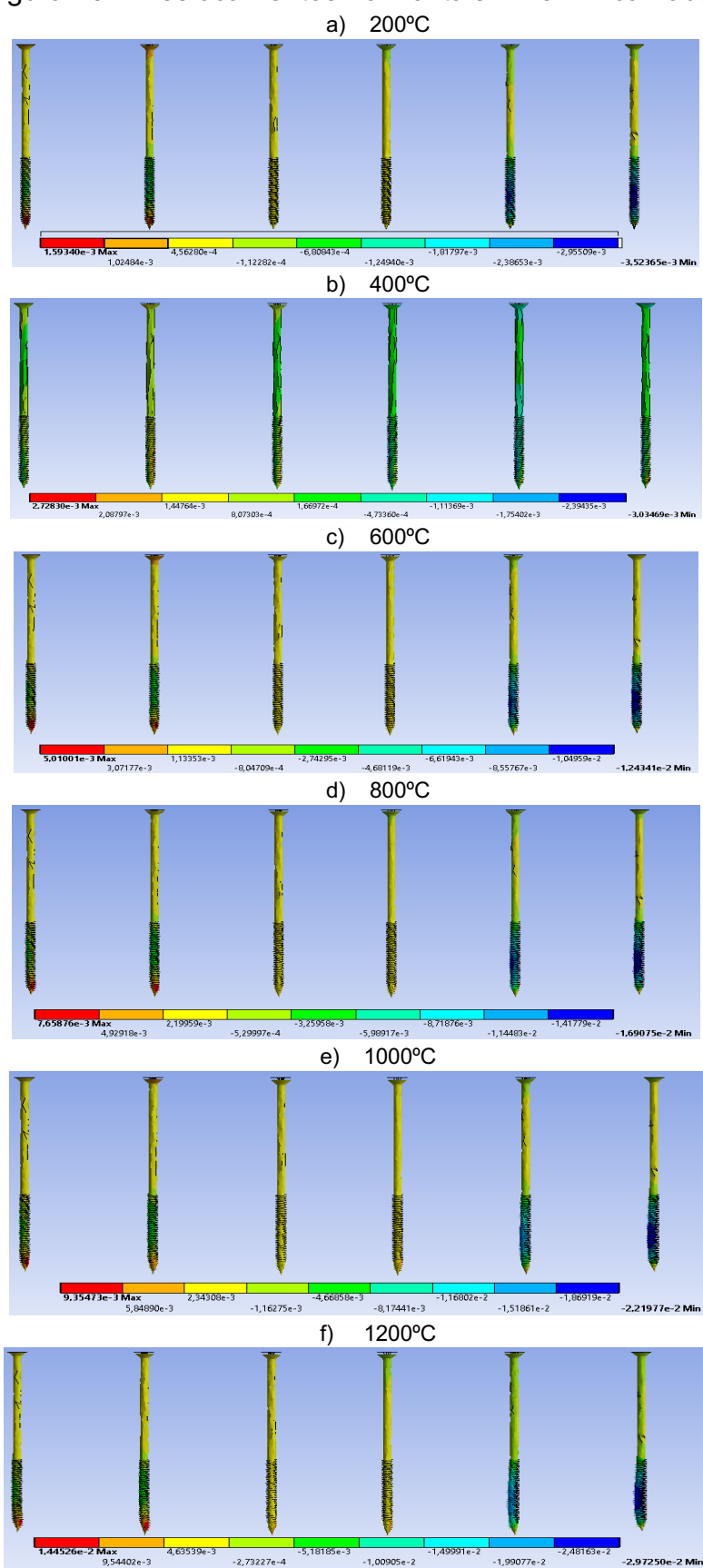
Assim sendo, os esforços gerados provocam um efeito de força de tração nas lamelas longitudinais, ou seja, na direção X, fazendo com que a ligação se desloque horizontalmente, podendo deformar os pinos. (Hassanieh *et al*, 2017; Pereira, 2019)

Figura 72 – Deslocamentos horizontais – P2 – 5 camadas



Fonte: autora, 2023

Figura 73 – Deslocamentos horizontais – P3 – 7 camadas



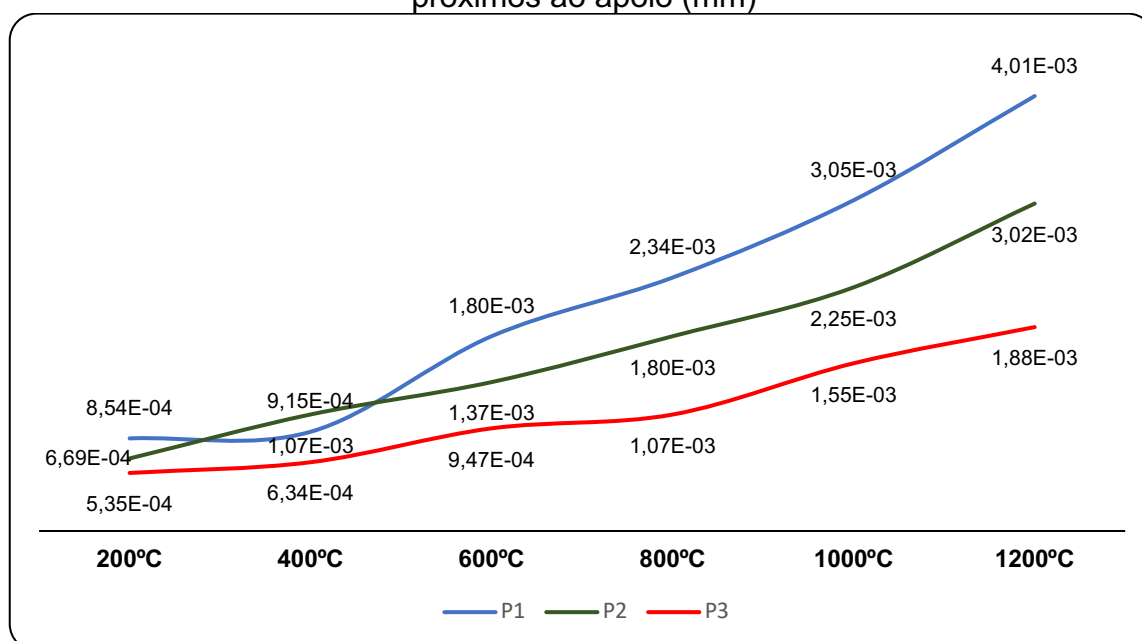
Fonte: autora, 2023

Outrossim, para P2 e P3, o efeito do deslocamento máximo lateral, ou seja, horizontal, também foi bem pequeno, muito em virtude da forma de condição de contorno dos apoios, que foram considerados fixos (Pereira, 2019; Silva, 2020). Os valores obtidos nos intervalos T200°C e T1200°C foram, para o painel 2, com 5 camadas, de  $1,3 \times 10^{-3}$  mm e  $1,1 \times 10^{-2}$  mm; e para o painel 3, com 7 camadas, de  $1,60 \times 10^{-3}$  mm e  $1,44 \times 10^{-2}$  mm. As máximas variações dos deslocamentos ficaram na ordem de  $\Delta\delta = 9,7 \times 10^{-3}$  mm e  $\Delta\delta = 1,3 \times 10^{-2}$  mm, respectivamente.

Isso se explica pelo fato de os elementos de painéis CLT serem compostos por peças de lamelas coladas e cruzadas ortogonalmente entre si, o que faz com que a estrutura seja mais rígida. Quando do dimensionamento dessa rigidez, a NBR 7190 (ABNT, 2022) sugere que seja calculada como peças compostas, seguindo os critérios apresentados na seção 3.2.

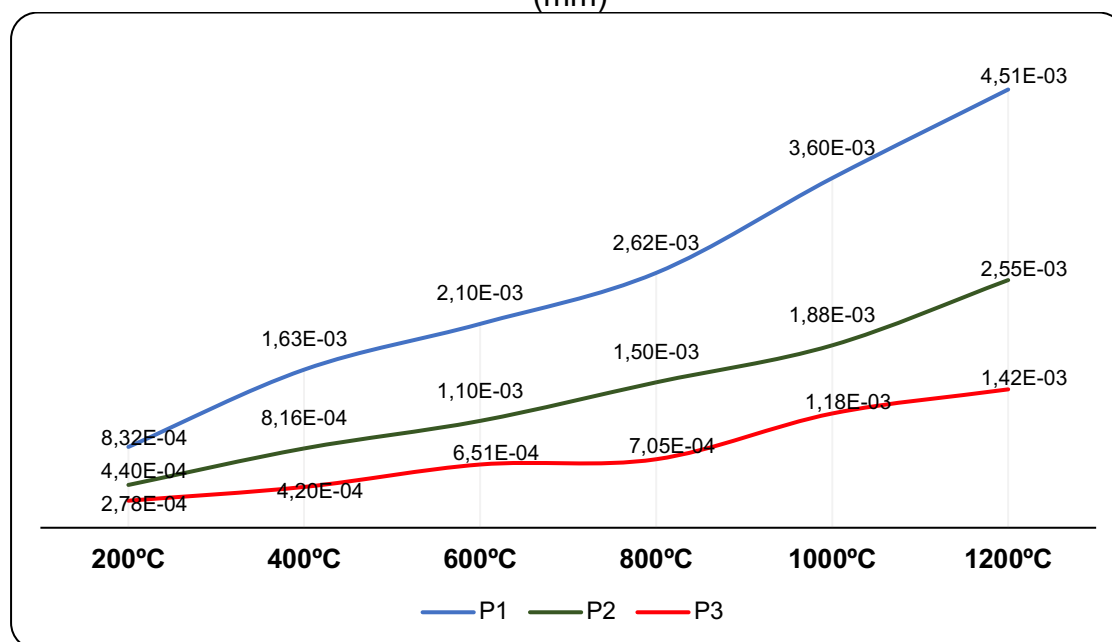
Com o intuito de melhor demonstrar o comportamento dos parafusos quanto ao deslocamento, fez-se uma comparação entre os maiores valores dos elementos mais próximos à extremidade lateral e dos elementos centrais no instante t=60 minutos, como pode ser observado nas Figura 74 e Figura 75, sendo P1, P2 e P3 os painéis de 3, 5 e 7 camadas de espessura.

Figura 74 – Comparação dos deslocamentos horizontais dos parafusos mais próximos ao apoio (mm)



Fonte: autora, 2023

Figura 75– Comparação dos deslocamentos horizontais dos parafusos centrais (mm)



Fonte: autora, 2023

Os esforços internos provocados pelos esforços externos causaram nos parafusos mais próximos das bordas laterais um deslocamento muito pequeno ou quase nulo, devido ao efeito do engaste que gera nos apoios uma condição de impedimento de rotação e translação. Tais deslocamentos nos painéis P1, P2 e P3 foram semelhantes em sua progressão à medida que iam se elevando os patamares de temperaturas. Para tanto, os máximos valores obtidos foram  $4,01 \times 10^{-3}$  mm,  $3,02 \times 10^{-3}$  mm e  $1,88 \times 10^{-3}$  mm, na devida ordem. Comparando os três painéis, chegou-se a um desvio padrão na temperatura de T1200°C de  $8,07 \times 10^{-4}$  (Pereira, 2019).

Nos parafusos mais centrais, esses esforços pouco influenciaram em seus deslocamentos, variando suas máximas, à medida que a temperatura ia se elevando, de  $4,51 \times 10^{-3}$  mm,  $2,55 \times 10^{-3}$  mm e  $1,42 \times 10^{-3}$  mm, para os painéis P1, P2 e P3, nessa ordem. O desvio padrão para os três painéis no intervalo de temperatura T1200°C, no instante  $t=60$ min, foi de  $1,28 \times 10^{-3}$ .

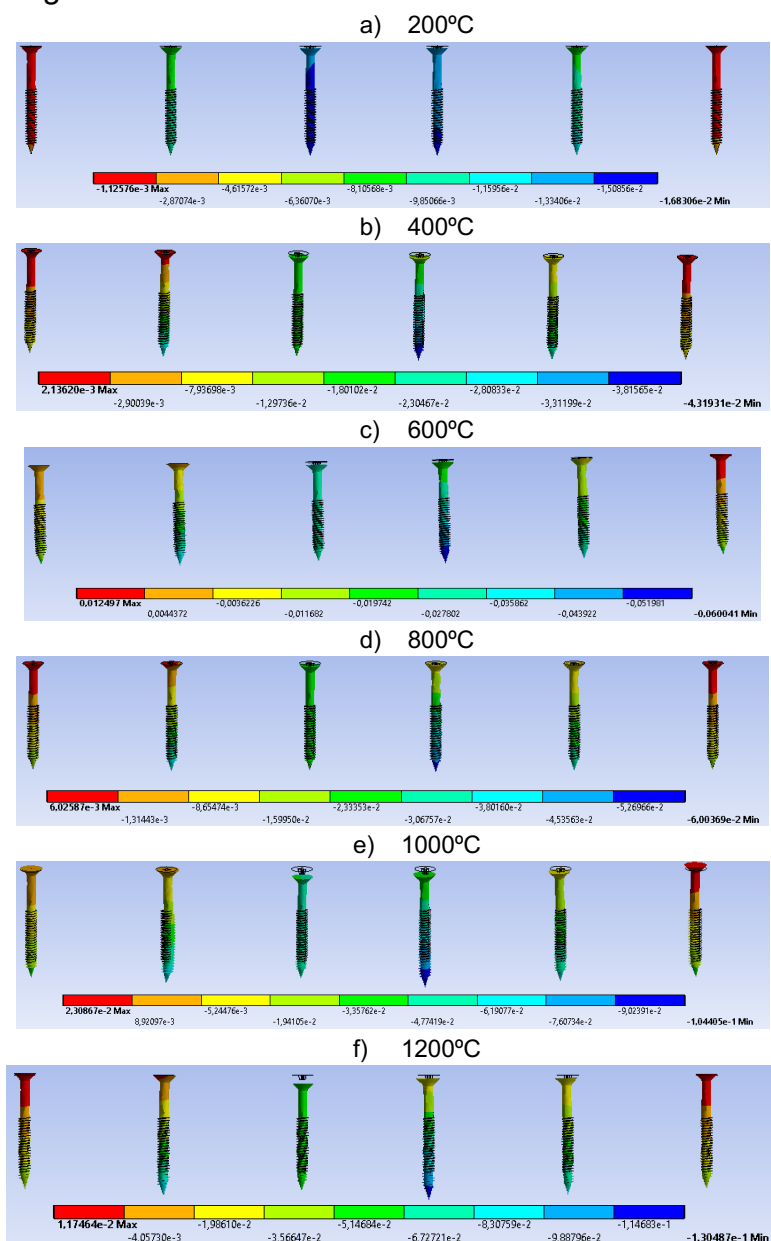
Contudo, outros fatores também influenciam na maneira como os deslocamentos atuam dentro da estrutura, como os diâmetros dos parafusos, os espaçamentos entre si, a disposição em linha de ação para a rigidez, bem como o tempo de exposição ao fogo e a carbonização das lamelas mais expostas (Pinto *et al*, 2004; Pinto, 2005; Östman *et al*, 2017; Silva 2020).

#### 4.5.2 Deslocamentos verticais nos parafusos

Assim como nos deslocamentos horizontais, foi possível perceber que os esforços externos provocados pela ação dos carregamentos e da elevação da temperatura, dentro do tempo de 60 min, tiveram efeito nos deslocamentos verticais.

As Figura 76 a Figura 78 demonstram a sequência dos eventos nos painéis, em relação aos deslocamentos.

Figura 76 – Deslocamento vertical – P1 – 3 camadas



Fonte: autora, 2023

Em decorrência da flexão causada, os parafusos externos, ou seja, mais próximos às extremidades laterais, tenderam a se deslocar para cima, provocando um efeito de arrancamento desses elementos. Todavia, os parafusos mais internos, em virtude do esforço de compressão, tenderam a se deslocar mais para o interior do painel (Östman *et al*, 2017; Santos, 2021).

As linhas contínuas representam o estado inicial dos parafusos antes do início do ensaio. À medida que foram aplicadas as cargas e aumentadas as temperaturas, os parafusos iniciaram seus deslocamentos. O sentido adotado de translação vertical, segundo o critério condicionado pelo programa *Ansys*, foi positivo para cima, na direção z.

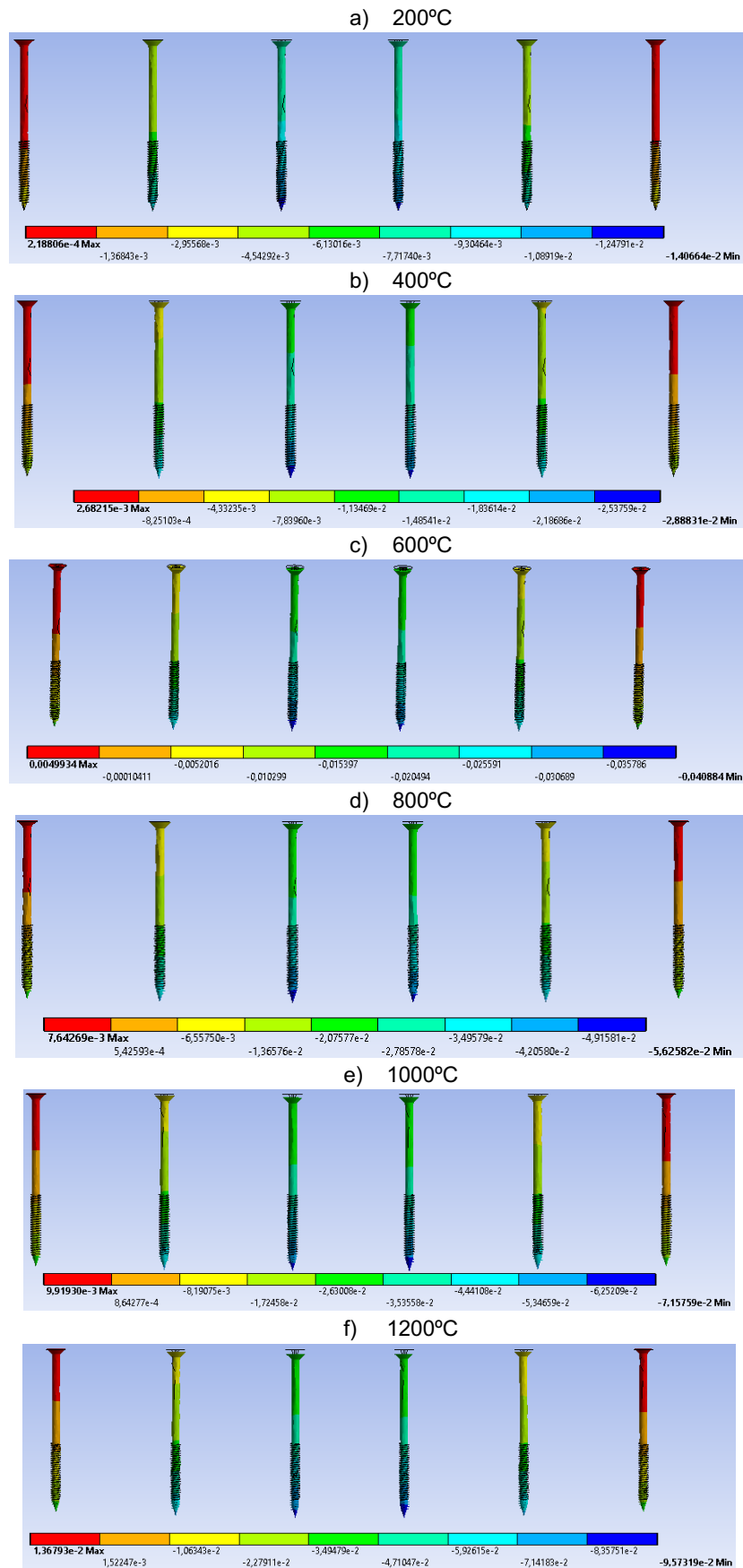
Os parafusos do Painel P1 se apresentaram de forma linear, sem demonstrar grandes deformidades, com uma variação de deslocamento entre os patamares de temperatura de T200°C a T1200°C, no instante t=60min, de  $1,13 \times 10^{-3}$  mm a  $1,17 \times 10^{-2}$  mm.

Nos painéis P2 e P3, à medida que a temperatura se elevava dentro do tempo estimado de 3600s, percebeu-se que os deslocamentos seguiram um padrão bem próximo ao que ocorreria em uma situação real (Palma *et al*, 2019). Apesar de imperceptível, os parafusos mais externos do painel 3 apresentaram um efeito de arrancamento e uma leve deformação curva nas pontas próximas às faces de exposição ao fogo, para as temperaturas T1000°C e T1200°C (Gavric *et al*, 2012; Santos, 2021).

Na temperatura máxima atribuída de T1200°C, no instante t=60min, os valores máximos atingidos para os deslocamentos verticais foram, para o painel P2, de  $1,36 \times 10^{-2}$  mm, e para o painel 3, de  $5,28 \times 10^{-3}$ .

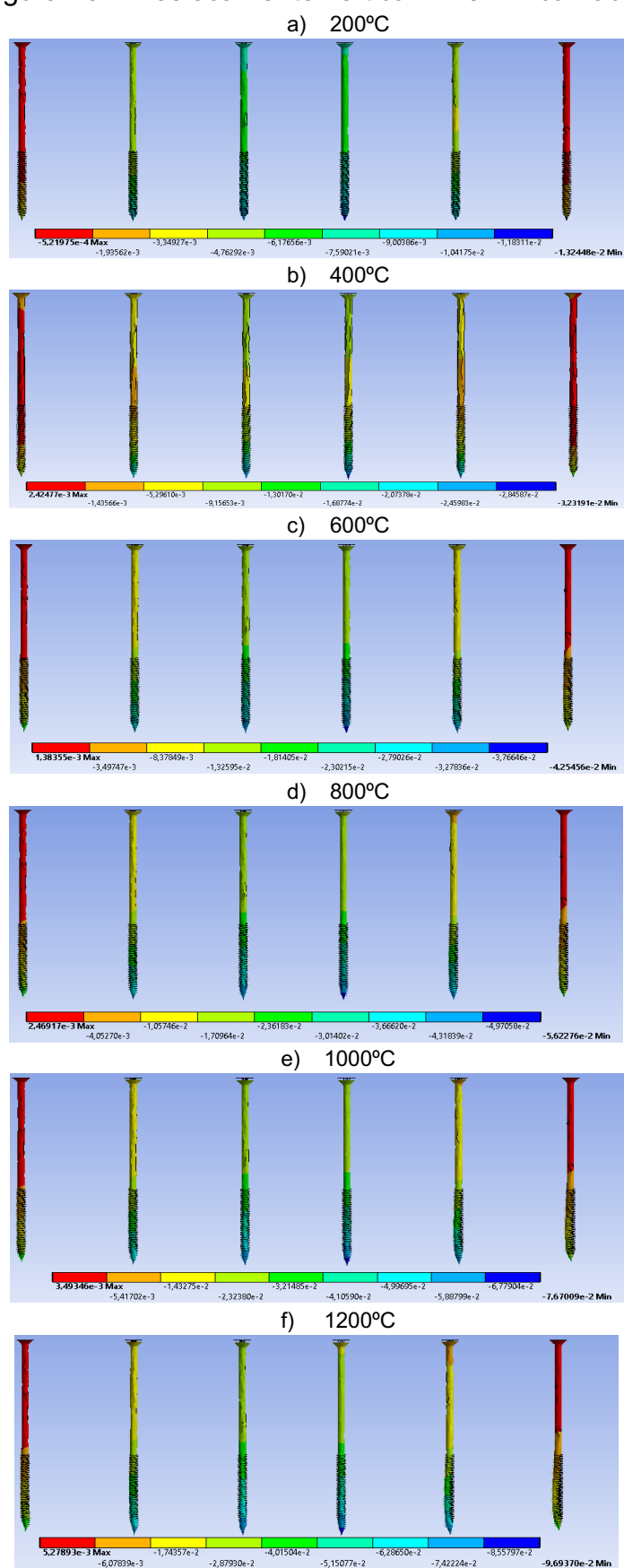
Vale ressaltar que esse comportamento pode ser diferente quando apresentado em um ensaio experimental, devido a fatores como aplicação dos carregamentos nas máquinas de ensaio, calibração, montagem dos painéis, execução, entre outros.

Figura 77 – Deslocamento vertical – P2 – 5 camadas



Fonte: autora, 2023

Figura 78 – Deslocamento vertical – P3 – 7 camadas

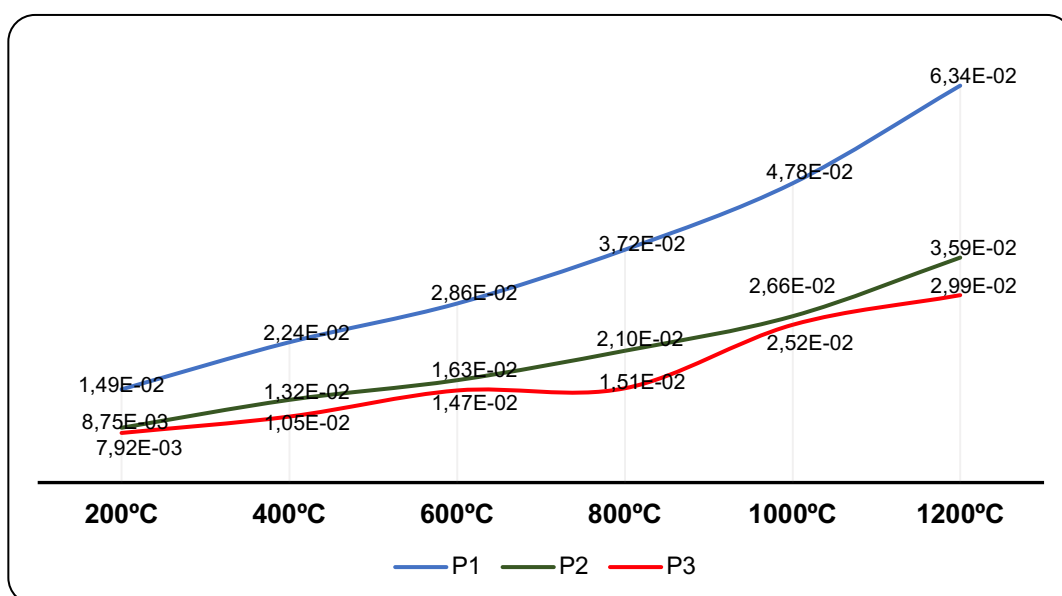


Fonte: autora, 2023



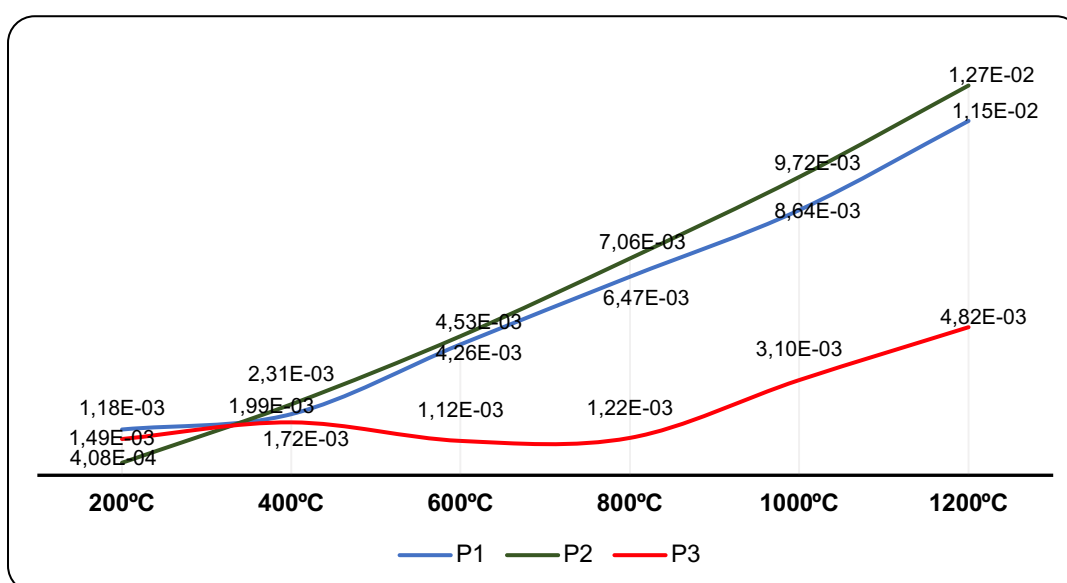
Com o intuito de melhor demonstrar o comportamento dos parafusos quanto ao deslocamento, fez-se uma comparação entre os maiores valores dos elementos mais próximos aos apoios e dos elementos centrais no instante  $t=60$  minutos, como pode ser observado nas Figura 79 e Figura 80, sendo P1, P2 e P3 os painéis de 3, 5 e 7 camadas de espessura.

Figura 79– Comparação dos deslocamentos verticais dos parafusos centrais (mm)



Fonte: autora, 2023

Figura 80 – Comparação dos deslocamentos verticais dos parafusos mais próximos aos apoios (mm)



Fonte: autora, 2023

Ao comparar os valores dos deslocamentos entre os três painéis, é possível perceber que os parafusos centrais apresentaram uma pequena deflexão. O maior deslocamento foi observado em P1, muito em virtude de quantidade de camadas desse painel, sendo seu valor máximo de  $6,34 \times 10^{-2}$  mm (Almeida, 2019; Pereira, 2019). Nos painéis P2 e P3, com número maior de camadas, as deflexões dos parafusos foram da ordem de  $3,59 \times 10^{-2}$  mm e  $2,99 \times 10^{-2}$  mm, respectivamente.

Já nos resultados relacionados aos parafusos mais próximos aos apoios, nota-se que os painéis P1 e P2 seguiram uma evolução muito próxima entre si, correspondendo a uma linearidade. À medida que as temperaturas foram elevadas, observou-se uma máxima deflexão de  $1,15 \times 10^{-2}$  mm para P1, e de  $1,12 \times 10^{-2}$  mm para P2 (Banõ *et al*, 2016).

Quanto ao painel P3, houve uma variação maior entre os patamares de temperaturas, atingindo um valor máximo de deslocamento de  $4,82 \times 10^{-3}$  mm.

## 5 CONCLUSÃO E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve por objetivo investigar o comportamento dos painéis CLT, com variação de espessura, por meio de uma análise numérica computacional dos efeitos termomecânicos das ligações. Com este intuito, realizaram-se simulações computacionais em três modelos de painéis com configurações geométricas semelhantes, ou seja, largura e comprimento de 40x60 cm, mas com variação das espessuras, optando-se por estudar painéis com 3, 5 e 7 camadas.

Foram analisados, de maneira interdependente, (a) os efeitos do aumento da temperatura, em patamares que variaram de T200°C a T1200°C, em um tempo máximo de 60 minutos; (b) o efeito das transferências de calor nas resistências das ligações parafusadas e sua influência nos painéis CLT; e (c) os deslocamentos associados às ações de situação de incêndio com as ações mecânicas.

No que concerne ao estudo (a) dos efeitos do aumento da temperatura com patamares de variação de T200°C a T1200°C, observou-se que:

- À medida que a temperatura ia aumentando nos painéis, a transferência de calor para o interior da seção transversal seguiu uma progressão linear de crescimento. No painel 1, que possuía uma menor quantidade de camadas, observou-se que, ao ser atingido o patamar de T400°C no instante  $t=45$  min, o elemento começou a se carbonizar, ultrapassando o limite de carbonização. Entretanto, para os painéis 2 e 3, com 5 e 7 camadas de lamelas, a intensidade da distribuição de calor para o interior das seções transversais foi menor, mesmo atingindo valores da ordem de 1205°C e 1241°C, no patamar de T1200°C no instante  $t=60$  min. Porém, esses valores foram atingidos nas lamelas mais próximas à região do fogo. Isso se deve ao fato de que a quantidade de camadas influencia na distribuição de calor para o interior da seção transversal.

- Os efeitos térmicos nos parafusos podem ser um ponto de fragilidade nas estruturas expostas diretamente ao fogo. Todavia, para os modelos simulados, a quantidade de camadas contribuiu para a evolução da transferência de calor, inibindo a perda da eficiência dos parafusos. Não obstante, no painel 1, com 3 camadas de lamelas, a transferência de calor afetou os parafusos, fazendo-os atingir uma temperatura máxima de 162,27°C. Mesmo assim eles não ultrapassaram o limite das propriedades elásticas.

- Quanto ao desempenho nos parafusos, como eles estavam protegidos pelas camadas de lamelas, o efeito do aumento da temperatura não ultrapassou o valor máximo de 200°C. De acordo com a ETA (KLH, 2021), conectores embutidos em elementos CLT, enquanto não ultrapassem o valor de 200°C, permanecem com suas propriedades inalteradas. Todavia, é importante lembrar que a influência da ação do fogo pode interferir indiretamente nas condições mecânicas desses materiais.

Com relação ao (b) efeito das transferências de calor nas resistências das ligações parafusadas e sua influência, notou-se que:

- Dentro da seção transversal, foi verificada a transferência de calor em pontos pré-estabelecidos de cada painel, com o intuito de mostrar a proporcionalidade da influência da quantidade de camadas. O painel P1, com 3 camadas, em comparação aos painéis P2 e P3, apresentou valores em que os pontos internos I3 e I4 foram os mais críticos, pois aproximaram-se muito da camada de carbonização. Isso demonstra que no painel P1 houve uma redução da seção transversal maior que nos outros painéis.

- Uma síntese comparativa dos resultados de maior valor nos pontos externos, internos e centrais mostrou que, à proporção que se aumentou a espessura das camadas dos painéis, ou seja, o número de lamelas coladas ortogonalmente, a incidência do calor dentro da seção transversal diminuiu.

- Como a possibilidade de ruína não foi considerada neste estudo, os painéis P1, P2 e P3 apresentaram valores de temperatura nas lamelas centrais próximos ou superiores a 100°C. De acordo com o Eurocode 5, nessa situação pode existir uma perda na resistência e na rigidez da madeira.

Quanto (c) aos deslocamentos devido às combinações de ações mecânicas e de incêndio, constatou-se que:

- Os deslocamentos provocados pelos carregamentos, bem como pela atribuição das vinculações adotadas, mostraram-se de pouca relevância. As deflexões tiveram maior concentração na parte central dos painéis. O painel que mais se deslocou foi P1, de 3 camadas. Ele se deslocou 6,3% a mais em relação ao painel P2, com 5 camadas, e 8,2% a mais em relação ao painel P3, de 7 camadas.

- Os deslocamentos das ligações na direção horizontal (x) provocaram pequenos deslocamentos laterais em todos os três painéis. As máximas variações encontradas para os parafusos foram da ordem de  $\Delta\delta = 1,82 \times 10^{-2}$  mm para P1,  $\Delta\delta =$

$9,7 \times 10^{-3}$  mm para P2 e  $\Delta\delta = 1,3 \times 10^{-2}$  mm para P3, onde P1, P2 e P3 representam respectivamente os painéis com 3, 5 e 7 camadas.

- Os deslocamentos verticais dos parafusos foram considerados na direção z e, semelhantemente aos deslocamentos horizontais, apresentaram pequenas deslocabilidades, atingindo um máximo deslocamento de  $\delta = 1,17 \times 10^{-2}$  mm para os parafusos do painel P1,  $\delta = 1,36 \times 10^{-2}$  mm para os parafusos do painel P2 e  $\delta = 5,28 \times 10^{-3}$  mm para os parafusos do painel P3. Tais valores foram observados principalmente na região central dos painéis, quando eles atingiram o patamar  $T1200^{\circ}\text{C}$  no instante  $t=60$  min.

A elevação da temperatura durante um determinado período pode causar efeitos nas estruturas de madeira CLT, como deslocamento das lamelas, delaminação, perda da seção transversal e deslocamentos em virtude das condições de carregamento e vinculações. No entanto, mesmo diante dessas situações, as estruturas de madeira continuam resistindo e conservando parte de suas propriedades mecânicas.

Dessa forma, considerando tudo o que foi apresentado neste trabalho, conclui-se que, à medida que se aumenta a espessura dos painéis, menores serão as chances de o elemento estrutural ter perdas de rigidez e resistência da madeira. Quanto às ligações, a transmissão do calor no interior do elemento se inibe com quantidade de camadas de lamelas das peças submetidas à situação de incêndio. Há, porém, a influência da intensidade da exposição ao fogo.

Dessa forma, para trabalhos futuros, recomenda-se que sejam desenvolvidos ensaios práticos dos dados apresentados, bem como sejam estudados os efeitos da taxa de carbonização ao redor dos furos dos parafusos ou outros conectores metálicos, para determinar a influência da perda da seção transversal desses materiais na estrutura CLT.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 5628:** Componentes construtivos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 8800:** Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 11711:** Portas e vedadores resistentes ao fogo com núcleo de madeira para compartimentação em depósitos e indústrias - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 14276:** Brigada de incêndio e emergência – Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 14323:** Projeto de estruturas de aço e estruturas mista de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 16143:** Preservação de madeiras – sistemas de categorias de uso. Rio de Janeiro: ABNT, 2013

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 16625:** Método de ensaio e de classificação da reação ao fogo de cortinas – Avaliação das características de ignitabilidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 17144-5:** Proteção contra incêndio de elementos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo

Parte 5: Revestimentos aplicados a elementos de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ARCH DAILY, Stadthaus; Dalston Lane. Disponível em: <https://www.archdaily.cl/cl/02-22097/stadthaus-24-murray-grove-waugh-thistleton-architects>. Acesso em: out. 2021

ALMEIDA, Amanda Ceinoti de. **Aplicação de compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro – GFRP em ligações cavilhadas para CLT**. 2019. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2019

ALMEIDA, Amanda Ceinoti de; SILVA, Ricardo Dias; MOURA, Jorge Daniel de Melo. Potencial de implantação do sistema construtivo Cross Laminated Timber – CLT no Brasil. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.7, n.6, p. 57607-57619, 2021

ALMEIDA, Amanda Ceinoti de; SILVA, Ricardo Dias; MOURA, Jorge Daniel de Melo. Sistemas construtivos em madeira: crescimento eminente ou problema exponencial?. **Concilium**, v. 23, n. 10, ISSN. 0010-5236, 2023.

AMERICAM NATIONAL STANDARD INSTITUTE (ANSI/APA): The Engineered Wood Association. Standard for Performance-Rated Cross-Laminated. **PRG 320-2019**. ANSI/APA. Tacoma, WA, 2019

AMERICAN WOOD COUNCIL (AWC). **Mass timber buildings and the IBC**. Edição de 2021. Estados Unidos da América. International Code Council (ICC), 2020. ISBN 978-1-952468-02-5.

AMERICAN WOOD COUNCIL (AWC). **National design specification (NDS) for wood construction**. Leesburg, Estados Unidos da América, 2018. Disponível em: <http://www.plib.org/staging/wp-content/uploads/2020/09/AWC-NDS2018.pdf>. Acesso em: 20 de jun. 2023.

BANÕ, Vanessa; GODOY, Daniel; VEGA, Abel. Experimental and numerical evaluation of cross-laminated timber (CLT) panels produced with pine timber from thinnings in Uruguay. **Conferência: World Conference on Timber Engineering**. Viena, Austria, 2016.

BITTENCOURT, Marco Lúcio. **Análise computacional de estruturas: Com aplicação dos métodos dos elementos finitos**. 1 ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2010

BRANDNER, Reinhard. Production and technology of Cross- laminated timber (CLT): a state-of-the-art report. *In*: Conference: Focus Solid Timber Solutions – **European Conference on Cross Laminated Timber (CLT)**, Graz, Austria, v. 1, 2013

BRANDNER, Reinhard; FLATSCHER, G., RINGHOFER, Andreas; SCHICKHOFER, Gerhard; THIEL, A. Cross laminated timber (CLT): overview and development. **European Journal of Wood and Wood Products**, v.74, p. 331-335. Doi:10.1007/s00107-015-0999-5, 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00107-015-0999-5>. Acesso em: 2 abr. de 2021.

BRASIL, Reyolando M. L. F.; BALTHAZAR, José Manoel; GÓIS, Wesley. **Métodos numéricos e computacionais na prática de engenharias e ciências**. 1 ed. São Paulo: Blucher, 2015

BRITEZ, Carlos Amado. **Avaliação de pilares de concreto armado colorido de alta resistência, submetidos a elevadas temperaturas**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

BROCK COMMONS TALLWOOD HOUSE. The University of British Columbia (UBC), Vancouver, Canadá. Disponível em: <https://vancouver.housing.ubc.ca/residences/brock-commons/>. Acesso em: out. 2021.

CASAGRANDE, D., POLASTRI, A., SARTORI, T., LOSS, C., CHIODEGA, M. Experimental campaign for the mechanical characterization of connection systems in the seismic design of timber buildings. **World Conf. on Timber Engineering**, Vienna Univ. of Technology, Vienna, Austria, 2016

CAMARGO, Bruna Ferraz; SILVA, Matheus Olivieira; JUCÁ, Tatiana Renata Pereira. **Análise do processo construtivo com o Cross Laminated Timber**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Programa de Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, 2021



CANADIAN STANDARD ASSOCIATION (CSA). **CSA 086**: Engineerin desing in wood. Toronto. Canadá, 2019

CARVALHO, Johnny Soares de. **Fadiga em peças de madeira para uso estrutural**. Tese (Doutorado em Estrutura e Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017

CARRASCO, Edgar Vladimiro Mantilla; OLIVIEIRA, Ana Lúcia Crespo; MANTILLA, Judy Norka Rodo. Influência da temperatura na resistência e no módulo de elasticidade em madeira de híbridos de eucalyptus. **Ciência Floresta**. Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 389-400, abr-jun, 2016. Doi: <https://doi.org/10.5902/1980509822740>

CHRISTOFORO, André Luis; ZANGIÁCOMO, André Luiz; PANZERA, Túlio H.; SILVEIRA, Márcio E.; LAHR, Francisco Antonio. Rocco. Emprego de ferramentas numéricas na avaliação do módulo de elasticidade em vigas roliças de madeira. **Engenharia Agrícola**, v.32, n.5, p.971-980, Jaboticabal-SP, 2012.

CHERY, Rebecca; MANALO, Allan; KARUNASENA, Warn; STRINGER, Geoff. Out-of-grade sawn pane: A state-of-the-art review on challenges and new opportunities in cross laminated timber (CLT). **Construction and Building Materials**, v.211, p. 858-868, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.293>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819307925>. Acesso em: 17 ago. 2023.

COSTA, Ana Alexandra Pontes da. **Construções de edifícios com Cross laminated timber (CLT)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Progama de Pós-Graduação em Construção Civil da Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto. Porto, 2013

CROSSLAM. Conhecendo sobre o Cross Laminated Timber (CLT). 2021. Disponível em: <https://crosslam.com.br/produtos/clt/>. Acesso em: 13 out. 2021

DIAS, Alan. Madeira laminada colada cruzada: produção e desenvolvimento. **Remade**, artigo técnico, 10 de abr. 2018. Disponível em: <https://www.remade.com.br/noticias/14810/madeira-laminadacolada-cruzada:-producao-e-desenvolvimento>. Acesso em: nov. 2021.

DONG, Yu; CUI, Xue; YIN, Xunzhi; CHEN, Yang; GUO, Haibo. Assesment of energy saving potencial by replaying conventional materials by cross laminated timber (CLT) – A case study of office buildings in China. **Applied Science**. v. 9, 858. Doi 10.3390/app9050858, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/5/858>. Acesso em: 1 nov. 2021.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDAR. **EN 1995-1-1**: Eurocode 5: Design of timber structure – Part 1-1. General – Common rules and rules for buildings. CEN. 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDAR. **EN 16351**: Timber Structures – Cross Laminated Timber - Requeriments. CEN. 2015.

ECKER, Taienne Winni Paiz. **Produção e caracterização mecânica de painéis de Cross Laminated Timber (CLT) para aplicação como placas de piso**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2017

ESPINOZA, Omar.; TRUJILLO, Vladimir Rodriguez.; MALLO, Maria Ferndand Laguarda; BUEHLMANN, Urs. Cross laminated timber: Status and Reseach needs in Europe. **BioResources**. v.11, p. 282-295, 2016

FALK, Andreas; DIETSCH, Philipp; SCHMID, Joachim. Cross-Laminated Timber – A competitive wood product for visionary and fire safe buildings. **KTH Royal Institute of Technology**, ISBN: 978-91-7729-043-8, Estocolmo, Suécia, 2016.

FELIX, Patrícia Meira de Alcântara Costa. **Parâmetros de projeto para seguraaça contra incêndio do sistema construtivo em Cross Laminated Timber (CLT)**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020

FELIX, Patrícia Meira de Alcântara Costa; ONO, Rosaria; DE OLIVIEIRA, Fabiana Lopes. Aplicação dos requisitos de proteção passiva para Cross-Laminated Timber – CLT segundo a ABNT NBR 15575:2021. **Gestão & Tecnologia de Projetos**. São Carlos, v. 17. n. 4, 2022. Doi: <https://doi.org/10.11606/gtp.v17i4.196689>.

FIGUEROA, Manuel Jesus Manriquez; MORAES, Poliana Dias. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 4, p. 157-174, Porto Alegre, 2009.

FLATSCHER, George; BRATULIC, Katarina; SCHICKHOFER, Gerhard. Experimental test on cross-laminated timber joints and walls. **Structural and Building**, v. 168, Issue SB11, 2015.

FRAGIACOMO, Massimo; MENIS, Agnese; CLEMENTE, Isaia; BOCHICCHIO, Giovanna; CECCOTTI, Ario. Fire resistance of Cross-Laminated Timber panels loaded out of plane. **Journal of Structural Engineering**, v. 139, Issue 12, Doi:10.1061/(asce)st.1943-541x.0000787, 2013. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29ST.1943-541X.0000787>. Acesso em: 11 jan. de 2022.

FRANGI, Andrea; FONTANA, Mario; HUGL, Erich; JÖBSTL, Robert. Experimental analysis of cross-laminated timber panels in fire. **Fire Safety Journal**, v. 44, p. 1078-1087, 2009.

FRANZONI, Lorenzo; LEBÉE, Arthur; LYON, Florent; FOREST, Gilles. Bending behavior of regular spaced CLT panels. **Conferência: World Conference on Timber Engineering**. Viena, Austria, 2016.

FPINNOVATIONS. **CLT Handbook: Cross Laminated Timber**. FPInnovations. Canadá, 2019.

GAVRIC, Igor; FRAGIACOMO, Massimo; CECCOTTI, Ario. Strength and deformation characteristic of typical X-Lam connections. **Conference: 12<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering**, Auckland, New Zealand, 2012.

GAVRIC, Igor, FRAGIACOMO, Massimo; CECCOTTI, Airo. Cyclic behavior of CLT wall systems: Experimental tests and analytical prediction models. *J. Struct. Eng*, 2015a. Doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001246, 04015034.

GIORGIO, Rodrigo de Souza N.; QUIRINO, Vinícius Algarte; MEIRELLES, Regina Célia Moretti. Contexto para a utilização da madeira como sistema estrutural em

edifícios habitacionais. **Brazilian Journal of Development**. Curitiba, v.6, n. 3, p. 9760-9775, mar. 2020

GOMES, Carlos Misael Silva. **Análise térmica e mecânica de ligações aço-madeira solicitadas à tração e ao fogo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação do Instituto Superior de Engenharia do Porto, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal, 2022.

HASSANIEH, A.; VALIPOUR, H. R.; BRADFORD, M. A.; SANDHAAS, C. Modelling of steel-timber composite connections: Validation of finite element model and parametric study. **Engineering Structures**, v. 138, p. 35-49, 2017.

HE, Minjuan; SUN, Xiaofeng; LI, Zheng. Bending and compressive properties of cross-laminated timber (CLT) panels made from Canadian hemlock. **Construction and Building Materials**. v.185, p. 175-183, 2018.

IMARC GROUP. Global cross-laminated timber market to grow at 13,2% during 2020, Boosted by increasing demand from construction sector. **Chemical & Materials**. Disponível em: <https://www.imarcgroup.com/cross-laminated-timber-manufacturing-plant>. Acesso em: jan 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATIONS (ISO). **ISO 834**: Fire resistance test – Elements of building construction. International Organization for Standardizations. Switzerland, 1999.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATIONS (ISO). **ISO 8421-1**: Fire Protection Part 1: General terms and phenomena of fire. International Organization for Standardizations. Switzerland, 1987.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATIONS (ISO). **ISO 16696-1**: Timber structures – Cross Laminated Timber – Part 1: Component performance, production requirements and certification scheme. International Organization for Standardizations. Switzerland, 2019

IZZI, Matteo; POLASTRI, Andrea; FRAGIACOMO, Massimo. Investigating the hysteretic behavior of Cross-Laminated timber wall systems due to connections. **Journal of Structural Engineering**, v. 144, Issue 5. Doi: 0.1061/(asce) st.1943-541x-

0002022, 2018. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29ST.1943-541X.0002022>. Acesso em: 25 out. De 2021.

JAUKE, G. **CLT capacity expected to double until 2022**. 2020. Disponível em: <https://www.timber-online.net> > Acesso em out. 2021

KÖNIG, Jürgen; WALLEIJ, Lars. One-dimensional charring of timber exposed to standard and parametric fire in initially unprotected and postprotection situations. **Institute för Träteknisk Forskingsk**, ISSN: 1102-1071, Estocolmo, Suécia, 1999.

KLIPPEL, Michael. **Fire safety of bonded structural timber elements**. Tese (Doutorado em Ciência) – Programa de Pós-Graduação da Universidade ETH Zurique, Zurique, Suíça, 2014. Doi: <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010171655>

KLIPPEL, Michael; SCHMID, Joachim. Design of Cross-Laminated Timber in fire. **Structural Engineering International**, v. 27, p. 224-230, 2018. Doi: DOI: 10.2749/101686617X14881932436096

LAGNER, T. M., FLATSCHER, G.; SCHICKHOFER, G. Combined loading of self-tapping screws. **World Conf. on Timber Engineering**, Vienna Univ. of Technology, Vienna, Austria, 2016.

LIU, J., LAM, F. Experimental test of Cross Laminated Timber connections under bi-directional loading. **World Conf. on Timber Engineering**, Vienna Univ. of Technology, Vienna, Austria, 2016.

MAHR, Kolton; SINHA, Arijit; BARBOSA, Andre R. Elevated temperature effects on performance of a cross laminated timber floor-to-wall bracket connections. **Journal of Structure Engineering**, v. 146, Issue 9. Doi:10.1061/(asce)st.1943-541x-0002737, 2020. Disponível em: [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002737](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002737). Acesso em: 24 set. de 2021.

MARTINS, Gisele Cristina Antunes. **Análise numérica e experimental de vigas de madeira laminada colada em situação de incêndio**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – Estrutura) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e

Área de Concentração em Estrutura, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016

MALLO, Maria Fernanda Laguarda; ESPINOZA, Omar. Awareness, perceptions and willingness to adopt Cross-Laminated Timber by the architecture community in the United States. **Journal of Cleaner Production**, v. 94, p.198-210. Doi: 10.1016/j.jclepro.2015.01.090, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652615001031>. Acesso em: 10 jan. de 2022.

MELO, Rafael Rodolfo de; MENEZZI, Cláudio Henrique Ssoares Del. Comportamento reológico da madeira e derivados. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v.1, n.01, p. 25-40, 2010.

MENDES, Rodrigo Adolfo Benitez. **Comportamento estrutural de painéis Cross-Laminated Timber sob cargas perpendiculares ao seu plano: abordagem experimental e numérica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

MOHAMMAD, Mohammad; GAGNON, Sylvain; BRADFORD, Douglas K.; PODESTO, Lisa. Introduction cross laminated timber. **Wood desing focus**, v.22, n.2, 2012

MOHAMMAD, Mohammad; NI, Chun; MUNHOZ, Williams. Connections in cross-laminated timber building. **Canadian CLT Handbook**, v.1,ISSN 1925-0517, 2019

MOLINA, Julio Cesar; CALIL JR, Carlito. Sistema construtivo em wood frame para casas de madeira. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, Londrina, v.31, n.2, p. 143-156, 2010

MOLINA, Julio Cesar; CALIL JÚNIOR, Carlito.; KAMURA, Erica Fernanda Aiko.; PINTO, Edna Moura; REGOBELLO, Ronaldo. Análise numérica do comportamento de elementos e madeira em situação de incêndio. **Floresta e Ambiente**, v. 19, p. 162-170, 2012. Doi: <http://dx.doi.org/10.4322/floram.2012.019>

MORAES, Poliana Dias de, RODRIGUES, João Paulo Correia; SANTOS, Suzana Otero. Estudos paramétricos do comportamento o fogo de elementos de madeira. *In:*

Conference: CILAMCE 30 – **Congresso Ibero-Latino-Americano em Métodos Computacionais para Engenharia**, 2009, Brasil.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF CANADA. British Columbia Building Code. Disponível em: <https://www.bccodes.ca/building-code.html>. Acesso em: 20 de jun. 2023.

OLIVEIRA, Gabriela Lotufo. **Cross laminated timber (CLT): processo construtivo e desempenho**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2018

ÖSTMAN, Birgit; BRANDON, Daniel.; FRANTZICH, Håkan. Fire safety engineering in timber buildings. **Fire Safety Journal**, v. 91, p. 11-20. Doi:10.1016/j.firesaf.2017.05.002, jul. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0379711217302977>. Acesso em: 5 abr. De 2021.

ÖSTMAN, Birgit. National fire regulations for the use of wood in building – worldwide review 2020. **Wood Material Science & Engineering**. Växjö, Sweden, 2021. Doi: 10.1080/17480272.2021.1936630

PALMA, Pedro. **Fire behaviour of timber connections**. Tese (Doutorado em Ciência) – Institute of Structural Engineering – ETH Zurich, Zurich, Suíça, 2016. Doi: <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010836621>

PALMA, Pedro; FRANGI, Andrea. Modelling the fire resistance of steel-to-timber dowelled connections loaded perpendicular to the grain. **Fire Safety Journal**, v. 107, p. 54-74, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/journal/fire-safety-journal>. Acesso em: 14 dez. de 2022.

PASSARELLI, Rafael Novais. **Cross Laminated Timber: diretrizes de painel maciço de madeira no Estado de São Paulo**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013

PEREIRA, Marcos Cesar de Moraes. **Metodologia para estudo da caracterização estrutural de painéis de Madeira Laminada Colada Cruzada**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

PEREIRA, Marcos Cesar de Moraes; CALIL JÚNIOR, Carlito. Comparativos entre painéis de Cross Laminated Timber (CLT) produzidos no Brasil. **Congresso CLEM+CIMAD**, II Congresso Latinoamericano de Estruturas de Madeira e II Congresso Ibero-Latinoamericano de Construções em Maderia, Buenos Aires, Argentina, 2017.

PEREIRA, Marcos Cesar de Moraes. **Painel estrutural de madeira maciça tipo DCLT: Estudo experimental, analítico e numérico de dois painéis de lamelas cruzadas como ligações cavilhadas**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

PINTO, Edna Moura; MACHADO, Gilmara de Oliveira; FELIPETTO, Roberta Pacheco Francisco; CHRISTOFORO, André Luis; LAHR, Francisco Antonio Rocco; CALIL Junior, Carlito. Thermal degradation and charring rate of *Corymbia citriodora* and *Eucalyptus grandis* wood species. **The Open Construction and Building Technology Journal**. Bussum, Holanda. v.10, p. 450-456, 2016. Doi: 10.2174/1874836801610010450

POPOVSK, Marjan; SCHNEIDER, Johannes; SCHWEINSTEIGER, Matthias. Lateral load resistance of cross-laminated wood panels. **World Conference on Timber Engineering**, FPInnovation, Vancouver 2010

POZZA, L., MASSARI, M., SAVOIA, M., FERRACUTI, B. Experimental campaign of mechanical CLT connections subjected to a combination of shear and tension forces. **Struct. Archit. Beyond Limits**, p. 110–118, 2016a.



RINALDIN, G., AMADIO, C., FRAGIACOMO, M. A component approach for the hysteretic behaviour of connections in cross-laminated wooden structures. **Earthquake Eng. Struct. Dyn.**, v. 42, p.2023–2042, 2013.

ROTHOBLAAS. Produtos de fixação. Disponível em: <https://www.rothoblaas.pt/produtos/fixacao/parafusos/parafusos-carpintaria/hbs>. Acesso em: 20 fev. de 2023.

SABBATINI, Fernando Henrique. **Desenvolvimento de métodos, processo e sistemas construtivos: formulação e aplicação de uma metodologia**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989

SANBORN, Kathryn; GENTRY, T. R.; KOCH, Z.; VALKENBURG, A., CONLEY, C.; STEWART, Lauren K. Ballistic performance of cross laminated timber (CLT). **International Journal of Impact Engineering**. Doi: 10.1061/j.ijimeng.2018.11.007, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X1830469X>. Acesso em: 2 nov. 2021.

SALGADO, Rafael A.; GUNER, Serhan. Characterization of the out-of-plane behavior of CLT panel connections. **Engineering Structure**, v. 229, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029620341973>. Acesso em: 1 fev. de 2021.

SCHMID, Joachim; KLIPPEL, Michael; JUST, Alar; FRANGI, Andrea; TISO, Mattia. Simulation of the fire resistance of cross-laminated timber (CLT). **Fire Technology**, v. 54, p 1113-1148. Doi:10.1007/s10694-018-0728-9, 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10694-018-0728-9>. Acesso em: 24 nov. de 2021.

SILVA, Thiago Damasceno. **Influência dos modelos de carbonização na análise não-linear geométricas de treliças de madeira em situação de incêndio**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022.

SOARES, Paulo Tarso Machado Leite; JÚNIOR, Carlos Roberto Cordeiro; SILVA, Wendna Cristina Rocha. Uso da madeira na construção civil. **Projectus**, Rio de Janeiro, v.2, n.4, p. 79-93, 2017.

STOLF, Denise Ortigosa; BERTOLINI, Marília da Silva; FERRO, Fabiane Sales; CHRISTOFORO, André Luis; LAHR, Francisco Antonio Rocco. Influência do teor de umidade na propriedade de tenacidade de espécies florestais. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n.4, p. 501-508, 2014

THOMAS, P. H.; BULLEN, M. L.; QUINTIERE, J. G.; McCAFFREY, B.J. Flashover and instabilities in fire behavior. **Combustion and Flame**, v.38, p. 159-171, 1980. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0010218080900486>. Acesso em: 24 mar. de 2022.

TOMASI, R., SMITH, I. Experimental characterization of mon- otonic and cyclic loading responses of CLT panel-to-foundation angle bracket connections. **J. Mater. Civ. Eng.** 2015. Doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943- 5533.0001144, 04014189.

VAIRO, Maurizio. **Sobre o comportamento dos painéis CLT em situação de incêndio**. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

VILELA, Ramon; MASCIA, Nilson Tadeu. Avaliação de propriedades mecânicas de *Pinus taeda* provenientes de placas de cross laminated timber. **Ambiente Construido**, Porto Alegre, v.21, n.4, p. 89-110, 2021

WHITE, Robert H.; DIETENBERGER, Mark A. Fire safety of wood construction. **Materials Science**, cap. 18, p. 1-18, 2010.

YANG, Yi; FENEMORE, Chiaki; KINGAN, Michael J.; MACE, Brian R. Analysis of the vibroacoustics characteristics of cross laminated timber panels using a wave and finite element method. **Journal of Sound and Vibration**, v. 494, Março 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022460X20306714#!>. Acesso em: 11 jan. de 2022.

## ANEXO 1

Dimensionamento das ligações

1-Foi considera painel de dimensões 40x60 cm. Classe 2 de umidade, classe de carregamento longa duração, edificação

| Painel 1 - 3 camadas |                |                        |                       |
|----------------------|----------------|------------------------|-----------------------|
| Camadas              | Espessura (cm) | E <sub>0,m</sub> (MPa) | G <sub>90</sub> (MPa) |
| L1                   | 4              | 12000                  | 0                     |
| T1                   | 2              | 0                      | 800                   |
| L2                   | 4              | 12000                  | 0                     |

2- Os cálculos foram feitos tendo como base a NBR 7190/2022 bem como as NBR 6120, 6123 e 8681, para o cálculo dos carregamentos.

3- Cálculo para o Estado Limite Último - ELU

$$R_d \geq S_d$$

3.1 - Propriedades da madeira

| f <sub>b,k</sub> (MPa) | f <sub>v,k</sub> (MPa) | f <sub>t0,k</sub> (MPa) | f <sub>c0,k</sub> (MPa) | f <sub>t90,k</sub> (MPa) | f <sub>c90,k</sub> (MPa) | E <sub>0,m</sub> (MPa) | E <sub>0,05</sub> (MPa) | ρ <sub>0,m</sub> (MPa) | ρ <sub>m</sub> (MPa) | k (kg/m <sup>3</sup> ) | ρ <sub>m</sub> (kg/m <sup>3</sup> ) |
|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|----------------------|------------------------|-------------------------------------|
| 30                     | 4                      | 18                      | 23                      | 0,4                      | 2,7                      | 12000                  | 8000                    | 400                    | 800                  | 380                    | 460                                 |

esp. mad. = 4,5 kN/m<sup>3</sup> γ = 1,4 - tensões norm: γ = 1,8 - tensões de cisalhamento

Carga permanente = 1,5 kN/m<sup>2</sup>

Carga acidental = 2,5 kN/m<sup>2</sup>

$$K_{mod} = K_{mod1} \times K_{mod2}$$

|                    |                    |
|--------------------|--------------------|
| K <sub>mod,1</sub> | K <sub>mod,2</sub> |
| 0,7                | 0,9                |

$$K_{mod} = 0,63$$

Resistencias de projeto

| f <sub>b,d</sub> (MPa) | f <sub>v,d</sub> (MPa) | f <sub>t0,d</sub> (MPa) | f <sub>c0,d</sub> (MPa) | f <sub>t90,d</sub> (MPa) | f <sub>c90,d</sub> (MPa) |
|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 13,5                   | 1,4                    | 8,1                     | 10,35                   | 0,18                     | 1,215                    |

3.2 - Propriedades geométricas da madeira

Como se trata de uma peça de painel CLT, o cálculo foi feito de acordo com a seção 6.7.4.10.2.1 da Norma

3.2.1 - Área líquida da seção transversal

$$A_{0,liq} = \sum E_i/E_c \times b \times h_i \quad (cm^2)$$

onde:

b - largura do painel 40

h<sub>i</sub> - altura da camada i do 4

E<sub>i</sub> - módulo de elasticidade da laje

E<sub>c</sub> - módulo de elasticidade referência, quando se tem camadas com diferentes módulos de elasticidade

$$E_i/E_c = 1$$

$$A_{0,liq} = 320 \quad cm^2$$

3.2.2 - Cálculo do módulo resistente

$$W_{0,liq} = I_{0,liq} / \max |Z_{sup}; Z_{inf}| \quad (cm^3)$$

sendo

$$I_{0,liq} = \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{E_c} \cdot \frac{bh_i^3}{12} + \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{E_c} \cdot bh_i a_i^2 \rightarrow (cm^4)$$

Z<sub>inf</sub> - distância da borda superior da 1ª camada até o centro de gravidade do painel

Z<sub>sup</sub> - distância da borda inferior da última camada até o centro de gravidade do painel

a<sub>i</sub> - distância entre o centro de gravidade da peça (Z<sub>cg</sub>) e o centro de gravidade da camada

n - número de camadas logitudinais

$$Z_{cg} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{E_i}{E_c} \cdot b_i \cdot h_i \cdot O_i}{\sum_{i=1}^n \frac{E_i}{E_c} \cdot b_i \cdot h_i}$$

O<sub>i</sub> - determinação do centro de gravidade O<sub>i</sub> para cada camada a partir da superfície superior. (cm)

$$O_1 = 2$$

$$O_2 = 5$$

$$O_3 = 8$$

$$Z_{cg} = 5$$

$$a_i = 3$$

$$Z_{inf} = Z_{sup} : 5$$

$$I_{0,liq} = 3306,67$$

Portanto:

$$W_{0,liq} = 661,33$$

### 3.3 - Cálculo do carregamento

Para o painel foi considerado como condição de contorno apoios fixos em ambos os lados, ou seja, bi-engastado.

Qg = (Peso próprio +Carga permanente)

Qq =carga acidental

$$P_p = 4,5E-01 \quad \text{kN/m}^2$$

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{g,i} \cdot F_{g,i,k} + \gamma_{q,k} [F_{q1,k} + \psi_0 F_{qj,k}]$$

$$Q_d = 6,19 \quad \text{kN/m}$$

$$M_{y,d} = 0,19 \quad \text{kNm/m}$$

### 4- Cálculo da tensão normal

$$\sigma_{M,d} = \frac{E_i}{E_c} \cdot \frac{M_{y,d}}{W_{0,liq}}$$

$$\sigma_{M,d} = 0,29 \quad \text{N/mm}^2$$

Verificação ok não ok

ok

### 5 - Cálculo da tensão de cisalhamento

$$\tau_d = \frac{V_d \cdot S}{b \cdot I_{0,liq}}$$

$$V_d = 1,86 \quad \text{kN/m}$$

$$S = 480 \quad \text{cm}^3$$

$$\tau_d = 0,007 \quad \text{kN/cm}^2$$

$$\text{ou}$$

$$\tau_d = 0,07 \quad \text{N/mm}^2$$

Verificação

ok

### 6 - Cálculo em situação de incêndio

#### 6.1 Modelo de incêndio baseado na curva iso

$$\theta_g = 20^\circ + 345 \log(8 \cdot t + 1)$$

sendo:

t - tempo em minutos

#### 6.2 - Segurança estrutural

$$R_{f,i,d} \geq S_{f,i,d}$$

onde:

R<sub>f,i,d</sub> - é o esforço resistente de cálculo em situação de incêndio, determinado por:

$$R_{f,i,d} = K_{mod,fi} \cdot \frac{R_{0,2}}{\gamma_{w,fi}}$$

R<sub>0,2</sub> - calculado pelos critérios estabelecidos na NBR 7190/22 desde que a área resistente seja adequadamente reduzida, e as propriedades mecânicas substituídas por aqueles referentes ao quantil de 20%.

$$k_{Mod,fi} = 1$$

$$f_{0,2} = k_{fi} \cdot f_k$$

k<sub>fi</sub> - tabeladc 1,15

$$\gamma_{w,fi} = 1$$

$$f_{0,2} = 34,5 \quad \text{MPa}$$

$f_d, f_i = 34,5$  MPa

$f_v, f_i = 4,6$  MPa

Para este trabalho foram considerados os seguintes TRRF's

Tempo (min) 15 30 45 60

6.3 - Cálculo da nova seção transversal após o incêndio

$$e_{ef} = e_{carb,n} + K_0 \cdot e_0$$

onde:

$K_0$  - tabelado - para o  $t=1 t/2$

$K_0$  - tabelado - foi considerado  $t \geq 2(1$

$e_0 = 7$  mm

$e_{carb,n}$  - espessura da camada carbonizada - foi considerado elementos planos, portanto,  $e_{carb,n}$  foi substituído por  $e_{carb,o} = \beta_0 \cdot t$

$\beta_0$  - tabelado MLCC 0,65 mm/min

logo

| tempo | $e_{carb,0}$ (mm) | $e_{ef}$ (mm) |
|-------|-------------------|---------------|
| 15    | 9,75              | 15            |
| 30    | 19,5              | 26,5          |
| 45    | 29,25             | 36,25         |
| 60    | 39                | 46            |

Espessura da segunda camada carbonizada, a taxa de carbonização a ser considerada é o dobro do valor

$\beta_{0,1} = 1,3$  mm/min

6.4- Novos valores das dimensões e tensões normais

| Para 15 minutos |                |              |          |              |              |           |                     |              |              |               |            |             |
|-----------------|----------------|--------------|----------|--------------|--------------|-----------|---------------------|--------------|--------------|---------------|------------|-------------|
|                 |                |              |          | O1           | O2           | O3        | 2654167<br>16961540 | ok não ok    |              |               |            |             |
|                 |                | b= 400       |          | 20           | 50           | 72,5      |                     |              |              |               |            |             |
| Camada          | Espessura (mm) | A0,liq (cm2) | Zcg (cm) | ai, sup (cm) | ai, inf (cm) | Zsup (cm) | Zinf (cm)           | I0,liq (cm4) | W0,liq (cm3) | Msd,f (kNm/m) | fi,d (MPa) | Verificação |
| L1              | 40             | 26000        | 40,19    | 32,3         | 20,2         | 44,8      | 40,2                | 2E+07        | 437851       | 114000        | 0,26       | ok          |
| T1              | 20             |              |          |              |              |           |                     |              |              |               |            |             |
| L2              | 25             |              |          |              |              |           |                     |              |              |               |            |             |
| Para 30 minutos |                |              |          |              |              |           |                     |              |              |               |            |             |
|                 |                |              |          | O1           | O2           | O3        | 2215346<br>8823954  | ok não ok    |              |               |            |             |
|                 |                | b= 400       |          | 20           | 50           | 66,75     |                     |              |              |               |            |             |
| Camada          | Espessura (mm) | A0,liq (cm2) | Zcg (cm) | ai, sup (cm) | ai, inf (cm) | Zsup (cm) | Zinf (cm)           | I0,liq (cm4) | W0,liq (cm3) | Msd,f (kNm/m) | fi,d (MPa) | Verificação |
| L1              | 40             | 21400        | 31,8     | 34,95        | 11,8         | 41,7      | 31,8                | 1E+07        | 264731       | 114000        | 0,431      | não ok      |
| T1              | 20             |              |          |              |              |           |                     |              |              |               |            |             |
| L2              | 13,5           |              |          |              |              |           |                     |              |              |               |            |             |
| Para 45 minutos |                |              |          |              |              |           |                     |              |              |               |            |             |
|                 |                |              |          | O1           | O2           | O3        | 2135162<br>2437033  | ok não ok    |              |               |            |             |
|                 |                | b= 400       |          | 20           | 50           | 61,8      |                     |              |              |               |            |             |
| Camada          | Espessura (mm) | A0,liq (mm2) | Zcg (mm) | ai, sup (mm) | ai, inf (mm) | Zsup (mm) | Zinf (mm)           | I0,liq (mm4) | W0,liq (mm3) | Msd,f (kNm/m) | fi,d (MPa) | Verificação |
| L1              | 40             | 17520        | 23,63    | 38,3         | 3,6          | 40,2      | 23,6                | 5E+06        | 113736       | 114000        | 1,002      | não ok      |
| T1              | 20             |              |          |              |              |           |                     |              |              |               |            |             |
| L2              | 3,8            |              |          |              |              |           |                     |              |              |               |            |             |
| Para 60 minutos |                |              |          |              |              |           |                     |              |              |               |            |             |
|                 |                |              |          | O1           | O2           | O3        | 2133333<br>0        | ok não ok    |              |               |            |             |
|                 |                | b= 400       |          | 20           | 27           | 0         |                     |              |              |               |            |             |
| Camada          | Espessura (mm) | A0,liq (mm2) | Zcg (mm) | ai, sup (mm) | ai, inf (mm) | Zsup (mm) | Zinf (mm)           | I0,liq (mm4) | W0,liq (mm3) | Msd,f (kNm/m) | fi,d (MPa) | Verificação |
| L1              | 40             | 16000        | 20       | 0            | 0            | 20        | 20                  | 2E+06        | 106667       | 114000        | 1,069      | não ok      |
| T1              | 14             |              |          |              |              |           |                     |              |              |               |            |             |
| L2              | 0              |              |          |              |              |           |                     |              |              |               |            |             |

6.5 - Tensões de cisalhamento

| Tempo | $\sqrt{f_i, d = 0,6 \cdot \sqrt{V_d}}$ | S (mm3) | b (mm) | I0,liq (mm4) | $r_{fi,d}$ (MPa) | Verificação |
|-------|--|---------|--------|--------------|------------------|-------------|
| 15    | 1116                                   | 323200  | 400    | 19615707     | 0,05             | não ok      |
| 30    |  | 188800  |        | 11039299     | 0,05             | não ok      |
| 45    |  | 57600   |        | 4572195      | 0,04             | ok          |
| 60    |  | 0       |        | 2133333      | 0                | não ok      |

7- Cálculo das ligações

Para este estudo tomou-se por base os dados dos parafusos da empresa Rothoblass. Foi usado parafusos HBS de diâmetro 10 mm, posicionados a 9

Seguindo os critérios da NBR 7190/22 os elementos de ligação deve atender as seguinte condições de segurança.

$$R_{d,lig} \geq S_{d,lig}$$

onde:

$R_{d,lig}$  - é o valor de cálculo da resistência da ligação

$S_{d,lig}$  - é o valor de cálculo das solicitações atuantes.

7.1 - Cálculo da resistência da ligação

$$R_{d,lig} = K_{mod} \cdot \frac{R_{v,k}}{\gamma_{lig}}$$

Onde

$$K_{mod} = 0,63$$

$$\gamma_{lig} = 1,4$$

7.1.1 - Determinação da resistência ao embutimento

$$f_{e\alpha,k} = \frac{f_{e,0,k}}{k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} - \left( \frac{N}{\text{mm}^2} \right)$$

$$f_{e,0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01d) \cdot \rho_k$$

$$k_{90} = \begin{cases} 1,35 + 0,015d & \text{para madeiras conífera} \\ 1,30 + 0,015d & \text{para painéis de LVL} \\ 0,90 + 0,015d & \text{para madeiras folhosas} \end{cases}$$

onde

$\rho_k$  - é dado em kg/m<sup>3</sup>

d - diâmetro em mm

$$f_{e,0,k} = 28,044 \quad \text{N/mm}^2$$

$$k_{90} = 1,5$$

$$f_{e,k} = 18,7 \quad \text{N/mm}^2$$

7.1.2 - Momento resistente

$$M_{y,R,k} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6}$$

sendo

$f_{u,k}$  - a resistência última característica do aço do pino metálico

d - diâmetro nominal do pino metálico

$$M_{y,R,k} = 119432,15 \quad \text{Nmm}$$

7.1.3 - Rigidez da ligação

$$K_{ser} = \rho_{med}^{1,5} \cdot \frac{d}{23} \quad K_{ser} = 4289,52 \quad \text{N/mm}$$

$$K_u = \frac{2}{3} \cdot K_{ser} \quad K_u = 2859,68 \quad \text{N/mm}$$

7.1.4 - Cálculo dos espaçamentos

Para este painel foi considerado um espaçamento entre parafusos de 10 cm cada

$$s = 10 \quad \text{cm}$$

Totalizando um número de 6 parafusos ao longo de todo comprimento do painel

Com o valor dos espaçamentos definidos e com os módulos de deslizamentos K determinados pode-se então encontrar o valor da força aplicada no conector (Fi) dada pela expressão:

$$F_i = \gamma_i \cdot E_i \cdot A_{o,liq} \cdot a_i \cdot s_i \cdot \frac{V}{(EI)_{ef}} \quad F_{i,d} = 1,42 \quad \text{kN} \quad 1420\text{N}$$

$$\gamma_i = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot A_{o,liq}}{L_{ef}^2} \cdot \frac{h_j}{G_t \cdot b}} \quad \gamma_i = 0,71 \quad \frac{1643,27}{0,00025}$$

$$(EI)_{ef} = \sum E_i \cdot I_i + \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i^2 \quad (EI)_{ef} = 10729472 \quad \text{kN/cm}^2$$

$$L_{ef} = 0,8 L \quad 48$$

$$EI = 1200 \text{ kN/cm}^2$$

$$I_i = I_o, I_{iq} = 3306,67 \text{ cm}^4$$

$$A_i = A_o, I_{iq} = 320 \text{ cm}^2$$

$$a_i = 3$$

### 7.1.5 - Cálculo da resistência característica da ligação

$F_{v,Rk}$  - é a menor dentre as resistências encontradas de acordo com as equações abaixo

$$F_{v,Rk1} = f_{e1,k} t_1 d \quad F_{v,Rk1} = 3740 \quad N$$

$$F_{v,Rk2} = 0,5 f_{e1,k} t_2 d \beta \quad F_{v,Rk2} = 1870 \quad N$$

$$F_{v,Rk3} = 1,05 \frac{f_{e1,k} t_2 d}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,k}}{f_{e1,k} d t^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad F_{v,Rk3} = \text{#####} \quad N$$

$$F_{v,Rk4} = 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,k} f_{e1,k} d + \frac{F_{ax,Rk}^2}{4}} \quad F_{v,Rk4} = 7690,57 \quad N$$

$$f_{e1,k} = f_{e\alpha,k} 18,7$$

$$t_1 = t_2 = 20 \quad \text{mm}$$

$$\beta = f_{e2,k} / f_{e1,k}$$

$$M_{y,k} = 119432,15 \text{ Nmm}$$

$F_{ax,Rk}$  - contribuição da resistência ao arrancamento, é o menor entre a resistência de tração do parafuso e a resistência ao embutimento

$$f_{e,k} = 18,7 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{y,k} = 900 \text{ N/mm}^2$$

Logo a força adotada foi

$$F_{v,Rk2} = 1870 \quad N$$

$$R_d = 841,5 \quad N$$

$$R_{d,fi} = 2150,5 \quad N$$

1-Foi considera painel de dimensões 40x60 cm. Classe 2 de umidade, classe de carregamento longa duração, edificação residencial.

| Painel 2 - 5 camadas |           |            |           |
|----------------------|-----------|------------|-----------|
| Camadas              | Espessura | E0,m (MPa) | G90 (MPa) |
| L1                   | 4         | 12000      | 0         |
| T1                   | 2         | 0          | 800       |
| L2                   | 4         | 12000      | 0         |
| T2                   | 2         | 0          | 800       |
| L3                   | 4         | 12000      | 0         |

2- Os cálculos foram feitos tendo como base a NBR 7190/2022 bem como as NBR 6120, 6123 e 8681, para o cálculo dos carregamentos.

3- Cálculo para o Estado Limite Último - ELU

$$R_d \geq S_d$$

3.1 - Propriedades da madeira

| fb,k (MPa) | fv,k (MPa) | ft0,k (MPa) | fc0,k (MPa) | ft90,k (MPa) | fc90,k (MPa) | E0,m (MPa) | E0,05 (MPa) | E90,m (MPa) | Gm (MPa) | k (kg/m <sup>3</sup> ) | ρm (kg/m <sup>3</sup> ) |
|------------|------------|-------------|-------------|--------------|--------------|------------|-------------|-------------|----------|------------------------|-------------------------|
| 30         | 4          | 18          | 23          | 0,4          | 2,7          | 12000      | 8000        | 400         | 800      | 380                    | 460                     |

esp. mad = 4,5 kN/m<sup>3</sup> γ=1,4 - tensões normais γ=1,8 - tensões de cisalhamento

Carga permante = 1,5 kN/m<sup>2</sup>

Carga accidental = 2,5 kN/m<sup>2</sup>

|                      |        |       |
|----------------------|--------|-------|
| Kmod = Kmod1 x Kmod2 | Kmdo,1 | Kmod2 |
|                      | 0,7    | 0,9   |

Kmod = 0,63

Resistencia de projeto

| fb,d (MPa) | fv,d (MPa) | ft0,d (MPa) | fc0,d (MPa) | ft90,d (MPa) | fc90,d (MPa) |
|------------|------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| 13,5       | 1,4        | 8,1         | 10,35       | 0,18         | 1,215        |

3.2 - Propriedades geométricas da madeira

Como se trata de uma peça de painel CLT, o cálculo foi feito de acordo com a seção 6.7.4.10.2.1 da Norma

3.2.1 - Área líquida da seção transversal

$$A_{0,liq} = \sum E_i/E_c \times b \times h_i \quad (\text{cm}^2)$$

onde:

b - largura do painel 40

hi - altura da camada i do 4

Ei - módulo de elasticidade da laje

Ec - módulo de elasticidade referência, quando se tem camadas com diferentes módulos de elasticidade

$$E_i/E_c = 1$$

$$A_{0,liq} = 480 \quad \text{cm}^2$$

3.2.2 - Cálculo do módulo resistente

$$W_{0,liq} = I_{0,liq}/\text{máx}|Z_{sup};Z_{inf}| \quad (\text{cm}^3)$$

sendo

$$I_{0,liq} = \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{E_c} \cdot \frac{bh_i^3}{12} + \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{E_c} \cdot bh_i a_i^2 \rightarrow (\text{cm}^4)$$

Zinf - distância da borda superior da 1ª camada até o centro de gravidade do painel

Zsup - distância da borda inferior da última camada até o centro de gravidade do painel

ai - distância entre o centro de gravidade da peça (Zcg) e o centro de gravidade da camada

n - número de camadas longitudinais

$$Z_{cg} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{E_i}{E_c} \cdot b_i \cdot h_i \cdot O_i}{\sum_{i=1}^n \frac{E_i}{E_c} \cdot b_i \cdot h_i}$$

Oi - determinação do centro de gravidade Oi para cada camada a partir da superfície superior. (cm)

$$O1 = 2$$

$$O4 = 11$$

$$O2 = 5$$

$$O5 = 14$$

$$O3 = 8$$

$$Z_{cg} = 8$$

$$a_i = 6$$

$$Z_{inf} = Z_{sup} = 8$$

$$I_{0,liq} = 12160,00$$



Portanto:

$$W_{0,liq} = 1520,00$$

### 3.3 - Cálculo do carregamento

Para o painel foi considerado como condição de contorno apoios fixos em ambos os lados, ou seja, bi-engastado.

$Q_g$  = (Peso próprio +Carga permanente)

$Q_q$  =carga acidental

$$P_p = 7,2E-01 \quad \text{kN/m}^2$$

$$F_{d,i} = \sum_{i=1}^m \gamma_{g,i} \cdot F_{g,i,k} + \gamma_{q,k} [F_{q1,k} + \psi_0 F_{qj,k}]$$

$$Q_{d,i} = 6,53 \quad \text{kN/m}$$

$$M_{y,d} = 0,20 \quad \text{kNm/m}$$

### 4- Cálculo da tensão normal

$$\sigma_{M,d} = \frac{E_i}{E_c} \cdot \frac{M_{y,d}}{W_{0,liq}}$$

$$\sigma_{M,d} = 0,13 \quad \text{N/mm}^2$$

Verificação ok não ok

ok

### 5 - Cálculo da tensão de cisalhamento

$$\tau_d = \frac{V_d \cdot S}{b \cdot I_{0,liq}}$$

$$V_d = 1,96 \quad \text{kN/m}$$

$$S = 960 \quad \text{cm}^3$$

$$\tau_d = 0,004 \quad \text{kN/cm}^2$$

$$\text{ou}$$

$$\tau_d = 0,04 \quad \text{N/mm}^2$$

Verificação

ok

### 6 - Cálculo em situação de incêndio

#### 6.1 Modelo de incêndio baseado na curva iso

$$\theta_g = 20^\circ + 345 \log(8 \cdot t + 1)$$

sendo:

t - tempo em minutos

#### 6.2 - Segurança estrutural

$$R_{f,i,d} \geq S_{f,i,d}$$

onde:

$R_{f,i,d}$  - é o esforço resistente de cálculo em situação de incêndio, determinado por:

$$R_{f,i,d} = K_{mod,fi} \cdot \frac{R_{0,2}}{\gamma_{w,fi}}$$

$R_{0,2}$  - calculado pelos critérios estabelecidos na NBR 7190/22 desde que a área resistente seja adequadamente reduzida, e as propriedades mecânicas substituídas por aqueles referentes ao quantil de 20%.

$$K_{Mod,fi} = 1$$

$$f_{0,2} = k_{fi} \cdot f_k$$

$k_{fi}$  - tabelad: 1,15

$$\gamma_{w,fi} = 1$$

$$f_{0,2} = 34,5 \quad \text{MPa}$$

$$f_{d,fi} = 34,5 \quad \text{MPa}$$

$$f_{v,fi} = 4,6 \quad \text{MPa}$$

Para este trabalho foram considerados os seguintes TRRF's

Tempo (min) 15 30 45 60

### 6.3 - Cálculo da nova seção transversal após o incêndio

$$e_{ef} = e_{carb,n} + K_0 \cdot e_0$$

onde:

K0 - tabelado - para o  $t=1 t/2$

K0 - tabelado - foi considerado  $t \geq 20$  1

$e_0 = 7$  mm

$e_{carb,n}$  - espessura da camada carbonizada - foi considerado elementos planos, portanto,  $e_{carb,n}$  foi substituído por  $e_{carb,o} = \beta_0 \cdot t$

$\beta_0$  - tabelado MLCC 0,65 mm/min

logo

| tempo | $e_{carb,0}$ (mm) | $e_{ef}$ (mm) |
|-------|-------------------|---------------|
| 15    | 9,75              | 15            |
| 30    | 19,5              | 26,5          |
| 45    | 29,25             | 36,25         |
| 60    | 39                | 46            |

Espessura da segunda camada carbonizada, a taxa de carbonização a ser considerada é o dobro do valor

$\beta_{0,1} = 1,3$  mm/min

Novos valores das dimensões

| Para 15 minutos |                |              |          |              |              |              |                       |              |              |               |            |             |
|-----------------|----------------|--------------|----------|--------------|--------------|--------------|-----------------------|--------------|--------------|---------------|------------|-------------|
|                 |                | b= 400       |          | O1<br>20     | O3<br>80     | O5<br>132,25 | 4787500<br>80230609   | ok           |              | não ok        |            |             |
| Camada          | Espessura (mm) | A0,liq (cm2) | Zcg (cm) | ai, sup (cm) | ai, inf (cm) | Zsup (cm)    | Zinf (cm)             | I0,liq (cm4) | W0,liq (cm3) | Msd,f (kNm/m) | fi,d (MPa) | Verificação |
| L1              | 40             | 42000        | 69,58    | 62,92        | 49,58        | 75,42        | 69,58                 | 85018109     | 1127262,1    | 120000        | 0,106      | ok          |
| T1              | 20             |              |          |              |              |              |                       |              |              |               |            |             |
| L2              | 40             |              |          |              |              |              |                       |              |              |               |            |             |
| T2              | 20             |              |          |              |              |              |                       |              |              |               |            |             |
| L3              | 25             |              |          |              |              |              |                       |              |              |               |            |             |
| Para 30 minutos |                |              |          |              |              |              |                       |              |              |               |            |             |
|                 |                | b= 400       |          | O1<br>20     | O3<br>80     | O5<br>126,8  | 4348679,2<br>56016291 | ok           |              | não ok        |            |             |
| L1              | 40             | 37400        | 61,09    | 65,66        | 41,09        | 72,41        | 61,09                 | 60364971     | 833655,17    | 120000        | 0,144      | ok          |
| T1              | 20             |              |          |              |              |              |                       |              |              |               |            |             |
| L2              | 40             |              |          |              |              |              |                       |              |              |               |            |             |
| T2              | 20             |              |          |              |              |              |                       |              |              |               |            |             |
| L3              | 13,5           |              |          |              |              |              |                       |              |              |               |            |             |
| Para 45 minutos |                |              |          |              |              |              |                       |              |              |               |            |             |
|                 |                | b= 400       |          | O1<br>20     | O3<br>80     | O5<br>121,9  | 4268495,7<br>36301487 | ok           |              | não ok        |            |             |
| L1              | 40             | 33520        | 53,26    | 68,64        | 33,26        | 70,54        | 53,26                 | 40569982     | 575134,42    | 120000        | 0,209      | ok          |
| T1              | 20             |              |          |              |              |              |                       |              |              |               |            |             |
| L2              | 40             |              |          |              |              |              |                       |              |              |               |            |             |
| T2              | 20             |              |          |              |              |              |                       |              |              |               |            |             |
| L3              | 3,8            |              |          |              |              |              |                       |              |              |               |            |             |
| Para 60 minutos |                |              |          |              |              |              |                       |              |              |               |            |             |
|                 |                | b= 400       |          | O1<br>20     | O3<br>80     | O5<br>0      | 4266666,7<br>28800000 | ok           |              | não ok        |            |             |
| L1              | 40             | 32000        | 50       | 30           | 30           | 50           | 50                    | 33066667     | 661333,33    | 120000        | 0,181      | ok          |
| T1              | 20             |              |          |              |              |              |                       |              |              |               |            |             |
| L2              | 40             |              |          |              |              |              |                       |              |              |               |            |             |
| T2              | 14             |              |          |              |              |              |                       |              |              |               |            |             |
| L3              | 0              |              |          |              |              |              |                       |              |              |               |            |             |

### 6.5 - Tensões de cisalhamento

| Tempo | $V_{fi,d} = 0,6 \cdot V_d$ | S (mm3) | b (mm) | I0,liq (mm4) | $\tau_{fi,d}$ (MPa) | Verificação | ok | não ok |
|-------|----------------------------|---------|--------|--------------|---------------------|-------------|----|--------|
| 15    | 1176                       | 793280  | 400    | 85018109     | 0,03                | ok          |    |        |
| 30    |                            | 657440  |        | 60364971     | 0,03                | ok          |    |        |

|    |        |          |      |    |
|----|--------|----------|------|----|
| 45 | 532160 | 40569982 | 0,04 | ok |
| 60 | 480000 | 33066667 | 0,04 | ok |

## 7- Cálculo das ligações

Para este estudo tomou-se por base os dados dos parafusos da empresa Rothoblass. Foi usado parafusos HBS de diâmetro 10 mm, posicionados a 90°.

Seguindo os critérios da NBR 7190/22 os elementos de ligação deve atender as seguinte condições de segurança.

$$R_{d,lig} \geq S_{d,lig}$$

onde:

$R_{d,lig}$  - é o valor de cálculo da resistência da ligação

$S_{d,lig}$  - é o valor de cálculo das solicitações atuantes.

## 7.1 - Cálculo da resistência da ligação

$$R_{d,lig} = K_{mod} \cdot \frac{R_{v,k}}{\gamma_{lig}}$$

Onde

$$K_{mod} = 0,63$$

$$\gamma_{lig} = 1,4$$

## 7.1.1 - Determinação da resistência ao embutimento

$$f_{e\alpha,k} = \frac{f_{e,0,k}}{k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} - (N/mm^2)$$

$$f_{e,0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01d) \cdot \rho_k$$

$$k_{90} = \begin{cases} 1,35 + 0,015d & \text{para madeiras conífera} \\ 1,30 + 0,015d & \text{para painéis de LVL} \\ 0,90 + 0,015d & \text{para madeiras folhosas} \end{cases}$$

onde

$\rho_k$  - é dado em kg/m<sup>3</sup>

d - diâmetro em mm

$$f_{e,0,k} = 28,044 \quad N/mm^2$$

$$k_{90} = 1,5$$

$$f_{e,k} = 18,7 \quad N/mm^2$$

## 7.1.2 - Momento resistente

$$M_{y,R,k} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6}$$

sendo

$f_{u,k}$  - a resistência última característica do aço do pino metálico

d - diâmetro nominal do pino metálico

$$M_{y,R,k} = 119432,15 \quad Nmm$$

## 7.1.3 - Rigidez da ligação

$$K_{ser} = \rho_{med}^{1,5} \cdot \frac{d}{23} \quad K_{ser} = 4289,52 \quad N/mm$$

$$K_u = \frac{2}{3} \cdot K_{ser} \quad K_u = 2859,68 \quad N/mm$$

## 7.1.4 - Cálculo dos espaçamentos

Para este painel foi considerado um espaçamento entre parafusos de 10 cm cada

$$s = 10 \quad cm$$

Totalizando um número de 60 parafusos ao longo de todo comprimento do painel

Com o valor dos espaçamentos definidos e com os módulos de deslizamentos K determinados pode-se então encontrar o valor da força aplicada no conector ( $F_i$ ) dada pela

$$F_i = \gamma_i \cdot E_i \cdot A_{o,liq} \cdot a_i \cdot s_i \cdot \frac{V}{(EI)_{ef}} \quad F_{i,d} = 0,29 \text{ kN} \quad 290N$$

$$\gamma_i = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot A_{o,liq} \cdot h_j}{r^2 \cdot \rho \cdot k}} \quad \gamma_i = 0,62 \quad 2464,9 \quad 0,00025$$

$$(EI)_{ef} = \sum E_i \cdot I_i + \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i^2 \quad (EI)_{ef} = 144869376 \text{ kN/cm}^2$$

$$\begin{aligned} L_{ef} &= 0,8 L && 48 \\ EI &= 1200 \text{ kN/cm}^2 \\ I_i = I_{o,liq} &= 12160,00 \text{ cm}^4 \\ A_i = A_{0,liq} &= 480 \text{ cm}^2 \\ a_i &= 6 \end{aligned}$$

## 7.1.5 - Cálculo da resistência característica da ligação

Fv,Rk - é a menor dentre as resistências encontradas de acordo com as equações abaixo

$$F_{V,Rk1} = f_{e1,k} t_1 d \quad F_{V,Rk1} = 3740 \quad \text{N}$$

$$F_{V,Rk2} = 0,5 f_{e1,k} t_2 d \beta \quad F_{V,Rk2} = 1870 \quad \text{N}$$

$$F_{V,Rk3} = 1,05 \frac{f_{e1,k} t_2 d}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,k}}{f_{e1,k} d t^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad F_{V,Rk3} = 26394,43 \quad \text{N}$$

$$F_{V,Rk4} = 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,k} f_{e1,k} d + \frac{F_{ax,Rk}}{4}} \quad F_{V,Rk4} = 7690,57 \quad \text{N}$$

$$f_{e1,k} = f_{e\alpha,k} 18,7$$

$$t_1 = t_2 = 20 \quad \text{mm}$$

$$\beta = f_{e2,k} / f_{e1,k} = 1$$

$$M_{y,k} = 119432,15 \text{ Nmm}$$

Fax,Rk - contribuição da resistência ao arrancamento, é o menor entre a resistência de tração do parafuso e a resistência ao embutimento

$$\begin{aligned} f_{e,k} &= 18,7 \text{ N/mm}^2 \\ f_{y,k} &= 900 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Logo a força adotada foi

$$F_{V,Rk2} = 1870 \quad \text{N}$$

$$R_d = 841,5 \quad \text{N}$$

$$R_{d,fi} = 2150,5 \quad \text{N}$$

1-Foi considera painel de dimensões 40x60 cm. Classe 2 de umidade, classe de carregamento longa duração, edificação residencial.

| Painel 3 - 7 camadas |           |            |           |
|----------------------|-----------|------------|-----------|
| Camadas              | Espessura | E0,m (MPa) | G90 (MPa) |
| L1                   | 4         | 12000      | 0         |
| T1                   | 2         | 0          | 800       |
| L2                   | 4         | 12000      | 0         |
| T2                   | 2         | 0          | 800       |
| L3                   | 4         | 12000      | 0         |
| T3                   | 2         | 0          | 800       |
| L4                   | 4         | 12000      | 0         |

2- Os cálculos foram feitos tendo como base a NBR 7190/2022 bem como as NBR 6120, 6123 e 8681, para o cálculo dos carregamentos.

3- Cálculo para o Estado Limite Último - ELU

$$R_d \geq S_d$$

3.1 - Propriedades da madeira

| fb,k (MPa) | fv,k (MPa) | ft0,k (MPa) | fc0,k (MPa) | ft90,k (MPa) | fc90,k (MPa) | E0,m (MPa) | E0,05 (MPa) | E90,m (MPa) | Gm (MPa) | k (kg/m <sup>3</sup> ) | ρm (kg/m <sup>3</sup> ) |
|------------|------------|-------------|-------------|--------------|--------------|------------|-------------|-------------|----------|------------------------|-------------------------|
| 30         | 4          | 18          | 23          | 0,4          | 2,7          | 12000      | 8000        | 400         | 800      | 380                    | 460                     |

esp. mad.= 4,5 kN/m<sup>3</sup> γ=1,4 - tensões normais γ=1,8 - tensões de cisalhamento

Carga permante = 1,5 kN/m<sup>2</sup>

Carga acidental = 2,5 kN/m<sup>2</sup>

$$K_{mod} = K_{mod1} \times K_{mod2}$$

| Kmod,1 | Kmod,2 |
|--------|--------|
| 0,7    | 0,9    |

$$K_{mod} = 0,63$$

Resistencias de projeto

| fb,d (MPa) | fv,d (MPa) | ft0,d (MPa) | fc0,d (MPa) | ft90,d (MPa) | fc90,d (MPa) |
|------------|------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| 13,5       | 1,4        | 8,1         | 10,35       | 0,18         | 1,215        |

3.2 - Propriedades geométricas da madeira

Como se trata de uma peça de painel CLT, o cálculo foi feito de acordo com a seção 6.7.4.10.2.1 da Norma

3.2.1 - Área líquida da seção transversal

$$A_{0,liq} = \sum E_i/E_c \times b \times h_i \quad (cm^2)$$

onde:

b - largura do painel 40

hi - altura da camada i do 4

Ei - módulo de elasticidade da laje

Ec - módulo de elasticidade referência, quando se tem camadas com diferentes módulos de elasticidade

$$E_i/E_c = 1$$

$$A_{0,liq} = 640 \quad cm^2$$

3.2.2 - Cálculo do módulo resistente

$$W_{0,liq} = I_{0,liq} / \max\{Z_{sup}; Z_{inf}\} \quad (cm^3)$$

sendo

$$I_{0,liq} = \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{E_c} \cdot \frac{bh_i^3}{12} + \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{E_c} \cdot bh_i a_i^2 \rightarrow (cm^4)$$

Zinf - distância da borda superior da 1ª camada até o centro de gravidade do painel

Zsup - distância da borda inferior da última camada até o centro de gravidade do painel

ai - distância entre o centro de gravidade da peça (Zcg) e o centro de gravidade da camada

n - número de camadas longitudinais

$$z_{cg} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{E_i}{E_c} \cdot b_i \cdot h_i \cdot O_i}{\sum_{i=1}^n \frac{E_i}{E_c} \cdot b_i \cdot h_i}$$

Oi - determinação do centro de gravidade Oi para cada camada a partir da superfície superior. (cm)

$$\begin{array}{lll} O1 = 2 & O4 = 11 & O7 = 20 \\ O2 = 5 & O5 = 14 & \\ O3 = 8 & O6 = 17 & \end{array}$$

$$\begin{array}{lll} Z_{cg} = 11 & ai1 = 9 & Z_{inf} = Z_{sup} = 11 \\ & ai2 = 3 & \end{array}$$

$$I_{0,liq} = 29653,33 \quad \text{cm}^4$$

Portanto:

$$W_{0,liq} = 2695,76$$

### 3.3 - Cálculo do carregamento

Para o painel foi considerado como condição de contorno apoios fixos em ambos os lados, ou seja, bi-engastado.

Qg = (Peso próprio +Carga permanente)

Qq =carga acidental

$$Pp = 9,9E-01 \quad \text{kN/m}^2$$

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{g,i} \cdot F_{g,i,k} + \gamma_{q,k} [F_{q1,k} + \psi_0 F_{qj,k}]$$

$$Q_d = 6,86 \quad \text{kN/m}$$

$$M_{y,d} = 0,21 \quad \text{kNm/m}$$

### 4- Cálculo da tensão normal

$$\sigma_{M,d} = \frac{E_i}{E_c} \cdot \frac{M_{y,d}}{W_{0,liq}}$$

$$\sigma_{M,d} = 0,08 \quad \text{N/mm}^2$$

Verificação ok não ok

ok

### 5 - Cálculo da tensão de cisalhamento

$$\tau_d = \frac{V_d \cdot S}{b \cdot I_{0,liq}}$$

$$V_d = 2,06 \quad \text{kN/m}$$

$$S = 1920 \quad \text{cm}^3$$

$$\tau_d = 0,003 \quad \text{kN/cm}^2$$

$$\text{ou}$$

$$\tau_d = 0,03 \quad \text{N/mm}^2$$

Verificação

ok

### 6 - Cálculo em situação de incêndio

#### 6.1 Modelo de incêndio baseado na curva iso

$$\theta_g = 20^\circ + 345 \log(8 \cdot t + 1)$$

sendo:

t - tempo em minutos

#### 6.2 - Segurança estrutural

$$R_{f,i,d} \geq S_{f,i,d}$$

onde:

R<sub>f,i,d</sub> - é o esforço resistente de cálculo em situação de incêndio, determinado por:

$$R_{f,i,d} = K_{mod,fi} \cdot \frac{R_{0,2}}{\gamma_{w,fi}}$$

R<sub>0,2</sub> - calculado pelos critérios estabelecidos na NBR 7190/22 desde que a área resistente seja adequadamente reduzida, e as propriedades mecânicas substituídas por aqueles referentes ao quantil de 20%.

$$k_{Mod,fi} = 1$$

$$f_{0,2} = k_{fi} \cdot f_k$$

k<sub>fi</sub> - tabelad( 1,15

$$\gamma_{w,fi} = 1$$

$$f_{0,2} = 34,5 \quad \text{MPa}$$

$$f_{d,fi} = 34,5 \quad \text{MPa}$$

$$f_v, f_i = 4,6 \quad \text{MPa}$$

Para este trabalho foram considerados os seguintes TRRF's

Tempo (min)    15        30        45        60

6.3 - Cálculo da nova seção transversal após o incêndio

$$e_{ef} = e_{carb,n} + K_0 \cdot e_0$$

onde:

K0 - tabelado - para o  $t=1 t/2$

K0 - tabelado - foi considerado  $t \geq 20$  1

$$e_0 = 7 \quad \text{mm}$$

$e_{carb,n}$  - espessura da camada carbonizada - foi considerado elementos planos, portanto,  $e_{carb,n}$  foi substituído por  $e_{carb,o} = \beta_0 \cdot t$

$\beta_0$  - tabelado MLCC    0,65        mm/min

logo

| tempo | $e_{carb,0}$ (mm) | $e_{ef}$ (mm) |
|-------|-------------------|---------------|
| 15    | 9,75              | 15            |
| 30    | 19,5              | 26,5          |
| 45    | 29,25             | 36,25         |
| 60    | 39                | 46            |

Espessura da segunda camada carbonizada, a taxa de carbonização a ser considerada é o dobro do valor

$\beta_0,1 = 1,3$         mm/min

Novos valores das dimensões

| Para 15 minutos |                |              |          |              |              |           |              |                        |              |               |            |             |
|-----------------|----------------|--------------|----------|--------------|--------------|-----------|--------------|------------------------|--------------|---------------|------------|-------------|
|                 |                | b= 400       |          | O1<br>20     | O3<br>80     | O5<br>140 | O7<br>192,5  | 6920833,3<br>219941380 | ok           | não ok        |            |             |
| Camada          | Espessura (mm) | A0,liq (cm2) | Zcg (cm) | ai, sup (cm) | ai, inf (cm) | Zsup (cm) | Zinf (cm)    | I0,liq (cm4)           | W0,liq (cm3) | Msd,f (kNm/m) | fi,d (MPa) | Verificação |
| L1              | 40             | 58000        | 99,4     | 93,1         | 79,4         | 105,6     | 99,4         | 226862213              | 2148316,4    | 126000        | 0,059      | ok          |
| T1              | 20             |              |          |              |              |           |              |                        |              |               |            |             |
| L2              | 40             |              |          |              |              |           |              |                        |              |               |            |             |
| T2              | 20             |              |          |              |              |           |              |                        |              |               |            |             |
| L3              | 40             |              |          |              |              |           |              |                        |              |               |            |             |
| T3              | 20             |              |          |              |              |           |              |                        |              |               |            |             |
| L4              | 25             |              |          |              |              |           |              |                        |              |               |            |             |
| Para 30 minutos |                |              |          |              |              |           |              |                        |              |               |            |             |
|                 |                | b= 400       |          | O1<br>20     | O3<br>80     | O5<br>140 | O7<br>186,75 | 6482012,5<br>170513293 | ok           | não ok        |            |             |
| Camada          | Espessura (mm) | A0,liq (cm2) | Zcg (cm) | ai, sup (cm) | ai, inf (cm) | Zsup (cm) | Zinf (cm)    | I0,liq (cm4)           | W0,liq (cm3) | Msd,f (kNm/m) | fi,d (MPa) | Verificação |
| L1              | 40             | 53400        | 90,79    | 95,96        | 70,79        | 102,71    | 90,79        | 176995306              | 1723252,9    | 126000        | 0,073      | ok          |
| T1              | 20             |              |          |              |              |           |              |                        |              |               |            |             |
| L2              | 40             |              |          |              |              |           |              |                        |              |               |            |             |
| T2              | 20             |              |          |              |              |           |              |                        |              |               |            |             |
| L3              | 40             |              |          |              |              |           |              |                        |              |               |            |             |
| T3              | 20             |              |          |              |              |           |              |                        |              |               |            |             |
| L4              | 13,5           |              |          |              |              |           |              |                        |              |               |            |             |
| Para 45 minutos |                |              |          |              |              |           |              |                        |              |               |            |             |
|                 |                | b= 400       |          | O1<br>20     | O3<br>80     | O5<br>140 | O7<br>181,9  | 6482012,5<br>130303521 | ok           | não ok        |            |             |
| Camada          | Espessura (mm) | A0,liq (cm2) | Zcg (cm) | ai, sup (cm) | ai, inf (cm) | Zsup (cm) | Zinf (cm)    | I0,liq (cm4)           | W0,liq (cm3) | Msd,f (kNm/m) | fi,d (MPa) | Verificação |
| L1              | 40             | 49520        | 83,13    | 98,77        | 63,13        | 100,67    | 83,13        | 136785533              | 1358751,7    | 126000        | 0,093      | ok          |
| T1              | 20             |              |          |              |              |           |              |                        |              |               |            |             |
| L2              | 40             |              |          |              |              |           |              |                        |              |               |            |             |
| T2              | 20             |              |          |              |              |           |              |                        |              |               |            |             |
| L3              | 40             |              |          |              |              |           |              |                        |              |               |            |             |
| T3              | 20             |              |          |              |              |           |              |                        |              |               |            |             |
| L4              | 3,8            |              |          |              |              |           |              |                        |              |               |            |             |
| Para 60 minutos |                |              |          |              |              |           |              |                        |              |               |            |             |
|                 |                | b= 400       |          | O1<br>20     | O3<br>80     | O5<br>140 | O7<br>0      | 6400000<br>115200000   | ok           | não ok        |            |             |
| Camada          | Espessura (mm) | A0,liq (cm2) | Zcg (cm) | ai, sup (cm) | ai, inf (cm) | Zsup (cm) | Zinf (cm)    | I0,liq (cm4)           | W0,liq (cm3) | Msd,f (kNm/m) | fi,d (MPa) | Verificação |
| L1              | 40             | 48000        | 80       | 60           | 60           | 80        | 80           | 121600000              | 1520000      | 126000        | 0,083      | ok          |
| T1              | 20             |              |          |              |              |           |              |                        |              |               |            |             |
| L2              | 40             |              |          |              |              |           |              |                        |              |               |            |             |
| T2              | 20             |              |          |              |              |           |              |                        |              |               |            |             |
| L3              | 40             |              |          |              |              |           |              |                        |              |               |            |             |
| T3              | 14             |              |          |              |              |           |              |                        |              |               |            |             |





Com o valor dos espaçamentos definidos e com os módulos de deslizamentos K determinados pode-se então encontrar o valor da força aplicada no conector (Fi) dada

$$F_i = \gamma_i \cdot E_i \cdot A_{o,liq} \cdot a_i \cdot s_i \cdot \frac{V}{(EI)_{ef}} \quad F_{i,d} = \quad 0,09 \text{ kN} \quad 90\text{N}$$

$$\gamma_i = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot A_{o,liq}}{L_{ef}^2} \cdot \frac{h_j}{G_t \cdot b}} \quad \gamma_i = 0,55 \quad \begin{matrix} 3286,53 \\ 0,00025 \end{matrix}$$

$$(EI)_{ef} = \sum E_i \cdot I_i + \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i^2 \quad (EI)_{ef} = 881059840 \text{ kN/cm}^2$$

$$L_{ef} = 0,8 L \quad 48$$

$$\begin{aligned} EI &= 1200 \text{ kN/cm}^2 \\ I_i = I_{o,liq} &= 29653,33 \text{ cm}^4 \\ A_i = A_{o,liq} &= 640 \text{ cm}^2 \\ a_i &= 9 \end{aligned}$$

#### 7.1.5 - Cálculo da resistência característica da ligação

FvR,k - é a menor dentre as resistências encontradas de acordo com as equações abaixo

$$F_{V,Rk1} = f_{e1,k} t_1 d \quad F_{V,Rk1} = 3740 \quad \text{N}$$

$$F_{V,Rk2} = 0,5 f_{e1,k} t_2 d \beta \quad F_{V,Rk2} = 1870 \quad \text{N}$$

$$F_{V,Rk3} = 1,05 \frac{f_{e1,k} t_2 d}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,k}}{f_{e1,k} d t^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad \begin{matrix} 3740 & 3 & 4 & 1433185,8 & 74800 & 4,675 \\ F_{V,Rk3} = 26394,43 & \text{N} \end{matrix}$$

$$F_{V,Rk4} = 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,k} f_{e1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad \begin{matrix} 2 & 2 & 44667624 \\ F_{V,Rk4} = 7690,57 & \text{N} \end{matrix}$$

$$f_{e1,k} = f_{e\alpha,k} 18,7$$

$$t_1 = t_2 = 20 \quad \text{mm}$$

$$\beta = f_{e2,k} / f_{e1,k} 1$$

$$M_{y,k} = 119432,15 \text{ Nmm}$$

Fax,Rk - contribuição da resistência ao arrancamento, é o menor entre a resistência de tração do parafuso e a resistência ao embutimento

$$\begin{aligned} f_{e,k} &= 18,7 \text{ N/mm}^2 \\ f_{y,k} &= 900 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Logo a força adotada foi

$$F_{V,Rk2} = 1870 \quad \text{N}$$

$$R_d = 841,5 \quad \text{N}$$

$$R_{d,fi} = 2150,5 \quad \text{N}$$