

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MARIANA MASIERO FIANCO

**AVALIAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE
CONEXÕES METÁLICAS EM ESTRUTURAS DE MADEIRA
EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

MARINGÁ
2025

MARIANA MASIERO FIANCO

**AVALIAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE
CONEXÕES METÁLICAS EM ESTRUTURAS DE MADEIRA
EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

Orientadora: Profa. Dra. Gisele Cristina Antunes Martins

Coorientador: Prof. Dr. Fabio Martin Rocha

MARINGÁ

2025

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá - PR, Brasil)

F441a

Fianco, Mariana Masiero

Avaliação numérica do comportamento de conexões metálicas em estruturas de madeira em situação de incêndio / Mariana Masiero Fianco. -- Maringá, PR, 2025.
142 f. : il. color., figs., tabs.

Orientadora: Profa. Dra. Gisele Cristina Antunes Martins.

Coorientador: Prof. Dr. Fabio Martin Rocha.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2025.

1. Estruturas de madeira. 2. Conexões metálicas. 3. Análise numérica. 4. Incêndio. I. Martins, Gisele Cristina Antunes, orient. II. Rocha, Fabio Martin, coorient. III. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

CDD 23.ed. 624

MARIANA MASIERO FIANCO

AVALIAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE CONEXÕES METÁLICAS EM ESTRUTURAS DE MADEIRA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Dissertação de Mestrado apresentada no dia 25/08/2025, julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL e aprovada em sua forma final, como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente

GISELE CRISTINA ANTUNES MARTINS

Data: 26/08/2025 17:33:46-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Gisele Cristina Antunes Martins
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Estadual de Maringá
Professora Orientadora



Documento assinado digitalmente

FABIO MARTIN ROCHA

Data: 26/08/2025 17:54:18-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Fabio Martin Rocha
Curso de Graduação em Engenharia Civil
Universidade Federal do Triângulo Mineiro
Professor Coorientador



Documento assinado digitalmente

JULIO CESAR MOLINA

Data: 26/08/2025 18:02:59-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Julio Cesar Molina
Escola de Engenharia de São Carlos
Universidade de São Paulo



Documento assinado digitalmente

ELYSON ANDREW POZO LIBERATI

Data: 01/09/2025 09:13:17-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Elyson Andrew Pozo Liberati
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Estadual de Maringá

*Aos meus pais Antônio e Dulcinda, e à minha
irmã, Maiara.*

AGRADECIMENTOS

À Deus, primeiramente, por me abençoar, me proteger e me guiar a cada instante da minha existência.

Aos meus pais, Antônio e Dulcinda, por serem a base de quem sou, por não medirem esforços para proporcionar o que há de melhor para nossa família dentro das nossas possibilidades, por serem exemplo de respeito, educação e honestidade. Agradeço por cada “não” necessário, por cada ensinamento, cada conselho e cada oração. Sem vocês, nada disso aqui existiria.

À minha irmã, Maiara, por existir e ser a minha melhor amiga, minha metade, minha motivação, minha psicóloga, minha revisora, minha parceira, enfim, meu tudo e minha eterna "irmãzinha". Você é a pessoa mais importante da minha vida, eu sempre estarei aqui por você, nunca se esqueça disso.

Aos meus primos, Marcos e Larissa, por serem, além de companheiros na vida, verdadeiros anjos em diferentes etapas da minha trajetória acadêmica. Marcos acompanhou meus primeiros dias de aula até meu ensino médio, aguentando pinhão e “bom dia a todos” nesse período. Lari foi minha guia e amiga nos primeiros meses de UTFPR, ela quem me ensinou topografia e me emprestou as melhores sagas de literatura. Obrigada por tudo isso e muito mais. Além disso, vocês estão presentes nas minhas melhores lembranças de infância, são meus primos-irmãos e grandes exemplos. Tenho muito orgulho de vocês.

Às minhas amigas de longa data, Thaís, Maryeli, Cynthia, Fernanda e Izadora, por permanecerem presentes em minha vida mesmo com a distância física, e por representarem o verdadeiro significado de amizade. Vocês são as irmãs de outra mãe que a vida me deu, muito obrigado por tudo.

Às professoras da minha família, em especial à vó Angelina, por me inspirarem desde que eu era criança. E aos professores que continuaram a me inspirar na escola e na faculdade, por contribuírem na escolha da minha profissão.

À minha orientadora, Profa. Dra. Gisele Cristina Antunes Martins, e ao meu coorientador, Prof. Dr. Fabio Martin Rocha, pela paciência nessa jornada, pelos valiosos ensinamentos e por todo o suporte fornecido acadêmica e pessoalmente. Vocês são inspiração e exemplo para mim.

À banca examinadora, Prof. Dr. Julio Cesar Molina e Prof. Dr. Elyson Andrew Pozo Liberati, pelas importantes contribuições nas etapas de qualificação e defesa.

Aos meus amigos do PCV, Aloísio, Augusto, Guilherme, Gustavo, Silvio, Pâmela e Parolin, pelas enriquecedoras trocas na pesquisa e pelos momentos de descontração que tornaram a caminhada mais leve. Levarei sempre vocês comigo no meu coração.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PCV) da Universidade Estadual de Maringá (UEM) por terem contribuído para minha formação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Nada como procurar quando se quer achar alguma coisa. Quando se procura, geralmente se encontra alguma coisa, sem dúvida, mas nem sempre o que estávamos procurando.

J. R. R. Tolkien

RESUMO

O desempenho de estruturas de madeira tem despertado crescente interesse no meio técnico, especialmente devido à sua utilização em sistemas construtivos mais sustentáveis. As conexões metálicas utilizadas em estruturas de madeira desempenham papel essencial na segurança e estabilidade global da edificação. Em situações de incêndio, o comportamento térmico e mecânico dos materiais é severamente alterado e deve ser avaliado nos projetos, pois compromete a segurança estrutural. Este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento térmico e termoestructural de elementos de madeira e de conexões metálicas submetidos à ação do fogo, por meio de análises numéricas e normativas. A metodologia adotada envolveu modelagens computacionais com base em dados experimentais, com a realização de análises térmicas e termoestructurais no *software* Abaqus, versão 6.14. Foram avaliadas propriedades térmicas da madeira e o efeito de conexões metálicas na transferência de calor, além da aplicação de métodos normativos para estimativa da espessura carbonizada. Entre as principais conclusões do trabalho, pode-se citar a influência dos conectores metálicos no aumento da carbonização na região de conexão dos elementos, a necessidade de parâmetros térmicos específicos para madeiras brasileiras e a importância da caracterização da taxa de carbonização, visto que os métodos numéricos se mostraram mais conservativos que o método normativo, contribuindo para maior segurança no dimensionamento. Os resultados reforçam a importância de pesquisas voltadas ao contexto brasileiro para o aprimoramento dos critérios normativos e maior segurança no dimensionamento de estruturas de madeira expostas ao fogo.

Palavras-chave: Estruturas de Madeira. Ligações. Incêndio. Análise Numérica.

ABSTRACT

The performance of timber structures has attracted growing interest in the technical field, particularly due to their use in more sustainable construction systems. Steel connections used in timber structures play an essential role in the overall safety and stability of buildings. In fire situations, the thermal and mechanical behavior of materials is severely altered and must be evaluated during the design stage, as it compromises structural safety. This study aims to evaluate the thermal and thermo-structural behavior of timber elements and steel connections exposed to fire, through numerical and normative analyses. The adopted methodology involved computational modeling based on experimental data, including thermal and thermo-structural analyses in the Abaqus software, version 6.14. The thermal properties of timber and the effect of metal connections on heat transfer were evaluated, along with the application of normative methods to estimate the char depth. The main conclusions of the study highlight the influence of steel connectors in increasing charring in the connection region, the need for specific thermal parameters for Brazilian timbers, and the importance of characterizing the charring rate, as numerical methods proved more conservative than the normative method, contributing to greater safety in design. The results reinforce the importance of research focused on the Brazilian context to improve code provisions and ensure greater safety in the design of timber structures in fire.

Key-words: Timber Structures. Connections. Fire. Numerical Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Curva de incêndio-padrão	25
Figura 2.2 – Zonas de degradação numa seção de madeira.....	27
Figura 2.3 – Relação entre taxa de carbonização, densidade e teor de umidade (h)	29
Figura 2.4 – Seções transversais antes e depois da exposição ao fogo das vigas de (a) <i>Pinus</i> ; (b) <i>Lyptus</i>	29
Figura 2.5 – Ligações por: (a) Contato; (b) Aderência.....	31
Figura 2.6 – Ligações por penetração.....	31
Figura 2.7 – Ensaio experimental de Fleischer <i>et al.</i> (2002): (a) Configuração do ensaio; (b) Situação da conexão após o ensaio ao fogo.....	32
Figura 2.8 – Ensaio experimental de Ayme (2003): (a) Configuração da ligação; (b) Conexão posicionada no forno; (c) Situação da conexão após o ensaio ao fogo	33
Figura 2.9 – Tipologias avaliadas por Laplanche (2006): (a) Ligação madeira-metal; (b) Ligação madeira-madeira	34
Figura 2.10 – Exemplos de tipologias de conexão avaliadas por Erchinger (2009) em milímetros	35
Figura 2.11 – Tipologia D01.1: (a) Durante o ensaio; (b) Após a retirada do forno.....	35
Figura 2.12 – Exemplo de tipologia avaliada numericamente por Audebert <i>et al.</i> (2013): (a) Ilustração da tipologia B; (b) Modelo térmico	36
Figura 2.13 – Propriedades térmicas da madeira propostas: (a) Condutividade térmica; (b) Calor específico	37
Figura 2.14 – Esquema da aplicação da carga no ensaio experimental de Palma (2016)	38
Figura 2.15 – Geometrias de conexão avaliadas por Palma (2016): (a) A.1; (b) A.2; (c) A.3.....	38
Figura 2.16 – Tipos de ligações analisadas por Machado (2023): (a) Madeira-Madeira; (b) Madeira-Aço (chapa fina); (c) Madeira-Aço (chapa espessa).....	39
Figura 2.17 – Tipologias estudadas por Alam (2023): (a) madeira-aço-madeira (WSW); (b) aço-madeira-aço (SWS).....	40
Figura 2.18 – Ensaio experimental de Alam (2023).....	41
Figura 2.19 – Seção transversal residual da madeira após a exposição ao fogo	43
Figura 2.20 – Tipos de carbonização: (a) Espessura de carbonização básica ($e_{carb,0}$) e nominal ($e_{carb,n}$); (b) Carbonização unidimensional.....	44
Figura 2.21 – Método de proteção de conectores	45
Figura 2.22 – Relação entre a temperatura e a condutividade térmica da madeira	46

Figura 2.23 – Relação entre a temperatura e o calor específico da madeira e do carvão	47
Figura 2.24 – Razão da redução da densidade da madeira em função da temperatura	47
Figura 2.25 – Exemplo de proteção da cabeça do parafuso	49
Figura 2.26 – Exemplos de proteção adicional.....	50
Figura 2.27 – Proteção das bordas das chapas de aço: (a) Desprotegidas; (b) Protegidas por fendas; (c) Protegidas por tiras coladas; (d) Protegidas por painéis.....	51
Figura 2.28 – Condutividade térmica do aço em função da temperatura	55
Figura 2.29 – Calor específico do aço em função da temperatura	55
Figura 2.30 – Fator de redução da resistência da madeira.....	57
Figura 2.31 – Fator de redução do módulo de elasticidade da madeira	57
Figura 2.32 – Fatores de redução das propriedades mecânicas do aço	59
Figura 3.1 – Fluxograma da organização da metodologia.....	60
Figura 3.2 – Faces expostas ao fogo: (a) Layout dos ensaios; (b) representação ilustrativa....	65
Figura 3.3 – Modelagem bidimensional dos elementos: (a) <i>Lyptus</i> ; (b) <i>Pinus</i>	66
Figura 3.4 – Distribuição dos termopares: (a) Layout; (b) Modelo L4; (c) Modelo P8. Dimensões em milímetros	67
Figura 3.5 – Geometria da ligação tipo B. Dimensões em milímetros.....	68
Figura 3.6 – Faces expostas ao fogo e posição dos termopares	68
Figura 3.7 – Faces expostas à radiação e convecção: (a) na madeira; (b) nos pinos e parafuso	69
Figura 3.8 – Modelagem tridimensional e malha da ligação tipo B.....	69
Figura 3.9 – Região de apoios e aplicação do carregamento.....	70
Figura 3.10 – Geometria da ligação tipo A.1. Dimensões em milímetros	72
Figura 3.11 – Ensaio experimental de Palma (2016): (a) Estrutura antes de ir ao forno; (b) Estrutura logo após a abertura do forno.....	73
Figura 3.12 – Modelagem tridimensional do modelo A.1.....	74
Figura 3.13 – Detalhe nas malhas do modelo A.1: (a) Mecânico; (b) Térmico	75
Figura 3.14 – Regiões com elasticidade linear no modelo de Palma (2016).....	75
Figura 3.15 – Faces expostas à radiação e convecção no modelo de Palma (2016): (a) Madeira; (b) Pinos; (c) Chapa.....	76
Figura 3.16 – Pontos de leitura de temperatura na madeira: (a) Vista lateral; (b) Vista superior	77
Figura 3.17 – Pontos de leitura de temperatura no pino.....	77
Figura 4.1 – Evolução da temperatura no ponto C1 da viga de <i>Pinus</i>	79

Figura 4.2 – Evolução da temperatura no ponto E da viga de <i>Pinus</i>	80
Figura 4.3 – Evolução da temperatura no ponto C1 da viga de <i>Lyptus</i>	81
Figura 4.4 – Evolução da temperatura no ponto E da viga de <i>Lyptus</i>	82
Figura 4.5 – Variação da temperatura ao longo da seção transversal.....	84
Figura 4.6 – Taxas de carbonização para a viga de <i>Pinus</i>	85
Figura 4.7 – Taxas de carbonização para a viga de <i>Lyptus</i>	87
Figura 4.8 – Evolução da carbonização e fluxo de calor no interior da seção de <i>Pinus</i> com base nas propriedades térmicas da EN 1995-1-2:2004.....	88
Figura 4.9 – Evolução da carbonização e fluxo de calor no interior da seção de <i>Pinus</i> com base nas propriedades térmicas de Fernandes (2022).....	88
Figura 4.10 – Evolução da carbonização e fluxo de calor no interior da seção de <i>Pinus</i> com base nas propriedades térmicas de Audebert <i>et al.</i> (2013)	89
Figura 4.11 – Evolução da carbonização e fluxo de calor no interior da seção de <i>Lyptus</i> com base nas propriedades térmicas da EN 1995-1-2:2004.....	89
Figura 4.12 – Evolução da carbonização e fluxo de calor no interior da seção de <i>Lyptus</i> com base nas propriedades térmicas de Fernandes (2022).....	90
Figura 4.13 – Evolução da carbonização e fluxo de calor no interior da seção de <i>Lyptus</i> com base nas propriedades térmicas de Audebert <i>et al.</i> (2013)	90
Figura 4.14 – Seção transversal residual: (a) e (b) <i>Pinus</i> ; (c) e (d) <i>Lyptus</i>	91
Figura 4.15 – Seção residual da viga de <i>Pinus</i> : (a) Experimental de Martins (2016); (b) EN 1995-1-2:2004; (c) Fernandes (2022); (d) Audebert <i>et al.</i> (2013)	93
Figura 4.16 – Seção residual da viga de <i>Lyptus</i> : (a) Experimental de Martins (2016); (b) EN 1995-1-2:2004; (c) Fernandes (2022); (d) Audebert <i>et al.</i> (2013)	94
Figura 4.17 – Evolução temporal da espessura carbonizada da viga de <i>Pinus</i>	95
Figura 4.18 - Evolução temporal da espessura carbonizada da viga de <i>Lyptus</i>	95
Figura 4.19 – Modos de ruptura: (a) Ensaio experimental; (b) Análise numérica	97
Figura 4.20 – Plastificação dos conectores metálicos: (a) Representação da norma; (b) Análise numérica	98
Figura 4.21 – Curvas carga-deslocamento da análise mecânica em temperatura ambiente.....	99
Figura 4.22 – Evolução da temperatura no ponto TC1 (profundidade de 41 mm)	100
Figura 4.23 – Evolução da temperatura no ponto TC2 (profundidade de 26 mm)	102
Figura 4.24 – Evolução da temperatura no ponto TC3 (profundidade de 64 mm)	103
Figura 4.25 – Variação da temperatura ao longo da seção transversal.....	105
Figura 4.26 – Taxas de carbonização no ponto TC2, em 45 minutos e em 60 minutos.....	106

Figura 4.27 – Evolução da temperatura ao longo do pino.....	110
Figura 4.28 – Evolução da temperatura ao longo do parafuso	111
Figura 4.29 – Perfis de temperatura para diferentes tempos de exposição ao fogo na: (a) Região do pino; (b) Região do parafuso	112
Figura 4.30 – Carbonização da madeira aos 45 minutos na: (a) Região do pino; (b) Região do parafuso	113
Figura 4.31 – Carbonização da madeira na interface dos elementos de madeira aos 45 minutos de exposição	113
Figura 4.32 – Deslocamento na região dos conectores. Medidas em metros.....	114
Figura 4.33 – Tensões na região dos conectores. Medidas em Pa.....	115
Figura 4.34 – Tensão nos pinos e parafuso. Medidas em Pa.....	115
Figura 4.35 – Avanço da temperatura na seção M1 de acordo com a profundidade	118
Figura 4.36 - Avanço da temperatura na seção M2 de acordo com a profundidade	119
Figura 4.37 - Avanço da temperatura na seção M3 de acordo com a profundidade	121
Figura 4.38 – Perfis de temperatura da madeira na seção M1 em: (a) 10 minutos; (b) 30 minutos; (c) 50 minutos; (d) 70 minutos; (e) 90 minutos.....	122
Figura 4.39 – Perfis de temperatura da madeira na seção M2 em: (a) 10 minutos; (b) 30 minutos; (c) 50 minutos; (d) 70 minutos; (e) 90 minutos.....	122
Figura 4.40 – Perfis de temperatura da madeira na seção M3 em: (a) 10 minutos; (b) 30 minutos; (c) 50 minutos; (d) 70 minutos; (e) 90 minutos.....	123
Figura 4.41 – Evolução da temperatura nos pinos	124
Figura 4.42 – Comportamento termomecânico da ligação viga-pilar: (a) ensaio experimental; (b) modelagem numérica	125
Figura 4.43 – Evolução das taxas de carbonização nas seções M1, M2 e M3.....	126
Figura 4.44 – Carbonização da madeira na seção M1 em: (a) 30 minutos; (b) 45 minutos; (c) 60 minutos	129
Figura 4.45 – Carbonização da madeira na seção M2 em: (a) 30 minutos; (b) 45 minutos; (c) 60 minutos; (d) 75 minutos.....	129
Figura 4.46 – Carbonização da madeira na seção M3 em: (a) 30 minutos; (b) 45 minutos; (c) 60 minutos; (d) 75 minutos; (e) 90 minutos	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), em minutos.....	26
Tabela 2.2 – Determinação de k_0 para superfícies sem proteção (t em minutos).....	43
Tabela 2.3 – Taxas de carbonização para superfícies sem revestimento β_0 e β_n	45
Tabela 2.4 – Resistências ao fogo de conexões desprotegidas com membros laterais de madeira	48
Tabela 2.5 – Larguras das chapas de aço com bordas desprotegidas	50
Tabela 2.6 – Parâmetro k.....	52
Tabela 2.7 – Valores de k_{fi}	53
Tabela 3.1 – Coeficientes utilizados na análise numérica térmica	63
Tabela 3.2 – Características dos corpos de prova.....	65
Tabela 3.3 – Valores de tempo de resistência ao fogo no ensaio experimental	70
Tabela 3.4 – Propriedades mecânicas da madeira obtidas em ensaio experimental.....	71
Tabela 3.5 – Propriedades mecânicas do aço no modelo de Audebert <i>et al.</i> (2013).....	72
Tabela 3.6 – Propriedades mecânicas do aço no modelo de Palma (2016).....	76
Tabela 3.7 – Propriedades mecânicas da madeira no modelo de Palma (2016).....	76
Tabela 4.1 – Taxas de carbonização nos pontos C1 e E para a espécie <i>Pinus</i>	85
Tabela 4.2 – Taxas de carbonização nos pontos C1 e E para a espécie <i>Lyptus</i>	86
Tabela 4.3 – Espessura carbonizada e seção transversal residual da viga de <i>Pinus</i>	92
Tabela 4.4 – Espessura carbonizada e seção transversal residual da viga de <i>Lyptus</i>	92
Tabela 4.5 – Taxas de carbonização no ponto TC2 e em 45 e 60 minutos	106
Tabela 4.6 – Espessura carbonizada e seção transversal residual	108
Tabela 4.7 – Tempos de falha da ligação em situação de incêndio.....	114
Tabela 4.8 – Taxas de carbonização para diferentes tempos de análise.....	126
Tabela 4.9 – Espessura carbonizada e seção transversal residual em 45 minutos de exposição	131

LISTA DE SÍMBOLOS

a_{fi}	Acréscimo aplicado em elementos de ligação como medida de proteção em situação de incêndio
A_{res}	Área residual da seção transversal
b	Largura da seção transversal
c	Calor específico
CDP	<i>Concrete Damaged Plasticity</i>
d	diâmetro
E_0	Módulo de elasticidade longitudinal paralelo às fibras da madeira
E_{90}	Módulo de elasticidade longitudinal perpendicular às fibras da madeira
$e_{carb,0}$	Espessura carbonizada básica
$e_{carb,n}$	Espessura carbonizada nominal
e_{ef}	Espessura efetiva
ε	Deformação plástica
f_{b0}/f_{c0}	Relação entre a resistência à compressão biaxial e uniaxial
$f_{c,0}$	Resistência à compressão paralela às fibras da madeira
$f_{c,90}$	Resistência à compressão perpendicular às fibras da madeira
f_y	Resistência ao escoamento
$F_{v,Rk}$	Capacidade de carga lateral característica da conexão com fixadores em cisalhamento em temperatura ambiente
$F_{v,Rk,fi}$	Capacidade de carga lateral característica da conexão com fixadores em cisalhamento em temperatura elevada
G	Módulo de elasticidade transversal
h	Altura da seção transversal
I_{res}	Momento de inércia da seção residual
k	Parâmetro para o cálculo de $t_{d,fi}$
k_0	Fator de ajuste para carbonização em superfícies sem proteção
K_c	Fator de forma
k_{fi}	Fator de modificação em situação de incêndio
k_{flux}	Coeficiente que considera o aumento do fluxo de calor ao longo do conector
MLC	Madeira Lamelada Colada
$N_{u,exp}$	Capacidade de carga experimental
t	tempo de exposição ao fogo

t_1	Largura do elemento de madeira mais espesso da ligação
t_2	Largura do elemento de madeira menos espesso da ligação
t_{ch}	Tempo até o início da carbonização
$t_{d,fi}$	Tempo de resistência ao fogo para conexões desprotegidas
t_{fi}	Tempo de resistência ao fogo
t_{req}	Tempo Requerido de Resistência ao Fogo
$TRRF$	Tempo Requerido de Resistência ao Fogo
β_0	Taxa de carbonização básica
β_n	Taxa de carbonização nominal
γ_M	Coeficiente de segurança da conexão em temperatura ambiente;
$\gamma_{M,fi}$	Coeficiente de segurança da conexão em situação de incêndio
$\gamma_{M,fi}$	Coeficiente de segurança da conexão em situação de incêndio
η_{exp}	Razão de carga ou Taxa de carga
η_{fi}	Fator de redução para carga de projeto em situação de incêndio
Θ	Temperatura
λ	Condutividade térmica
μ	Parâmetro de viscosidade
ξ	Excentricidade
ρ	Densidade
τ	Tensão de cisalhamento
ν_{LR}	Coeficiente de Poisson na direção Longitudinal-Radial da madeira
ν_{RT}	Coeficiente de Poisson na direção Radial-Tangencial da madeira
ν_{TL}	Coeficiente de Poisson na direção Tangencial-Longitudinal da madeira
$\Psi (^\circ)$	Ângulo de dilatação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
1.1	JUSTIFICATIVA	20
1.2	OBJETIVOS	21
1.2.1	Objetivo Geral	21
1.2.2	Objetivos Específicos	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO EM ESTRUTURAS	23
2.1.1	Resistência ao fogo em elementos estruturais	24
2.2	COMPORTAMENTO DA MADEIRA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO.....	26
2.2.1	Taxa de carbonização	27
2.3	COMPORTAMENTO DE LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS DE MADEIRA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	30
2.4	PRESCRIÇÕES NORMATIVAS	41
2.4.1	ABNT NBR 7190-1:2022 – Projeto de estruturas de madeira – Parte 1: Critérios de dimensionamento	42
2.4.2	EN 1995-1-2:2004 – <i>Design of timber structures – Part 1-2: General – Structural fire design</i>	45
2.4.3	ABNT NBR 14323:2013 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio	54
2.5	PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	55
2.5.1	Madeira.....	56
2.5.2	Aço	57
3	METODOLOGIA.....	60
3.1	ANÁLISE NUMÉRICA	61
3.1.1	Análise numérica térmica	62
3.1.2	Análise numérica termoestrutural	64
3.2	CALIBRAÇÃO DOS MODELOS TÉRMICOS	64
3.2.1	Martins (2016).....	65
3.2.2	Audebert <i>et al.</i> (2013)	67
3.2.3	Palma (2016)	72

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	78
4.1	MARTINS (2016).....	78
4.1.1	Estudo das propriedades térmicas	78
4.1.2	Espessura carbonizada.....	84
4.1.3	Principais considerações	96
4.2	AUDEBERT <i>ET AL.</i> (2013)	96
4.2.1	Análise mecânica em temperatura ambiente	97
4.2.2	Estudo das propriedades térmicas	100
4.2.3	Determinação da seção transversal residual.....	106
4.2.4	Comportamento térmico da ligação	109
4.2.5	Comportamento termoestructural	114
4.2.6	Principais considerações	116
4.3	PALMA (2016).....	117
4.3.1	Comportamento térmico da ligação	117
4.3.2	Determinação da seção transversal residual.....	125
4.3.3	Principais considerações	132
5	CONCLUSÕES.....	134
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	135
	REFERÊNCIAS	136

1 INTRODUÇÃO

As estruturas de madeira têm sido utilizadas na construção civil desde os primórdios da humanidade, e continuam a desempenhar papel relevante na arquitetura contemporânea. Essa permanência se deve às propriedades naturais da madeira, como leveza, resistência, durabilidade e facilidade de trabalho, além de sua natureza renovável e de baixo impacto ambiental, o que a torna uma alternativa sustentável frente a outros materiais de construção.

No entanto, mesmo com os avanços tecnológicos e a crescente valorização da sustentabilidade, o uso da madeira como elemento estrutural ainda enfrenta certa resistência, especialmente em contextos que envolvem exigências elevadas de segurança, como em situações de incêndio. Essa resistência está associada, em grande parte, à falta de conhecimento técnico e à persistência de ideias equivocadas sobre seu comportamento, como a crença de que a madeira apodrece facilmente, possui baixa resistência mecânica e não apresenta desempenho satisfatório em caso de incêndio (Aflalo, 2020).

Contudo, a madeira apresenta um comportamento térmico que, quando adequadamente compreendido e considerado no projeto estrutural, pode contribuir positivamente para a segurança da edificação. Sua baixa condutividade térmica favorece a formação de uma camada carbonizada superficial que atua como isolante, reduzindo a velocidade de propagação do calor para o interior do elemento e preservando uma seção resistente (Pinto, 2005; Figueiroa e Moraes, 2009; Martins, 2016; Oliveira, 2019). Isso proporciona certa previsibilidade no desempenho da madeira em incêndios, o que tem motivado estudos mais aprofundados sobre o tema.

Para garantir a integridade de sistemas estruturais em madeira — especialmente aqueles compostos por múltiplos elementos ou que exigem grandes vãos —, são utilizados dispositivos de ligação responsáveis por interligar as peças e transmitir os esforços entre elas. O comportamento global da estrutura depende diretamente das características mecânicas dessas conexões, em que o desempenho estrutural está fortemente relacionado à qualidade e ao tipo de ligação empregada (Valle, 1999). Nas construções modernas, as conexões metálicas são amplamente adotadas, tanto pela eficiência quanto pela facilidade de execução.

Entretanto, a interação entre elementos de aço e madeira em estruturas representa um desafio complexo e crucial para a segurança estrutural em situações de incêndio, visto que, quando submetida às altas temperaturas, a estrutura de madeira tem seu comportamento afetado

pelo comportamento dessas ligações. Fatores como a taxa de carbonização ao redor do conector, o tipo de ligação empregada, a geometria da conexão e a proteção térmica aplicada são determinantes para o desempenho global da estrutura (Palma, 2016). A interação entre materiais tão distintos envolve uma série de fatores intrincados, desde a complexidade da composição da madeira até as propriedades de resistência ao fogo de ambos os materiais.

Portanto, a investigação do comportamento das conexões metálicas em estruturas de madeira em situação de incêndio constitui uma etapa essencial para garantir a segurança das edificações e aprimorar os critérios de dimensionamento. Diante deste cenário, a presente pesquisa propõe-se a investigar o comportamento de conexões metálicas em estruturas de madeira em situação de incêndio, por meio de modelagens numéricas térmicas e termoestruturais, considerando não apenas a resposta dos materiais individualmente, mas também sua interação e influência mútua, a fim de compreender a interação entre os materiais e fornecer subsídios para o desenvolvimento de soluções estruturais mais seguras e eficientes.

1.1 JUSTIFICATIVA

Nas últimas décadas, o interesse pelo comportamento da madeira em situação de incêndio tem crescido no Brasil, impulsionado pela busca por materiais mais sustentáveis e pelo reconhecimento das particularidades do desempenho térmico da madeira. Diversos estudos experimentais e numéricos foram desenvolvidos com o objetivo de compreender a evolução da temperatura, a formação da camada carbonizada e a perda progressiva de resistência dos elementos estruturais ao longo do tempo. Trabalhos como os de Moraes (2003), Pinto (2005), Barreira (2008) e Martins (2016) forneceram importantes contribuições nesse campo, abordando principalmente o desempenho de componentes isolados, como vigas e pilares.

Como resultado desses avanços, a revisão da ABNT NBR 7190, publicada em 2022, incluiu pela primeira vez um capítulo voltado ao dimensionamento de estruturas de madeira em situação de incêndio. Embora esse acréscimo represente um marco importante no cenário normativo nacional, o conteúdo relacionado às ligações ainda é bastante restrito, limitando-se a recomendações genéricas para conectores revestidos, sem considerar a complexidade do comportamento térmico e mecânico das conexões metálicas.

Essa lacuna é significativa, pois as ligações são elementos críticos para a integridade da estrutura, especialmente sob condições de incêndio, onde a interação entre materiais com

respostas térmicas tão distintas pode comprometer a estabilidade global. A escassez de estudos brasileiros que abordem especificamente o comportamento das conexões metálicas em altas temperaturas dificulta a adoção de critérios de projeto mais precisos, podendo levar a soluções superdimensionadas, conservadoras ou inseguras.

Dessa forma, justifica-se a realização desta pesquisa pela necessidade de aprofundar o conhecimento técnico sobre o desempenho de conexões metálicas em estruturas de madeira expostas ao fogo, contribuindo para o preenchimento de uma lacuna evidente na literatura nacional. Por meio de modelagens numéricas térmicas e termoestruturais, busca-se compreender os mecanismos de degradação, a influência da geometria e dos materiais envolvidos, bem como avaliar o impacto dessas variáveis no comportamento global da ligação. Os resultados obtidos poderão subsidiar melhorias nos critérios normativos e apoiar projetistas no desenvolvimento de soluções mais seguras, eficientes e fundamentadas.

Além da relevância técnica e científica, esta pesquisa também se vincula aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU). Destaca-se a ODS 11 – Cidades e Comunidades Sustentáveis, ao contribuir para edificações mais seguras e resilientes por meio da análise do comportamento da madeira em situação de incêndio; a ODS 12 – Consumo e Produção Responsáveis, ao valorizar a madeira como material renovável e de baixo impacto ambiental, incentivando práticas construtivas mais sustentáveis; e a ODS 9 – Indústria, Inovação e Infraestrutura, ao fomentar inovação na área de materiais e sistemas construtivos, com vistas ao aprimoramento dos critérios normativos nacionais. Dessa forma, o presente trabalho fortalece o elo entre sustentabilidade, inovação e segurança estrutural, colaborando para o avanço da engenharia civil alinhado às metas globais de desenvolvimento sustentável.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o comportamento térmico e termoestrutural de elementos e conexões metálicas em estruturas de madeira expostas ao fogo, por meio de análise numérica e analítica.

1.2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, destacam-se:

- Analisar as propriedades térmicas previstas em normas (EN 1995-1-2:2004) e literaturas nacionais e internacionais (Audebert *et al.* (2013) e Fernandes (2022)), visando a melhor correlação para aplicação em modelos numéricos;
- Analisar as previsões normativas de dimensionamento para ligações metálicas propostas pela EN 1995-1-2:2004 em altas temperaturas;
- Avaliar a influência das conexões metálicas na seção transversal residual de elementos estruturais de madeira, com base no método avançado da EN 1995-1-2:2004 e em análises numéricas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção, apresenta-se a fundamentação teórica dos principais temas abordados neste trabalho. Inicia-se com uma visão sobre a segurança contra incêndio em estruturas, tratando de conceitos como tempo de resistência ao fogo, proteção ativa e proteção passiva. Segue-se para a explanação acerca do comportamento da madeira em altas temperaturas, abordando conceitos como taxa de carbonização e degradação da madeira em situação de incêndio. Após, explora-se o comportamento das ligações metálicas em estruturas de madeira em situação de incêndio, apresentando as pesquisas bibliográficas sobre o tema com ênfase experimental e numérica. Por fim, faz-se uma revisão das normas de estruturas de madeira e estruturas de aço, abordando as propriedades térmicas e mecânicas.

2.1 SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO EM ESTRUTURAS

De acordo com Barroso, Ferreira e Lima (2019) pode-se destacar que as principais consequências dos incêndios em edifícios incluem danos às pessoas e ao ambiente, impacto negativo de natureza social e econômica, deterioração do patrimônio histórico e cultural, além de perdas materiais. Dessa forma, a garantia de segurança estaria associada à isenção desses riscos, entretanto, Ono (2007) afirma que, na prática, a isenção total de tais riscos é impossível, podendo-se entender a segurança contra incêndio como o conjunto de medidas de proteção que devem estar compatibilizadas e racionalmente integradas. De acordo com Silva *et al.* (2008), o conjunto de medidas inclui proteções passivas e ativas. Embora possuam objetivos específicos diferentes, essas medidas atuam de modo complementar em prol da segurança da edificação no processo de combate ao incêndio.

As medidas de proteção passiva contra incêndio são incorporadas ao próprio projeto e estrutura de um edifício para retardar a propagação do fogo, reduzir os danos causados pelo incêndio e facilitar a evacuação segura dos ocupantes. Como exemplo de medidas passivas se destacam a compartimentação, o controle de materiais de acabamento e revestimento (CMAR), a segurança estrutural e as saídas de emergência. Essas medidas visam principalmente, limitar a propagação do fogo, fumaça e calor, proporcionando mais tempo para a evacuação das pessoas e permitindo que o corpo de bombeiros possa agir e controlar o incêndio (Barroso; Ferreira; Lima; 2019; Silva *et al.*, 2008; Vidal, 2016).

Oliveira (2008) ressalta que as medidas passivas são intrínsecas ao projeto estrutural e são difíceis de serem modificadas após a conclusão da obra, o que pode acarretar em custos significativos para sua correção ou instalação posterior, destacando a importância de previsão destas medidas ainda em fase de projeto.

Por outro lado, as medidas de proteção ativas correspondem aos equipamentos e dispositivos utilizados no combate direto ao incêndio iniciado, visando o controle da propagação do fogo e buscando a contenção ou extinção das chamas (Novak, 2017). Os extintores, hidrantes, alarmes de incêndio, chuveiros automáticos (*sprinklers*) e detectores de fumaça são alguns exemplos de dispositivos empregados como meios ativos na proteção contra incêndio.

2.1.1 Resistência ao fogo em elementos estruturais

De acordo com ABNT NBR 14432:2001, intitulada “Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento”, pode-se definir que um elemento é resistente ao fogo quando, por um determinado período de tempo submetido a ação do fogo, o elemento é capaz de manter a resistência mecânica, a estanqueidade e o isolamento.

Sendo que, considera-se que manter a resistência mecânica de um elemento construtivo, significa assegurar que a estrutura não sofra danos significativos que comprometa sua estabilidade e que esse elemento seja capaz de suportar as cargas e permanecer funcional durante um tempo determinado de exposição ao fogo. A estanqueidade é a capacidade de um elemento construtivo de impedir a ocorrência de fissuras ou aberturas, através das quais podem passar chamas e gases quentes. O isolamento térmico é definido como a habilidade de um componente da construção de evitar que ocorram aumentos de temperatura significativos na superfície não exposta ao fogo (ABNT NBR 14432, 2001).

O período aos quais esses critérios devem ser atendidos é conhecido como Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), definido pela ABNT NBR 14432:2001 como o tempo mínimo de resistência ao fogo de um elemento construtivo quando sujeito ao incêndio-padrão. Por sua vez, o incêndio-padrão é o nome que se dá a elevação padronizada de temperatura em função do tempo, obedecendo a Equação (2.1) que forma a curva de temperatura *versus* tempo ilustrada na Figura 2.1, proposta pela ISO 834:2025, e adotada pela

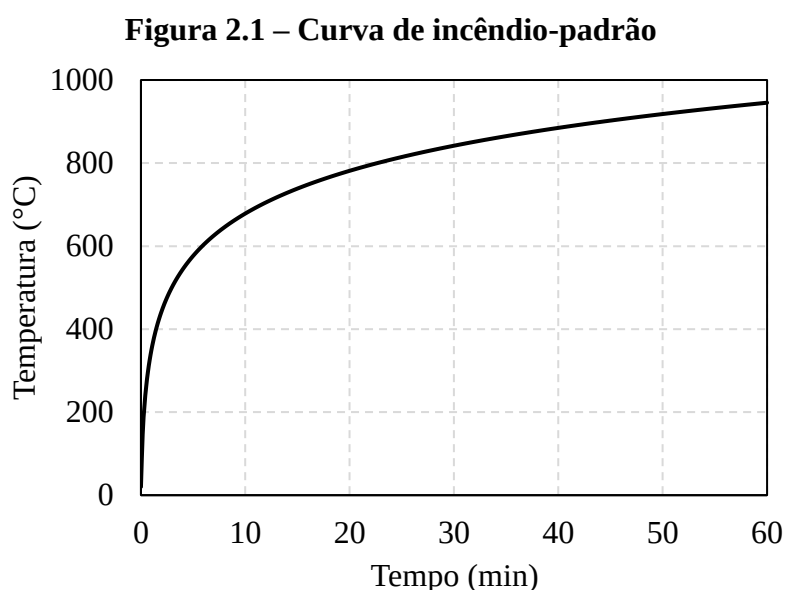
norma brasileira ABNT NBR 5628:2001 intitulada Componentes construtivos estruturais – Determinação da resistência ao fogo.

$$\theta = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8t + 1) \quad (2.1)$$

Em que,

θ é a temperatura, em °C;

t é o tempo, em minutos.



Fonte: Adaptado de ISO 834 (2025)

Para determinar o tempo requerido de resistência ao fogo, são considerados fatores como o tipo de ocupação e a altura da edificação. As normas de segurança contra incêndios, como as estabelecidas pelo Corpo de Bombeiros e pelos códigos de construção locais, geralmente especificam os requisitos mínimos de resistência ao fogo para diferentes tipos de edifícios e situações. Em nível nacional, a ABNT NBR 14432:2001 estabelece os tempos necessários de resistência ao fogo (TRRF) para cada situação, considerando o potencial destrutivos dos incêndios condicionados por fatores associados ao tipo de ocupação, a área, a profundidade do subsolo, a altura da edificação, conforme exemplificado na Tabela 2.1. As classes indicam as medidas de profundidade (h_s) e altura da edificação (h) e são dadas em metros.

Tabela 2.1 – Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), em minutos

Ocupação	Profundidade		Altura da edificação				
	Classe S ₁ h _s > 10	Classe S ₂ h _s ≤ 10	Classe P ₁ h ≤ 6	Classe P ₂ 6 < h ≤ 12	Classe P ₃ 12 < h ≤ 23	Classe P ₄ 23 < h ≤ 30	Classe P ₅ h > 30
Residencial	90	60 (30)	30	30	60	90	120
Serviços de hospedagem	90	60	30	60 (30)	60	90	120
Comercial varejista	90	60	60 (30)	60 (30)	60	90	120
Serviços profissionais, pessoais e técnicos	90	60 (30)	30	60 (30)	60	90	120

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 14432 (2001)

2.2 COMPORTAMENTO DA MADEIRA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

A madeira é um material de origem vegetal, heterogêneo e anisotrópico, composto por uma estrutura celular complexa, apresentando células com formas e tamanhos variados à cada espécie (Carvalho *et al.*, 2009). Essa estrutura confere à madeira propriedades mecânicas notáveis, como resistência à compressão, tração, flexão e cisalhamento, tornando-a adequada para uma variedade de aplicações estruturais.

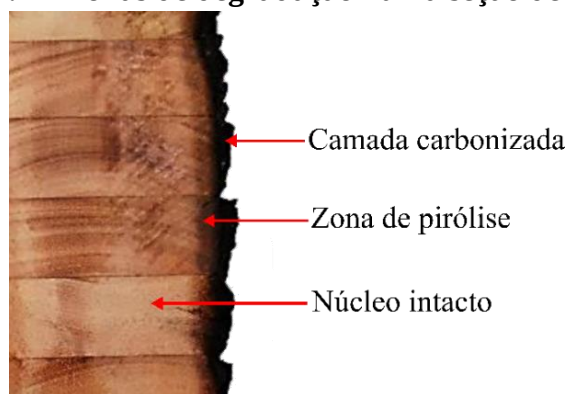
Quando submetida às altas temperaturas, a madeira exibe um comportamento específico devido à sua composição química e estrutura celular, passando por um processo de decomposição térmica conhecido como carbonização. O processo de carbonização na madeira acontece em diferentes estágios de temperatura. Inicialmente ocorre a eliminação de água, seguida pela volatilização dos componentes da madeira, como gases e líquidos inflamáveis, que são essenciais para a propagação do fogo, alimentando o processo de combustão (Riegel *et al.*, 2008).

De acordo com Figueiroa e Moraes (2009), a combustão é um processo de transformação térmica que ocorre na presença de oxigênio ou ar, em quantidade suficiente para promover sua decomposição completa por uma fonte externa de calor. Em função de a madeira ser um material combustível, as altas temperaturas promovem a decomposição térmica dos componentes da madeira, resultando na liberação de gases inflamáveis e produzindo chama, esse processo passa a acontecer em cadeia. Quando esta transformação não recebe oxigênio suficiente, ou o recebe de modo controlado, ocorre a carbonização, deixando como resíduo sólido o carvão.

O carvão é composto principalmente por carbono e outros elementos residuais. Esse material se acumula na superfície da madeira, formando uma camada carbonizada que possui características de um isolante térmico, atuando como uma barreira temporária contra a propagação do fogo e reduzindo o fluxo de calor para o interior da peça de madeira.

Logo abaixo da camada de carvão encontra-se a zona de pirólise, uma camada de espessura menor, na qual as propriedades físicas e mecânicas da madeira estão sofrendo transformações devido à ação do fogo, mas ainda não estão completamente decompostas (Barreira, 2008; Costa, 2017). Por fim, a parte restante da seção compreende o núcleo da peça de madeira, onde a temperatura encontra-se mais baixa, o material se mantém intacto com as propriedades mecânicas originais, contribuindo para a resistência da estrutura (Barreira, 2008). As zonas de degradação térmica da madeira podem ser observadas na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Zonas de degradação numa seção de madeira



Fonte: Adaptado de Martins (2016)

Conforme relatado por Buchanan (2000), a madeira começa o processo de pirólise com a temperatura em torno de 200°C e é considerada carbonizada por volta de 300°C. Aos 100°C, o vapor gerado pelo aquecimento da água da madeira pode causar o amolecimento do material e afetar a resistência à compressão. A norma europeia EN 1995-1-2:2004 considera a isoterma de 300°C como a posição limite entre o núcleo intacto de madeira e a porção do material carbonizado.

2.2.1 Taxa de carbonização

Pinto (2005) relata que o colapso dos elementos de madeira e seus produtos derivados é primariamente atribuído à diminuição da área de resistência, isto é, à gradual redução da seção

transversal exposta ao fogo. A determinação da espessura da camada carbonizada pode ser alcançada por meio de modelos empíricos baseados em dados experimentais, bem como por modelos teóricos embasados em princípios físicos e químicos. É identificada tanto pela perda de massa (g/s), também conhecida como taxa de combustão, quanto pelo crescimento da camada carbonizada (mm/min), referida como taxa de carbonização.

A taxa de carbonização é um parâmetro importante para analisar o comportamento da madeira em situações de incêndio, pois a carbonização do material tem forte influência na resistência ao fogo de elementos de madeira (Martins, 2016).

Alguns fatores influenciam diretamente a taxa de carbonização, como a densidade da madeira, o teor de umidade, as dimensões das peças e a geometria da seção transversal, afetando sua resistência ao fogo (Mikkola, 1991; Njakouo; Dotreppe; Franssen, 2004; Pinto, 2005; Buchanan; Abu, 2017).

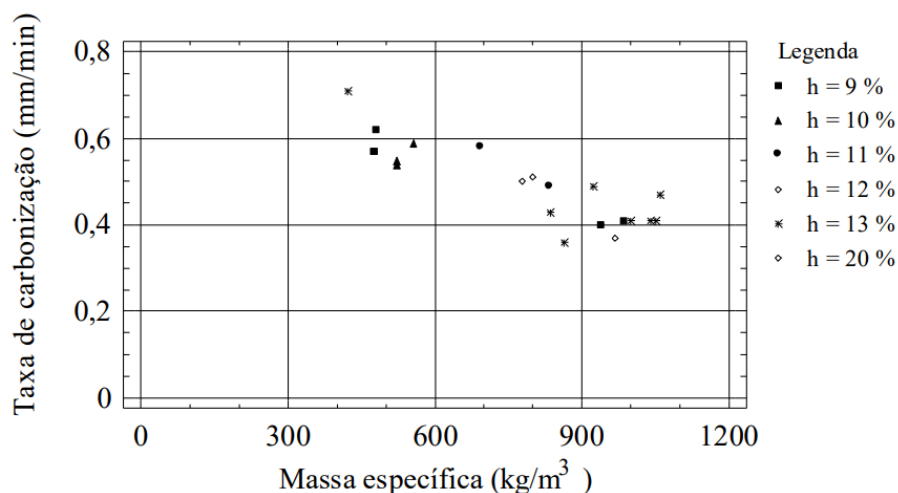
A umidade presente na madeira pode retardar o processo de combustão até a evaporação da água, reduzindo assim a taxa de carbonização. A densidade é um fator significativo, visto que espécies de madeiras mais densas tendem a apresentar taxas de carbonização mais lentas, enquanto madeiras menos densas podem carbonizar mais rapidamente, ou seja, quanto menor é a densidade de um elemento de madeira, maior é a sua taxa de carbonização (Mikkola, 1991).

Njankouo, Dotreppe e Franssen (2004) calcularam a taxa de carbonização de espécies folhosas com teor de umidade entre 9% e 20%, com densidades entre 500 e 1000 kg/m³, considerando 300°C como a temperatura de carbonização e em conformidade com a curva de incêndio padrão da ISO 834:2025. Os resultados encontrados para a taxa de carbonização foram situados entre 0,37 e 0,71 mm/min, como mostrado pela Figura 2.3, onde é possível observar que quanto maior a densidade, menor é a taxa de carbonização.

Além de estudos internacionais, diversos trabalhos desenvolvidos no Brasil também têm se dedicado à determinação da taxa de carbonização, contribuindo para a caracterização do desempenho de espécies nativas e comerciais.

Martins (2016) avaliou o comportamento de vigas de Madeira Lamelada Colada em altas temperaturas comparando peças com madeiras das espécies de *Pinus sp.* e *Lyptus*, com densidades médias de 505 kg/m³ e 743 kg/m³, respectivamente. Os elementos compostos por lamelas de *Pinus sp.*, apresentaram taxa de carbonização em torno 1,10 mm/min na largura e 1,11 mm/min na altura com 32 minutos de exposição ao fogo e de 0,91 mm/min na largura e 0,98 mm/min na altura após 40 minutos de exposição (Figura 2.4 (a)).

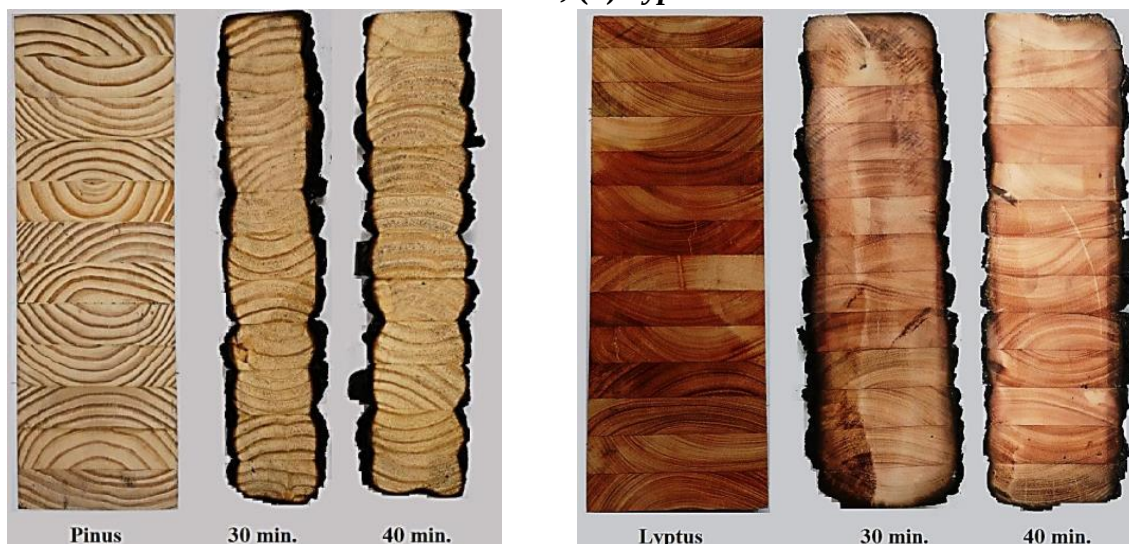
Figura 2.3 – Relação entre taxa de carbonização, densidade e teor de umidade (h)



Fonte: Njankouo, Dotreppe e Franssen (2004)

E, os elementos de MLC compostos por lamelas de *Lyptus* (Figura 2.4 (b)), apresentaram taxas de carbonização de 0,67 e 0,80 mm/min (largura e altura) para 32 minutos, e 0,59 e 0,74 mm/min aos 40 minutos de exposição ao fogo.

Figura 2.4 – Seções transversais antes e depois da exposição ao fogo das vigas de (a) *Pinus*; (b) *Lyptus*



(a)

(b)

Fonte: Martins (2016)

Oliveira (2019) estudou a carbonização de treze diferentes espécies de madeira do tipo folhosas, avaliando corpos de prova cúbicos de 150 mm de aresta. Foram obtidos valores de taxas de carbonização unidimensional de 0,63 mm/min, 0,44 mm/min e 0,50 mm/min para

intervalos de densidade de 600-640 kg/m³, 700-1000 kg/m³ e 1000-1300 kg/m³, respectivamente.

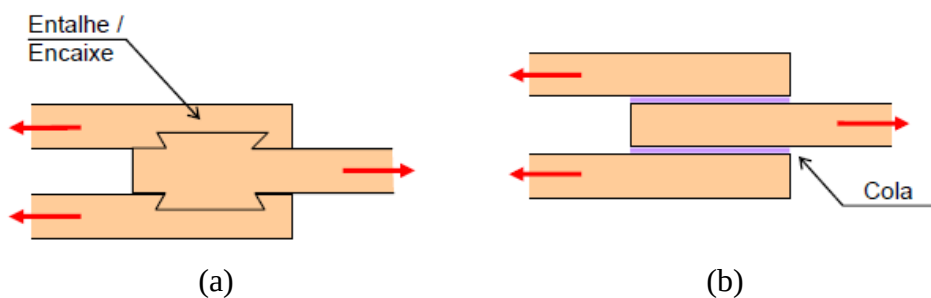
Outros fatores influentes na taxa de carbonização são as dimensões e configuração geométrica da seção transversal das peças de madeira. Para elementos de menor dimensão, a taxa de carbonização tende a ser superior àquela observada em elementos de maiores dimensões, atribuível à maior área superficial específica dos primeiros em comparação com os últimos. De acordo com Pinto (2005) e com Buchanan e Abu (2017), a taxa de carbonização é maior para peças de seção transversal retangular do que para peças circulares, em virtude da maior exposição ao calor nas arestas do material. Esses estudos também corroboram que a taxa inicial de carbonização é mais elevada, alcançando a estabilização posteriormente, em decorrência da formação de uma camada carbonizada protetora resultante do processo de combustão.

2.3 COMPORTAMENTO DE LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS DE MADEIRA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

De acordo com Calil Junior *et al.* (1998), os principais tipos de ligações entre peças estruturais de madeira podem ser classificados em ligação por contato, por aderência e por penetração, e sua eficácia depende de fatores como o tipo de metal utilizado, a tipologia da ligação e a qualidade da instalação.

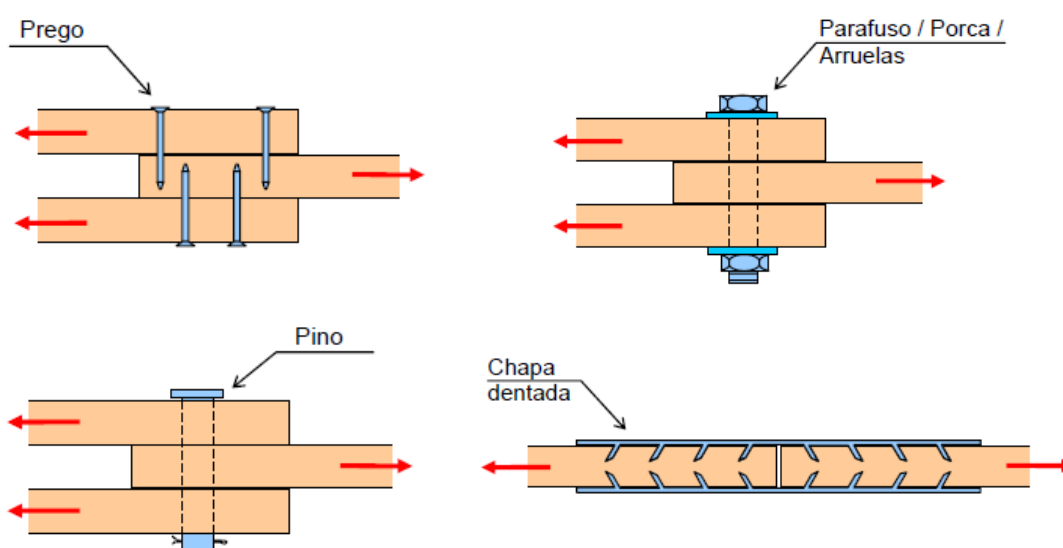
Nas ligações por contato, a madeira trabalha com o esforço de compressão e realiza o principal trabalho de transmissão de esforços, um exemplo desse tipo de ligação são os encaixes, ilustrado pela Figura 2.5 (a). As ligações por aderência são caracterizadas pelo uso de uma camada fina de adesivo entre parte da área das peças, ilustrado na Figura 2.5 (b). Para as ligações por penetração, são utilizados elementos de ligação como pregos, parafusos, pinos, chapas dentadas ou cavilhas (Figura 2.6).

Figura 2.5 – Ligações por: (a) Contato; (b) Aderência



Fonte: Pacheco (2015)

Figura 2.6 – Ligações por penetração



Fonte: Pacheco (2015)

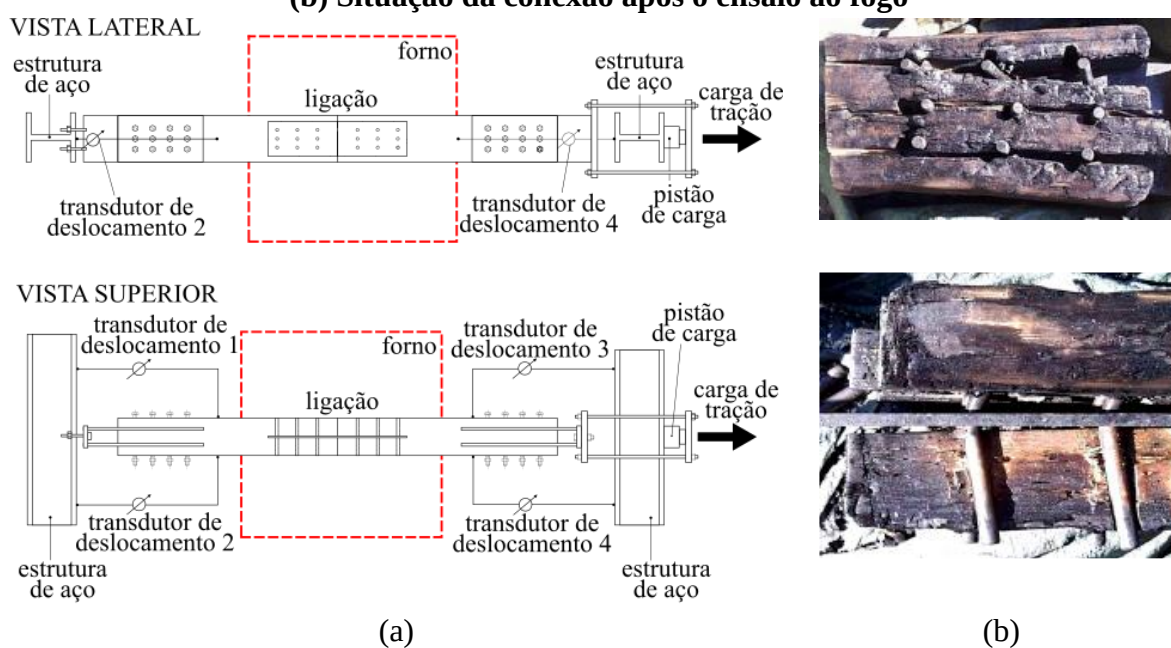
Nesse contexto, o tipo de ligação abordado no presente trabalho refere-se às ligações por penetração, com uso de elementos de ligação metálica. Portanto, o referencial teórico a partir deste momento será focado em apresentar conceitos relacionados ao funcionamento de ligações metálicas em estruturas de madeira e, em seguida, abordará uma revisão de pesquisas desenvolvidas sobre tais ligações em situação de incêndio.

A avaliação do comportamento dessas conexões envolve uma análise multidisciplinar que abrange aspectos estruturais, térmicos e mecânicos. Deve-se considerar não apenas a resistência ao fogo dos materiais utilizados nas conexões, mas também a influência do calor sobre as propriedades físicas e mecânicas da madeira e do metal, bem como o efeito da expansão térmica sobre a integridade das uniões.

Métodos experimentais e computacionais têm sido desenvolvidos para investigar o desempenho das conexões metálicas em condições de incêndio. Ensaios de laboratório, para avaliação de resistência ao fogo e análises termomecânicas, permitem avaliar o comportamento real das conexões em diferentes cenários de incêndio, enquanto modelos computacionais, como simulações por elementos finitos, possibilitam uma análise mais detalhada dos fenômenos envolvidos.

Fleischer (2002) realizou uma série de ensaios experimentais onde abordou a capacidade de carga de ligações metálicas em peças de madeira em condições normais e de incêndio, seguindo as normas EN 1363-1:1998 e EN 1363-2:1998. As conexões eram compostas por pinos e uma chapa de aço além do elemento de madeira, a configuração do ensaio é ilustrada na Figura 2.7 (a). A situação de uma das conexões analisadas, após 30 minutos de exposição ao fogo, é apresentada na Figura 2.7 (b).

Figura 2.7 – Ensaio experimental de Fleischer *et al.* (2002): (a) Configuração do ensaio; (b) Situação da conexão após o ensaio ao fogo



(a) (b)
Fonte: Adaptado de Fleischer *et al.* (2002)

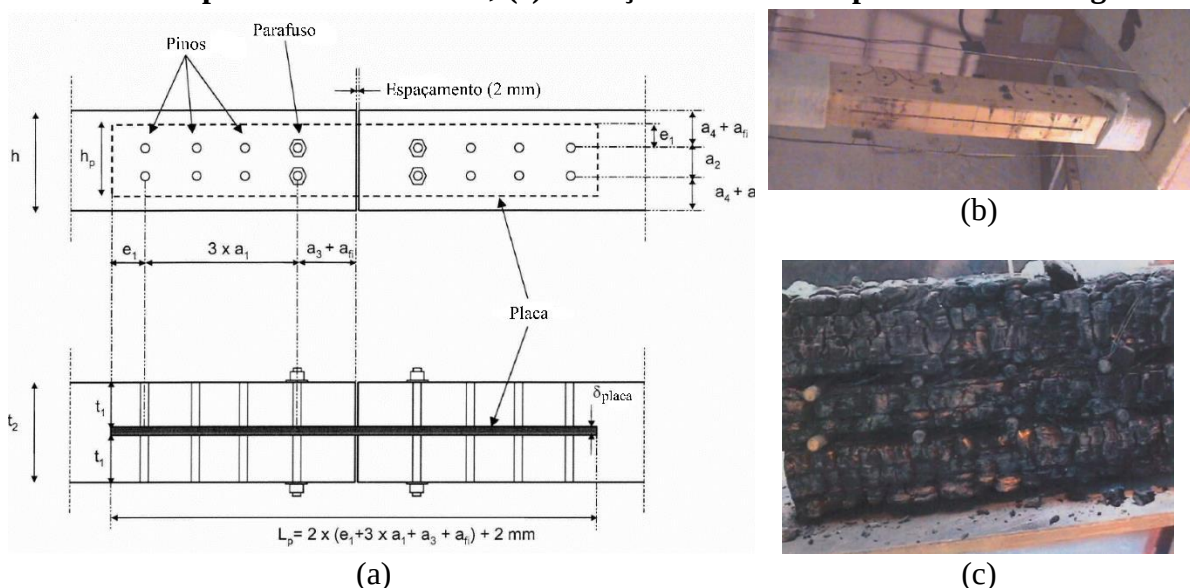
Os experimentos revelaram que a resistência ao fogo variou de acordo com a largura do elemento de madeira na região das ligações, com peças de larguras maiores apresentando maior resistência. As ligações que foram projetadas para uma exposição ao fogo de 30 minutos atenderam ao requisito com uma largura de 180 mm, entretanto, para essa mesma largura, não

foi alcançada uma duração de exposição ao fogo de 60 minutos, mas em ligações com 260 mm de largura atenderam a resistência exigida.

Os resultados também destacaram a necessidade de atualização das normas vigentes na época, EN 1363-1:1998 e EN 1363-2:1998, para refletir o real desempenho das conexões de madeira em situação de incêndio, havendo atualização dessas normas em 2020. Em termos de falhas, várias combinações de mecanismos foram observadas, incluindo falhas do material da conexão e da madeira lateral. Em resumo, Fleischer *et al.* (2002) destaca a importância de se considerar fatores como a seção transversal das peças de madeira para melhorar a segurança estrutural.

Ayme (2003) elaborou um relatório referente aos resultados experimentais de onze ensaios de conexões com elementos de madeira e de aço, considerando duas seções de corte, submetidas a condições de incêndio. As ligações eram compostas por duas vigas de madeira idênticas, conectadas por uma placa metálica e duas fileiras de quatro dispositivos metálicos, sendo três pinos e um parafuso por fileira, como ilustrado na Figura 2.8 (a). Analisou-se características específicas das montagens, como a disposição dos elementos e as distâncias entre eles, levando em conta requisitos de segurança e normas técnicas.

Figura 2.8 – Ensaio experimental de Ayme (2003): (a) Configuração da ligação; (b) Conexão posicionada no forno; (c) Situação da conexão após o ensaio ao fogo



Fonte: Adaptado de Ayme (2003)

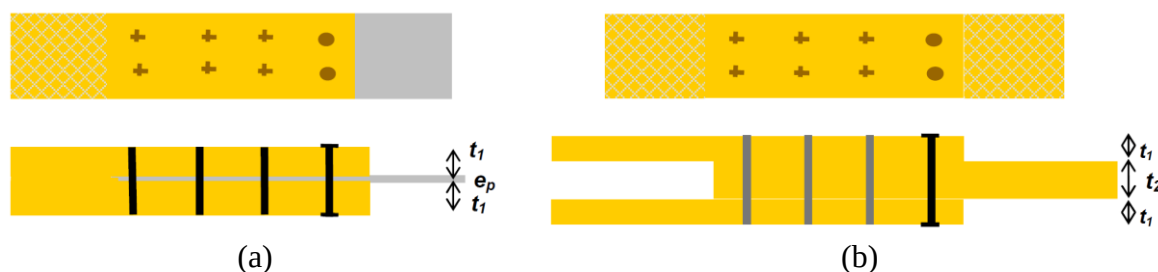
A Figura 2.8 (b) apresenta a imagem de um dos elementos posicionado dentro do forno, antes da realização do ensaio, enquanto a Figura 2.8 (c) destaca a situação da conexão após a

retirada do forno. Dentre os fatores analisados no ensaio, destacam-se o aquecimento medido nos materiais, a duração da estabilidade, o deslizamento, a localização e o tipo das falhas de ruptura e a taxa de carbonização nos elementos de madeira.

Ayme (2003) destaca que as medidas de espessura residual nas faces superior e inferior das vigas de madeira são menos precisas do que para as faces laterais, devido à não homogeneidade do material. Portanto, para a análise, tomou como base os valores medidos nas faces laterais, calculando uma taxa de carbonização lateral média de 0,71 mm/min, muito próximo do valor de 0,70 mm/min, recomendado pela EN 1995-1-2:2004.

Laplanche (2006) desenvolveu um modelo termomecânico tridimensional de elementos finitos, considerando campos térmicos e interações de tensão, para a representação do comportamento de ligações cravadas e parafusadas em estruturas de madeira carregadas à uma força de tração longitudinal, sob ação do fogo. Dois modelos foram validados, abordando propriedades térmicas e mecânicas dos materiais, sendo uma ligação madeira-metal (Figura 2.9 (a)) e uma ligação madeira-madeira (Figura 2.9 (b)).

Figura 2.9 – Tipologias avaliadas por Laplanche (2006): (a) Ligação madeira-metal; (b) Ligação madeira-madeira



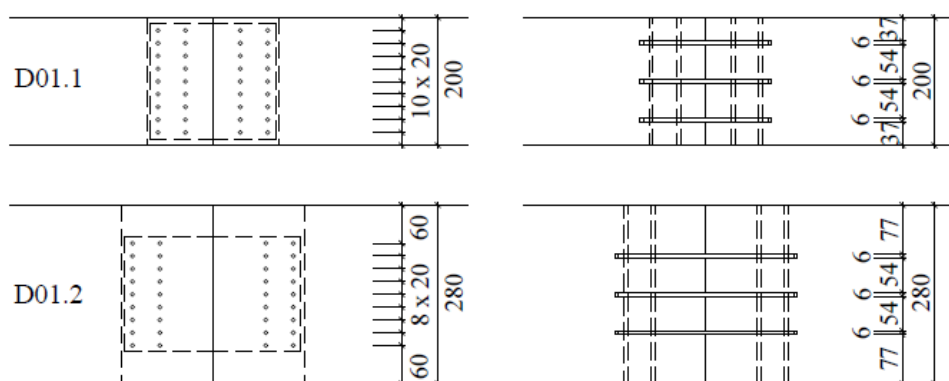
Fonte: Laplanche (2006)

Concluiu-se que a introdução de campos térmicos e coeficientes de redução permitiu simulações com erro inferior a 10%. Observou-se a redução da rigidez das montagens com a exposição ao fogo e a influência do modo de funcionamento. A comparação com a teoria de Johansen destacou a necessidade de avaliar as temperaturas para determinar a resistência das montagens. Contudo, a pesquisa de Laplanche (2006) se limitou à tração longitudinal e sugeriu futuras investigações sobre outras ações mecânicas e a inclusão de ações térmicas naturais para uma abordagem mais abrangente.

Erchinger (2009) desenvolveu um programa de ensaios experimentais de ligações de aço-madeira submetidas ao cisalhamento múltiplo à temperatura ambiente e em condições de

incêndio, cujo objetivo foi determinar os fatores de influência relevantes e os seus efeitos no comportamento da conexão sob exposição ao fogo. As conexões eram compostas por duas vigas de madeira, e chapas de aço e pinos metálicos de quantidades variáveis, sendo testadas cinco diferentes tipologias de conexão, a Figura 2.10 apresenta duas das tipologias analisadas por Erchinger (2009). A Figura 2.11 mostra o ensaio experimental para uma das tipologias testadas.

Figura 2.10 – Exemplos de tipologias de conexão avaliadas por Erchinger (2009) em milímetros



Fonte: Erchinger (2009)

Figura 2.11 – Tipologia D01.1: (a) Durante o ensaio; (b) Após a retirada do forno



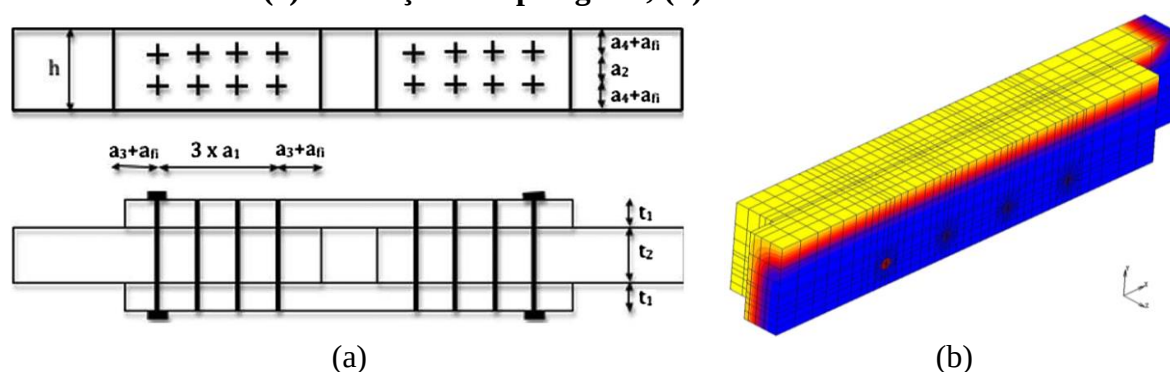
Fonte: Erchinger (2009)

Os testes revelaram falhas por escorregamento e embutimento dos furos dos pinos, devido às altas temperaturas da madeira próxima aos elementos de conexão. As análises térmicas realizadas para compreender a influência da temperatura na resistência e rigidez da madeira e do aço, destacaram a importância da distribuição de temperatura na seção transversal das conexões.

O autor ainda concluiu que é crucial desenvolver métodos práticos para avaliar a resistência dessas conexões em incêndios, considerando a complexidade do processo de decomposição da madeira e as variações nas propriedades dos materiais.

Audebert *et al.* (2013) desenvolveram um modelo numérico de análise do comportamento termomecânico de tipologias de ligações por pinos e parafusos anteriormente testadas em ensaios experimentais desenvolvidos por Dhima (1999) e por Laplanche (2003), no qual foi possível representar o comportamento dos materiais componentes da conexão em situação de incêndio. A Figura 2.12 (a) ilustra a geometria da tipologia B, testada experimentalmente por Laplanche (2003), enquanto a Figura 2.12 (b) apresenta a modelagem térmica da mesma conexão.

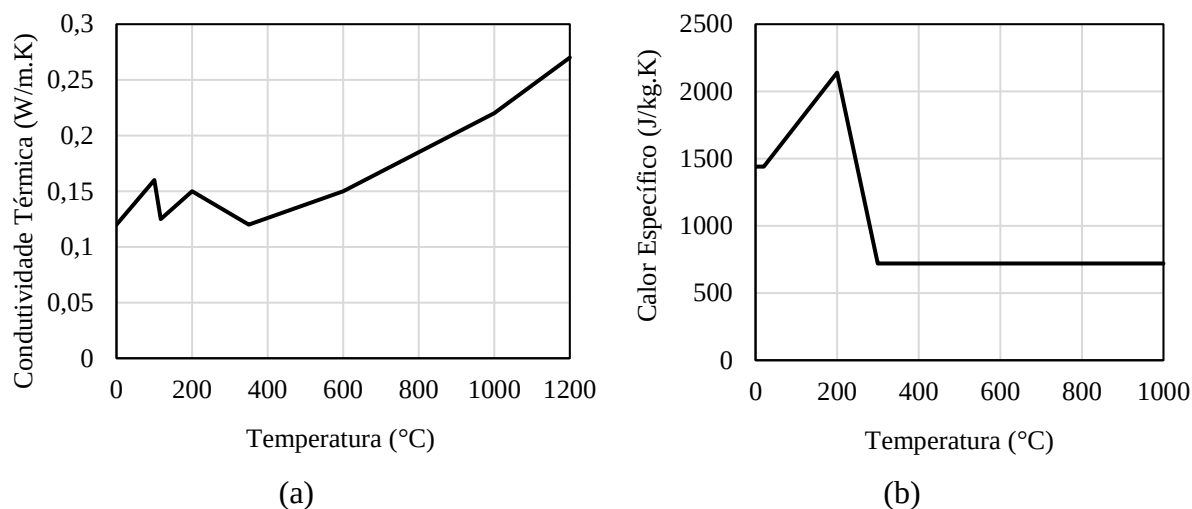
Figura 2.12 – Exemplo de tipologia avaliada numericamente por Audebert *et al.* (2013): (a) Ilustração da tipologia B; (b) Modelo térmico



Fonte: Audebert *et al.* (2013)

Para representar as propriedades térmicas do aço, Audebert *et al.* (2013) utilizaram as recomendações da EN 1993-1-2:2005, entretanto, para representar as propriedades térmicas da madeira, não utilizaram os dados disponíveis em norma, pois, após uma revisão de literatura, os autores concluíram que os valores de condutividade térmica propostos por Janssens (1994) (Figura 2.13 (a)) e valores de calor específico propostos por Fredlund-Janssens (1993-1994) (Figura 2.13 (b)) seriam mais apropriadas para representar a transferência de calor dentro das conexões.

Figura 2.13 – Propriedades térmicas da madeira propostas: (a) Condutividade térmica; (b) Calor específico



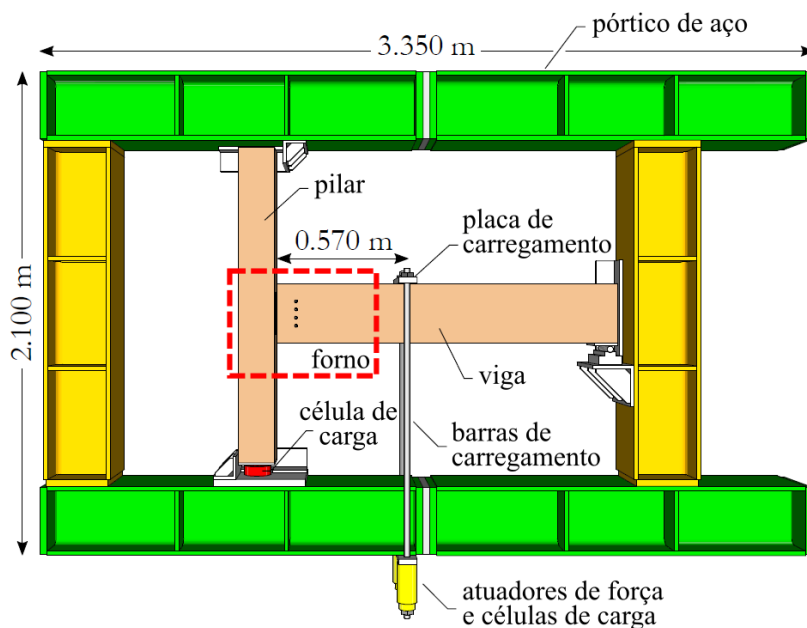
Fonte: Adaptado de Audebert *et al.* (2013)

Palma (2016) realizou ensaios experimentais de ligações aço-madeira em estruturas viga-pilar à temperatura ambiente e em temperaturas elevadas. Os valores de resistência da madeira, obtidos nos ensaios realizados em temperatura ambiente, foram utilizados para adequar o carregamento dos ensaios na condição de incêndio que, por sua vez, foram realizados em um forno horizontal pequeno.

Foi desenvolvido um sistema especial de montagem para o ensaio, de forma a garantir que a ligação fosse solicitada do mesmo modo em ambas os tipos de ensaios, composto por um pórtico horizontal de aço, no interior do qual são colocadas e carregadas as ligações e ao qual são fixados os sensores e atuadores (Figura 2.14). Devido à impossibilidade de se colocar equipamentos dentro do forno durante os testes de fogo, a carga de cisalhamento foi aplicada a uma distância das conexões para evitar a exposição a altas temperaturas. A parte crítica assumida foi o lado da viga das conexões, então a maioria dos testes em temperatura normal focou apenas neste lado, substituindo o lado da coluna por elementos de aço.

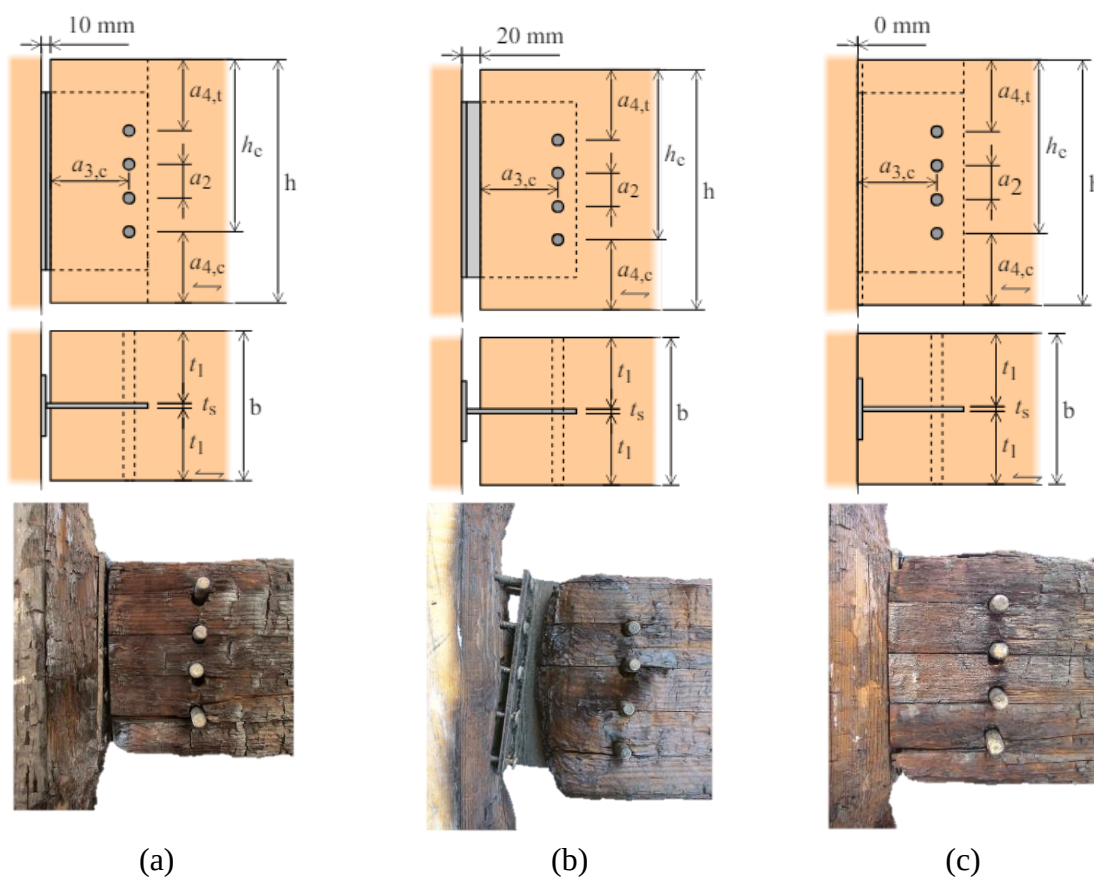
O objetivo de Palma (2016) ao analisar diferentes geometrias de ligação na condição de incêndio, variando quantidade, espaçamento e dimensão dos pinos, foi de realizar um estudo paramétrico, tendo como conclusão que o espaçamento dos pinos na direção perpendicular às fibras, o modo de falha em temperatura ambiente e o diâmetro dos pinos, não influenciam na resistência ao fogo, sugerindo que a espessura dos elementos de madeira e o grau de utilização são mais relevantes, conforme também foi observado no trabalho de Fleischer *et al.* (2002).

Figura 2.14 – Esquema da aplicação da carga no ensaio experimental de Palma (2016)



Fonte: Adaptado de Palma (2016)

Figura 2.15 – Geometrias de conexão avaliadas por Palma (2016): (a) A.1; (b) A.2; (c) A.3

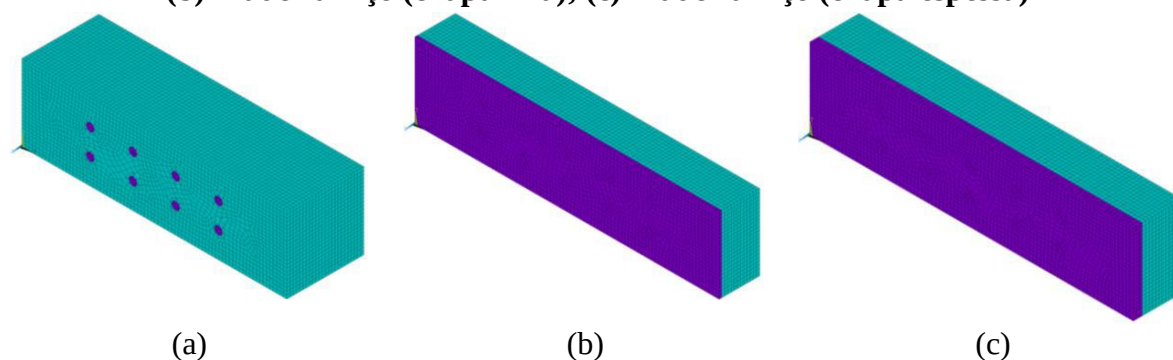


Fonte: Adaptado de Palma (2016)

Palma (2016) apresentou um modelo de análise numérica em que os resultados da simulação mostraram uma clara influência da espessura da viga na resistência ao fogo das ligações analisadas, sendo esse parâmetro mais relevante que o aumento da altura das vigas.

Machado (2023) desenvolveu análises termomecânicas para diferentes tipos de ligações em madeira-madeira e aço-madeira com pinos em aço, submetidas à tração em corte simples e expostas à ação do fogo. Foram consideradas três tipos de espécies de madeira com densidades distintas – 370 kg/m^3 , 420 kg/m^3 e 480 kg/m^3 – e três tipos de ligações aço-madeira com pinos metálicos, sendo ligações inteiramente em madeira, ligações com madeira e uma chapa de aço fina e ligações com madeira e uma chapa de aço espessa, conforme indicado pela Figura 2.16.

Figura 2.16 – Tipos de ligações analisadas por Machado (2023): (a) Madeira-Madeira; (b) Madeira-Aço (chapa fina); (c) Madeira-Aço (chapa espessa)



Fonte: Machado (2023)

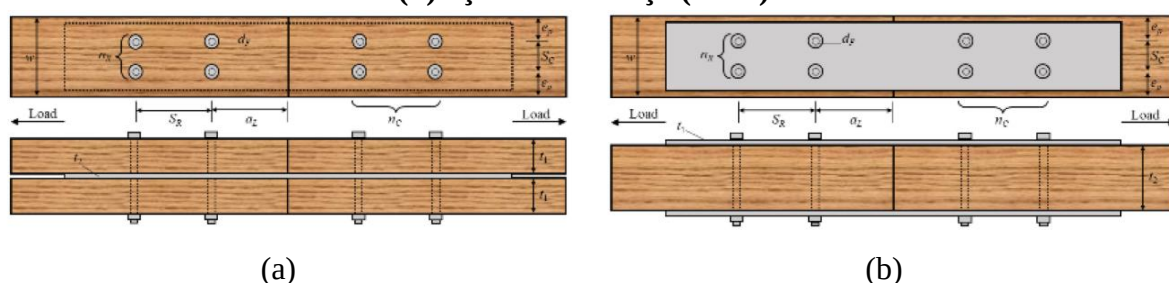
Os resultados permitiram analisar a influência da densidade da madeira, quer na resistência térmica da ligação, como também na resistência mecânica da ligação, revelando que a peça de madeira com maior densidade apresentou melhor resistência térmica e mecânica. Comparativamente, a ligação madeira-madeira demonstrou melhor resistência térmica e mecânica em relação à ligação com chapa fina de aço. A ligação madeira-madeira suportou melhor as temperaturas elevadas sem degradação significativa e exibiu maior capacidade de suportar cargas estruturais, enquanto a ligação com chapa fina de aço foi mais suscetível a danos e falhas em condições de temperatura elevada e carga estrutural.

Alam (2023) investigou o comportamento de ligações parafusadas aço-madeira sob tração em situação de incêndio, por meio de ensaios experimentais, simulações numéricas e desenvolvimento de métodos de cálculo simplificados. Foram analisadas conexões do tipo madeira-aço-madeira (WSW) e aço-madeira-aço (SWS), com variação no diâmetro dos

parafusos, espaçamentos e propriedades da madeira, conforme requisitos da norma canadense CSA O86:2016.

Foram realizados quatro experimentos do tipo madeira-aço-madeira e três do tipo aço-madeira-aço. As conexões madeira-aço-madeira foram feitas com uma placa de aço embutida em um elemento de madeira ou sanduíche entre dois elementos de madeira, ilustrado na Figura 2.17 (a). Enquanto, as conexões aço-madeira-aço consistiam em um elemento de madeira sanduíche entre duas placas de aço, conforme a Figura 2.17 (b). As amostras apresentavam variação no diâmetro dos parafusos, espaçamentos e resistências à tração.

Figura 2.17 – Tipologias estudadas por Alam (2023): (a) madeira-aço-madeira (WSW); (b) aço-madeira-aço (SWS)



Fonte: Alam (2023)

A Figura 2.18 ilustra uma das conexões testadas antes e depois de ser submetida à ação do fogo. Os testes mostraram que a resistência ao fogo para este modelo foi inferior a 45 minutos, conforme exigido pela norma canadense, CSA O86:2016. Elementos madeira-aço-madeira tiveram uma resistência ao fogo superior em comparação com os elementos aço-madeira-aço devido a proteção que a madeira fornece à chapa de aço. Modos comuns de falha incluíram flexão e cisalhamento de parafusos para madeira-aço-madeira, e flexão de parafusos e placas de aço para aço-madeira-aço.

Os testes mostraram que a resistência ao fogo para este modelo foi inferior a 45 minutos, conforme exigido pela norma canadense, CSA O86:2016. Espécimes WSW tiveram uma resistência ao fogo superior em comparação com os espécimes SWS devido a proteção que a madeira fornece à chapa de aço. Modos comuns de falha incluíram flexão e cisalhamento de parafusos para WSW, e flexão de parafusos e placas de aço para SWS.

Figura 2.18 – Ensaio experimental de Alam (2023)



Fonte: Alam (2023)

Além dos testes experimentais, Alam (2023) desenvolveu um modelo termomecânico tridimensional de elementos finitos das conexões WSW e SWS usando parafusos como conectores. O modelo de elementos finitos previu a resistência ao fogo das conexões dentro de uma faixa razoável. Um método de cálculo empírico proposto pôde ser usado como ferramenta de projeto para avaliar o desempenho ao fogo das conexões, com resultados dentro de uma faixa aceitável.

Com base nos registros de ensaios experimentais de ligações em estruturas de madeira em situação de incêndio, tornam-se perceptíveis alguns fatores relevantes para a segurança estrutural destas ligações, especialmente no que diz respeito às dimensões da seção transversal das peças de madeira, que se mostra mais segura de acordo com o aumento da largura destas peças, fazendo com que a região da conexão suporte os carregamentos durante um tempo de exposição ao incêndio considerável.

2.4 PRESCRIÇÕES NORMATIVAS

Neste item, apresentam-se os conceitos das normas brasileira (ABNT NBR 7190-1:2022) e europeia (EN 1995-1-2:2004 ou Eurocode 5) com relação às estruturas de madeira, sendo o foco na questão do comportamento do material sob ação de temperaturas elevadas, bem como a situação das ligações metálicas nessa estrutura. A norma brasileira descreve um método

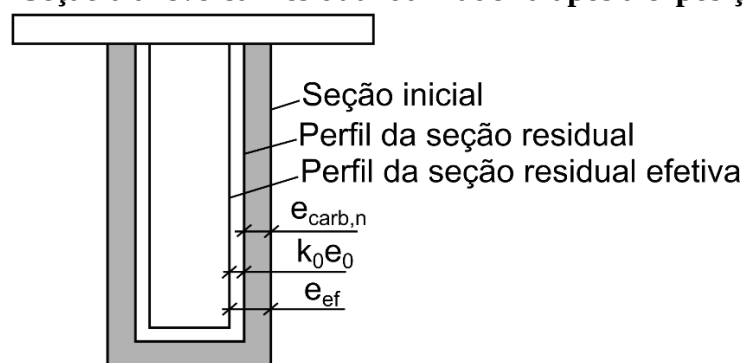
simplificado de dimensionamento das estruturas de madeira em situação de incêndio, enquanto que a norma europeia aborda, além do método simplificado, um método avançado de cálculo, onde são expostas as propriedades térmicas da madeira. Ainda, é apresentada a norma brasileira (ABNT NBR 14323:2013), baseada na norma europeia (EN 1993-1-2:2005 ou Eurocode 3), que descreve as propriedades do aço em situação de incêndio.

2.4.1 ABNT NBR 7190-1:2022 – Projeto de estruturas de madeira – Parte 1: Critérios de dimensionamento

A ABNT NBR 7190-1:2022 - Projeto de estruturas de madeira - Parte 1: Critérios de dimensionamento, é a norma técnica brasileira que estabelece os requisitos básicos para o projeto de estruturas de madeira. Aborda aspectos relacionados à seleção dos materiais, dimensionamento dos elementos estruturais, critérios de segurança, entre outros, de modo a garantir que, na elaboração de projetos que envolvam o uso de madeira em construções civis, as estruturas atendam aos padrões de qualidade e segurança estabelecidos.

Dentre os aspectos descritos por essa norma, inclui-se o item de estruturas de madeira em situação de incêndio. O dimensionamento estrutural em caso de incêndio é o processo de avaliar a capacidade de suporte dos componentes estruturais e suas conexões, independentemente de possuírem ou não revestimento resistente ao fogo.

A ABNT NBR 7190-1:2022 expõe uma abordagem de dimensionamento por meio de um método simplificado, ou método da seção reduzida, para a verificação da capacidade resistente das estruturas de madeira em situação de incêndio, considerando a redução da seção transversal devido ao processo de carbonização da madeira, baseada no método simplificado proposto pela norma europeia. A resistência ao fogo de estruturas de madeira é avaliada com base no conceito da redução da seção transversal da peça devido a formação de carvão com a elevação da temperatura e o processo de pirólise. A Figura 2.19 ilustra as camadas consideradas no processo de determinação da seção transversal residual aplicando o método simplificado, levando em conta a exposição ao fogo em três faces (face inferior e faces laterais).

Figura 2.19 – Seção transversal residual da madeira após a exposição ao fogo

Fonte: ABNT NBR 7190-1 (2022)

A seção transversal residual (efetiva) é determinada descartando-se a espessura efetiva (e_{ef}) que, por sua vez, é calculada pela Equação (2.2).

$$e_{ef} = e_{carb,n} + k_0 \cdot e_0 \quad (2.2)$$

em que:

$e_{carb,n}$ é a espessura carbonizada da madeira, que pode ser definida como $e_{carb,n}$ (espessura carbonizada nominal) ou $e_{carb,0}$ (espessura carbonizada unidirecional);

$k_0 e_0$ é a espessura que não foi completamente carbonizada, mas que está aquecida; considerada como uma camada adicional no cálculo da espessura efetiva, sendo:

e_0 constante e igual a 7 mm;

k_0 o coeficiente para superfícies sem proteção, dado pela Tabela 2.2.

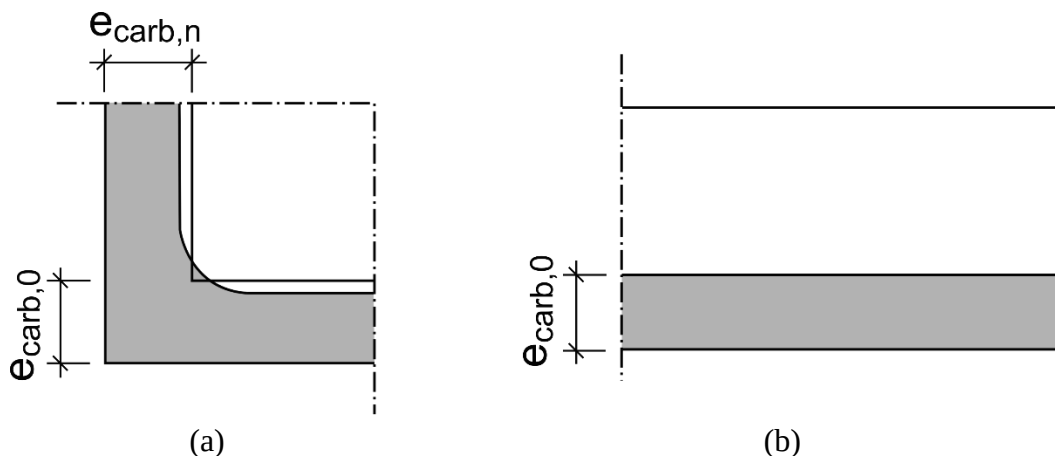
Tabela 2.2 – Determinação de k_0 para superfícies sem proteção (t em minutos)

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

Fonte: ABNT NBR 7190-1 (2022)

Quando a madeira possui arestas ou cantos agudos ou exposição em mais de uma face, essas áreas tendem a se carbonizar mais rapidamente do que as superfícies planas, devido à maior exposição ao calor, resultando em um arredondamento, esse efeito é ilustrado pela Figura 2.20. Por outro lado, superfícies arredondadas ou suavizadas tendem a carbonizar de maneira mais uniforme e mais lenta, pois distribuem melhor o calor ao longo da estrutura (Pinto, 2005).

Figura 2.20 – Tipos de carbonização: (a) Espessura de carbonização básica ($e_{carb,0}$) e nominal ($e_{carb,n}$); (b) Carbonização unidimensional



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190-1 (2022)

O valor de $e_{carb,n}$, que inclui o efeito de arredondamento dos cantos e das fissuras, é considerado constante e calculado pela Equação (2.3). Enquanto que, para elementos planos com exposição em uma direção, $e_{carb,n}$ é substituído por $e_{carb,0}$ e calculado pela Equação (2.4):

$$e_{carb,n} = \beta_n \cdot t \quad (2.3)$$

$$e_{carb,0} = \beta_0 \cdot t \quad (2.4)$$

Em que β_0 e β_n são as taxas de carbonização unidimensional e nominal, respectivamente, definidas conforme a Tabela 2.3.

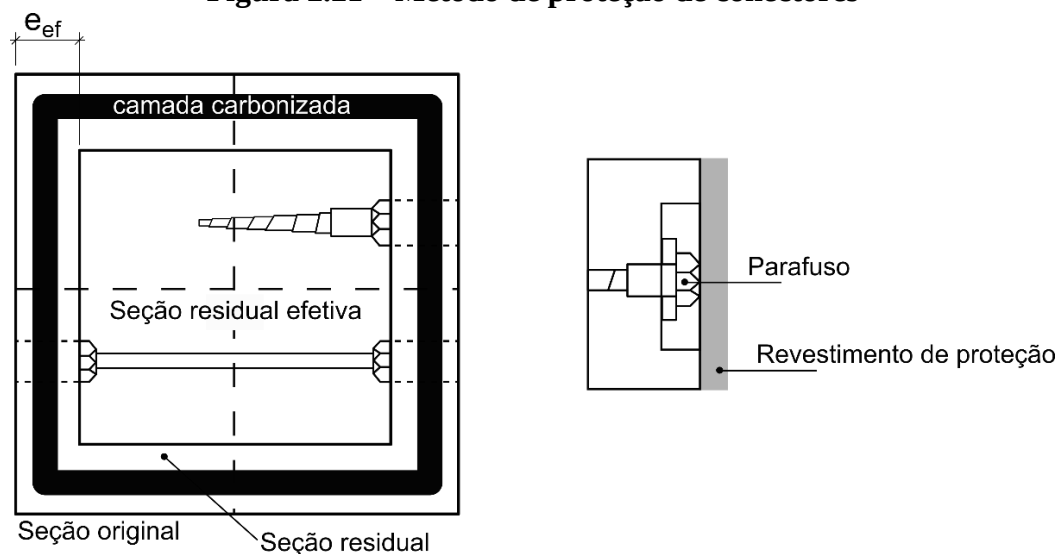
No que se refere aos elementos metálicos de ligação em estruturas de madeira em situação de incêndio, a ABNT NBR 7190-1:2022 preconiza que, quando estes estão expostos devem receber revestimento contra fogo adequados ao TRRF. Quando a proteção é alcançada por meio do embutimento dos conectores metálicos no interior do elemento estrutural, eles devem estar locados a uma profundidade calculada correspondente a seção residual efetiva (e_{ef}), as aberturas para colocação dos conectores ou parafusos devem ser vedadas com madeira colada, como ilustrado pela Figura 2.21.

Tabela 2.3 – Taxas de carbonização para superfícies sem revestimento β_0 e β_n

Material	Tipo	β_0	β_n
Coníferas	MLC, MLCC ou madeira serrada	0,65	0,70
Folhosas	Baixa densidade	0,65	0,70
	Média e alta densidades	0,50	0,55
LVL	$\rho_{\text{aparente}} \geq 480 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,70
Painéis	Painéis de madeira	0,9	-
	Compensado e outros	1,0	
		0,9	

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190-1 (2022)

A abordagem da norma brasileira sobre o comportamento das ligações em estruturas de madeira em situação de incêndio ainda é muito breve, fazendo-se necessário o desenvolvimento de estudos aprofundados sobre o assunto, principalmente no que se refere ao dimensionamento destas ligações.

Figura 2.21 – Método de proteção de conectores

Fonte: ABNT NBR 7190-1 (2022)

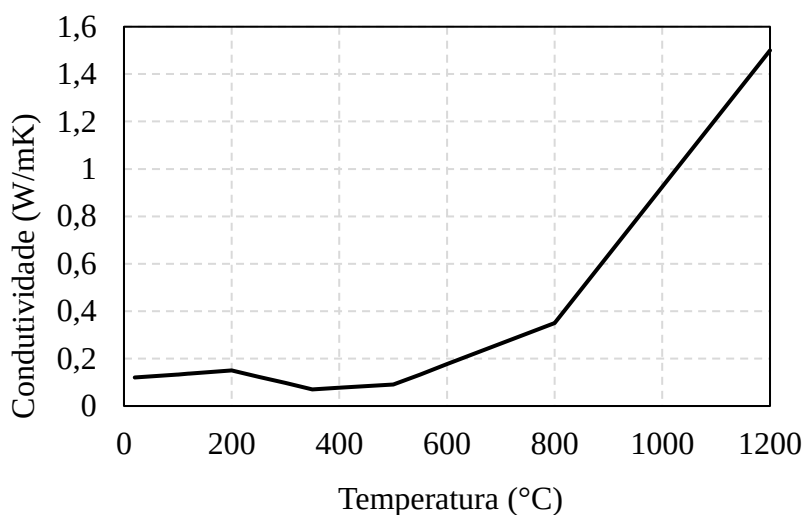
2.4.2 EN 1995-1-2:2004 – *Design of timber structures – Part 1-2: General – Structural fire design*

A norma europeia Eurocode 5 (EN 1995-1-2:2005 - *Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General - Structural fire design*) apresenta, além do método simplificado,

um método avançado de cálculo para o dimensionamento de estruturas de madeira em situação de incêndio, cuja abordagem é mais detalhada, para determinar a resistência e a estabilidade das estruturas de madeira. Esse método leva em consideração uma variedade de fatores, como as propriedades do material, as condições de carregamento, os efeitos da umidade e outros aspectos relevantes para garantir a segurança e o desempenho adequados da estrutura, podendo envolver técnicas como análise de elementos finitos e considerações mais detalhadas sobre o comportamento estrutural da madeira sob diferentes tipos de carga e condições ambientais.

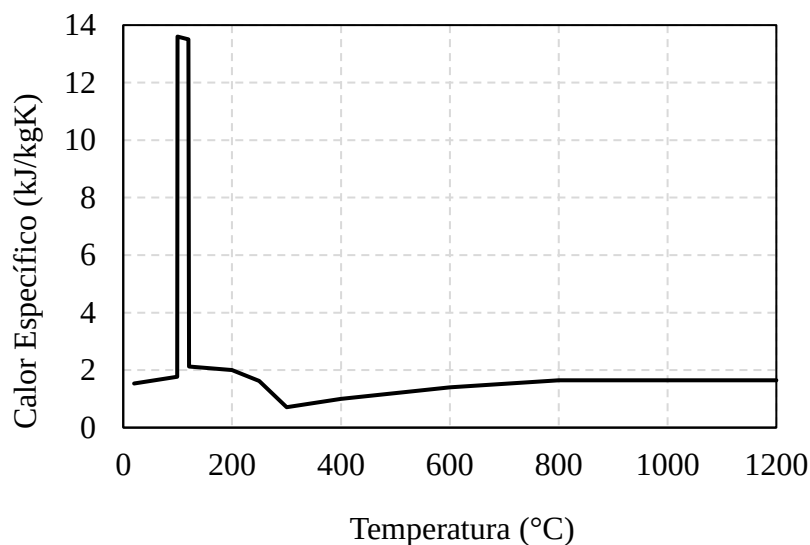
A norma EN 1995-1-2:2005 demonstra os valores de condutividade térmica, calor específico e da relação entre a densidade e a densidade seca da madeira, sob exposição ao fogo para as madeiras de espécies coníferas. A evolução da temperatura e a influência nas propriedades da madeira são apresentadas nas Figura 2.22, Figura 2.23 e Figura 2.24.

Figura 2.22 – Relação entre a temperatura e a condutividade térmica da madeira



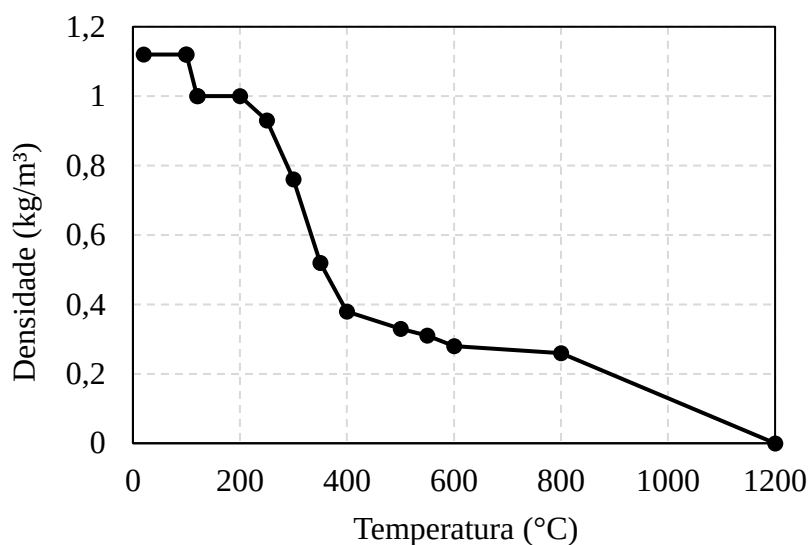
Fonte: EN 1995-1-2 (2004)

Figura 2.23 – Relação entre a temperatura e o calor específico da madeira e do carvão



Fonte: EN 1995-1-2 (2004)

Figura 2.24 – Razão da redução da densidade da madeira em função da temperatura



Fonte: EN 1995-1-2 (2004)

Acerca do comportamento das ligações em estruturas de madeira em situação de incêndio, a EN 1995-1-2:2004 fornece diretrizes para ligações feitas com pregos, parafusos, cavilhas, conectores de anel dividido, conectores de placa de cisalhamento e conectores de placa dentada. As diretrizes específicas variam de acordo com o tipo de ligação e se a conexão é protegida ou não.

2.4.2.1 Ligações com chapa de aço interna

Para ligações com membros laterais de madeira, há regras simplificadas tanto para ligações não protegidas quanto para protegidas. Para ligações não protegidas, a resistência ao fogo pode ser determinada com base nas dimensões dos membros laterais e dos fixadores. Para ligações protegidas, diferentes materiais de proteção, como painéis de madeira ou placas de gesso, afetam a resistência ao fogo da conexão. Posteriormente, estes fatores serão abordados e discutidos de maneira mais aprofundada.

No caso do tempo de resistência ao fogo exceder os tempos apresentados pela Tabela 2.4, mas sem ultrapassar 30 minutos, o espaçamento entre conectores pode ser aumentado em a_{fi} para ligações com pinos, pregos ou parafusos de cabeça não saliente, de modo a alcançar o tempo de resistência necessário. A medida a_{fi} é calculada de acordo com a Equação (2.5).

Tabela 2.4 – Resistências ao fogo de conexões desprotegidas com membros laterais de madeira

Conectores	Tempo de resistência ao fogo $t_{d,fi}$ (min)	Dimensões mínimas ^a
Pregos	15	$d \geq 2,8$ mm
Parafusos passantes	15	$d \geq 3,5$ mm
Parafusos com rosca soberba	15	$t_1 \geq 45$ mm
Pinos	20	$t_1 \geq 45$ mm
Conectores de acordo com a EN 912	15	$t_1 \geq 45$ mm

^a d é o diâmetro do conector e t_1 é a largura do membro lateral

Fonte: Adaptada de EN 1995-1-2 (2004)

$$a_{fi} = \beta_n * k_{flux}(t_{req} - t_{d,fi}) \quad (2.5)$$

Em que:

β_n é a taxa de carbonização de acordo com a Tabela 2.3;

k_{flux} é o coeficiente que considera o aumento do fluxo de calor ao longo do conector, admitido como 1,5;

t_{req} é o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF);

$t_{d,fi}$ é o tempo de resistência ao fogo para conexões desprotegidas de acordo com a Tabela 2.4.

Para ligações protegidas os diferentes materiais de proteção, como painéis de madeira ou placas de gesso, afetam a resistência ao fogo da conexão. O tempo até o início da carbonização do elemento estrutural de madeira deve satisfazer a Equação (2.6) para ligações protegidas pela adição de painéis de madeira, painéis à base de madeira ou por placas de gesso tipos padrão (ST) ou resistente a umidade (U), e a Equação (2.7) se a proteção for realizada por uma placa de gesso resistente ao fogo (RF).

$$t_{ch} \geq t_{req} - 0,5 \cdot t_{d,fi} \quad (2.6)$$

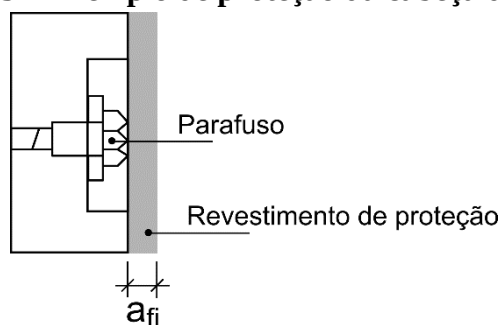
$$t_{ch} \geq t_{req} - 1,2 \cdot t_{d,fi} \quad (2.7)$$

Em que

t_{ch} é o tempo até o início da carbonização.

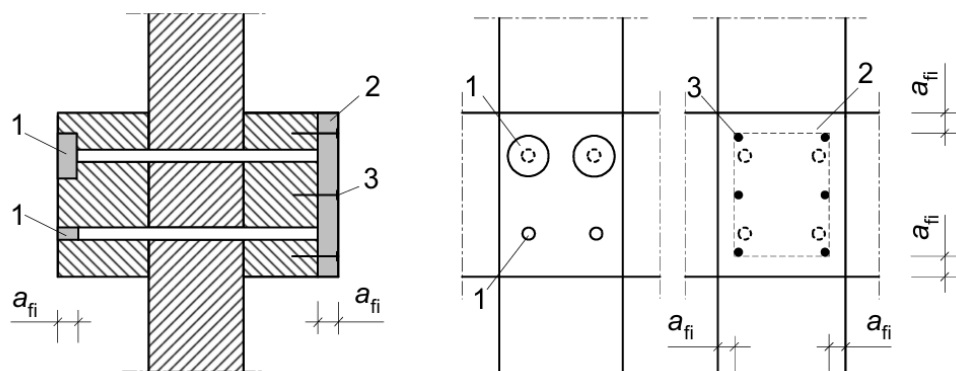
Para conexões parafusadas, a cabeça do parafuso deve ser resguardada por uma proteção de espessura a_{fi} , ilustrada pela Figura 2.25.

Figura 2.25 – Exemplo de proteção da cabeça do parafuso



Fonte: Adaptada de EN 1995-1-2 (2004)

Com relação aos fixadores que unem a proteção adicional ao elemento principal, se forem pregos ou parafusos passantes, a distância entre estes não pode ser superior a 100 mm ao longo das bordas da placa e não superior a 300 mm entre as fixações internas. A distância entre os fixadores e a borda deve ser maior ou igual a a_{fi} (calculado de acordo com a Equação (2.5)), ilustrado pela Figura 2.26.

Figura 2.26 – Exemplos de proteção adicional

- 1 – Plugues colados
- 2 – Proteção adicional usando painéis
- 3 – Fixadores de painéis que oferecem proteção adicional

Fonte: Adaptada de EN 1995-1-2 (2004)

A profundidade de penetração desses conectores deve ser de, no mínimo, $6d$ (sendo d o diâmetro do conector), para proteção adicional feita de madeira, painéis a base de madeira ou de gesso tipo ST ou U, e de pelo menos 10 mm na madeira não queimada para placas de gesso RF.

Para ligações com chapas de aço internas e espessura maior ou igual a 2 mm e que não se projetam para além da superfície de madeira, a largura das chapas de aço deve atender às condições da Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Larguras das chapas de aço com bordas desprotegidas

		b_{st}
Bordas desprotegidas em geral	R 30	200 mm
	R 60	280 mm
Bordas desprotegidas em um ou mais lados	R 30	120 mm
	R 60	280 mm

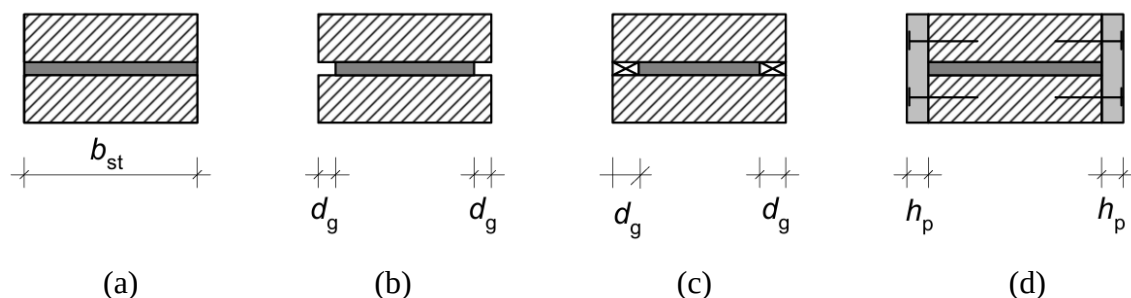
Fonte: Adaptada de EN 1995-1-2 (2004)

A Figura 2.27 (a) ilustra uma situação em que a chapa de aço se encontra desprotegida. As chapas de aço mais estreitas do que o elemento de madeira podem ser consideradas protegidas nos seguintes casos:

- Para placas com espessura não superior a 3 mm em que a profundidade da fenda (d_g) é superior a 20 mm para $t_{d,fi}$ de 30 minutos e superior a 60 mm para $t_{d,fi}$ de 60 minutos (ver Figura 2.27 (b)).

- Para conexões com tiras coladas (Figura 2.27 (c)) ou painéis a base de madeira (Figura 2.27 (d)) onde a profundidade da tira (d_g) ou a espessura do painel (h_p) é superior a 10 mm para $t_{d,fi}$ de 30 minutos e superior a 30 mm para $t_{d,fi}$ de 60 minutos.

Figura 2.27 – Proteção das bordas das chapas de aço: (a) Desprotegidas; (b) Protegidas por fendas; (c) Protegidas por tiras coladas; (d) Protegidas por painéis



Fonte: EN 1995-1-2 (2004)

Outro método de cálculo que o Eurocode 5 apresenta é o método da carga reduzida, que consiste em utilizar um fator de redução para o cálculo da capacidade de carga da ligação em situação de incêndio. Em conexões desprotegidas, as regras para pinos e parafusos são válidas quando a espessura da placa lateral é maior ou igual a t_1 , em milímetros, conforme a Equação (2.8).

$$t_1 = \max \left\{ \begin{array}{l} 50 \\ 50 + 1,25(d - 12) \end{array} \right. \quad (2.8)$$

Em que d é o diâmetro do conector, em mm.

A capacidade de carga característica de uma ligação com conectores submetidos ao cisalhamento, deve ser calculada de acordo com a Equação (2.9).

$$F_{v,Rk,fi} = \eta \cdot F_{v,Rk} \quad (2.9)$$

Sendo η dado pela Equação (2.10):

$$\eta = e^{-k \cdot t_{d,fi}} \quad (2.10)$$

Em que

$F_{v,Rk}$ é a capacidade de carga lateral característica da conexão com fixadores em cisalhamento em temperatura ambiente (conforme a seção 8 da EN 1995-1-1:2004);

η é um fator de conversão;

$t_{d,fi}$ é o tempo de resistência ao fogo para conexões desprotegidas, em minutos.

Para a ligação desprotegida carregada considerando o efeito de projeto das ações em situação de incêndio, o tempo de resistência ao fogo é obtido pela Equação (2.11).

$$t_{d,fi} = -\frac{1}{k} \ln \frac{\eta_{fi} \cdot \gamma_{M,fi}}{\gamma_M \cdot k_{fi}} \quad (2.11)$$

Em que:

k é um parâmetro definido pela Tabela 2.6;

η_{fi} é o fator de redução para carga de projeto em situação de incêndio;

$\gamma_{M,fi}$ é o coeficiente de segurança da conexão em situação de incêndio;

γ_M é o coeficiente de segurança da conexão em temperatura ambiente;

k_{fi} é o parâmetro definido pela Tabela 2.7.

Tabela 2.6 – Parâmetro k

Conexão com	k	Período máximo de validade do parâmetro k em uma ligação não protegida (min)
Pregos e parafusos	0,08	20
Parafusos madeira-madeira com $d \geq 12$ mm	0,065	30
Parafuso aço-madeira com $d \geq 12$ mm	0,085	30
Pinos madeira-madeira ^a com $d \geq 12$ mm	0,04	40
Pinos aço-madeira ^a com $d \geq 12$ mm	0,085	30
Conectores de acordo com EN 912	0,065	30

^a Os valores para pinos dependem da presença de um parafuso para cada quatro pinos.

Fonte: Adaptada de EN 1995-1-2 (2004)

Tabela 2.7 – Valores de k_{fi}

Tipo	k_{fi}
Madeira serrada	1,25
Madeira Lamelada Colada	1,15
Painéis a base de madeira	1,15
LVL	1,1
Ligações com conectores em cisalhamento com elementos laterais de madeira e painéis à base de madeira	1,15
Ligações com conectores em cisalhamento com elementos laterais de aço	1,05
Ligações com conectores carregados axialmente	1,05

Fonte: Adaptada de EN 1995-1-2 (2004)

Para pinos que possuam projeção superior a 5 mm deve-se considerar valores de k como se fosse para parafusos. Para ligações compostas por parafusos e pinos, a capacidade de carga deve ser tomada como a soma das capacidades de carga dos respectivos conectores.

Em ligações com pregos ou parafusos com cabeças não salientes, para resistências ao fogo maiores do que as indicadas pela Equação (2.12), mas não mais de 30 minutos, a espessura do elemento lateral e as distâncias das extremidades e bordas devem ser aumentadas em a_{fi} , calculada pela Equação (2.12).

$$a_{fi} = \beta_n(t_{req} - t_{d,fi}) \quad (2.12)$$

Para as ligações consideradas desprotegidas, se aplicam as mesmas regras simplificadas para conexões protegidas, com a exceção de que $t_{d,fi}$ deve ser calculado de acordo com Equação (2.11). Como método alternativo de proteção das superfícies laterais e das extremidades dos elementos, as distâncias das extremidades e das bordas podem ser aumentadas em a_{fi} , conforme a Equação (2.5). Entretanto, para resistências ao fogo superiores a 30 minutos, as distâncias devem ser aumentadas na ordem de duas vezes a_{fi} .

2.4.2.2 Ligação com chapas de aço externas

Em ligações desprotegidas, a capacidade de carga das placas de aço externas deve ser determinada de acordo com as regras fornecidas na EN 1993-1-2:2005 – *Design of steel structures – part 1-2: General Rules – Structural fire design*.

Para o cálculo do fator de seção das chapas de aço, pode presumir-se que as superfícies de aço em contato direto com a madeira não são expostas ao fogo, de acordo com a EN 1993-1-2:2005.

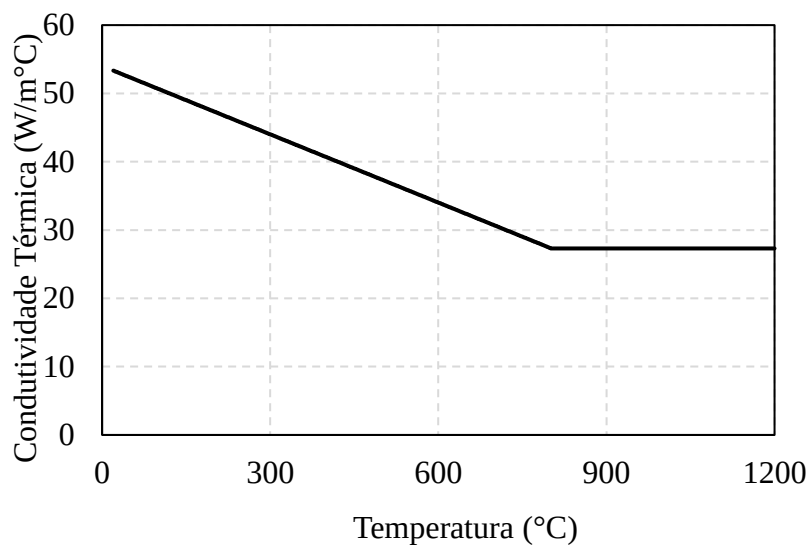
Em ligações protegidas, as chapas de aço utilizadas como elementos laterais podem ser consideradas protegidas se estiverem totalmente cobertas, incluindo as bordas da chapa, por madeira ou painéis à base de madeira, com uma espessura mínima de a_{fi} , calculada pela Equação (2.5), considerando $t_{d,fi}$ igual a 5 minutos.

O efeito de outras proteções é calculado de acordo com as prescrições da norma sobre estruturas de aço em situação de incêndio, EN 1993-1-2:2005.

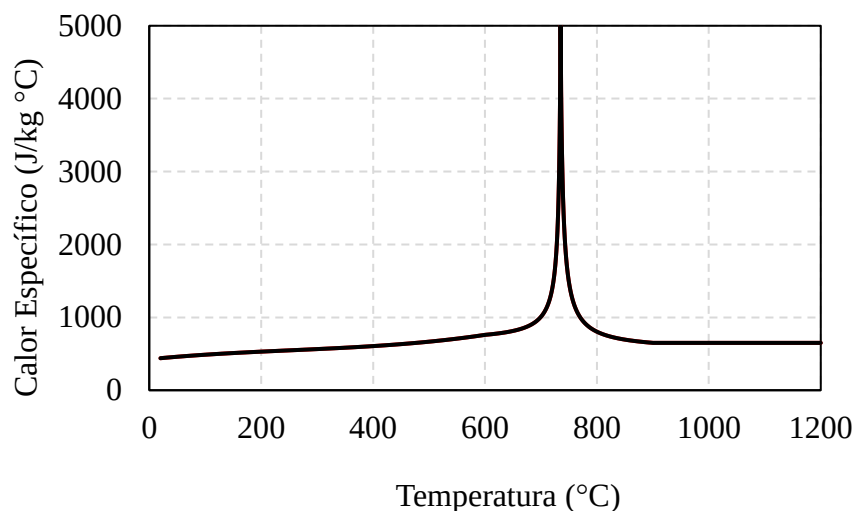
2.4.3 ABNT NBR 14323:2013 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio

A norma brasileira ABNT NBR 14323:2013 intitulada Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio, estabelece critérios de dimensionamento de estruturas de aço com foco em situação de incêndio, apresentando valores de propriedades de elementos de aço com base no que é prescrito pela norma europeia Eurocode 3 (EN 1993-1-2:2005 - *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design*).

Considerando o que será aplicado no presente trabalho, é especificado tanto na norma brasileira ABNT NBR 8800:2025 quanto na norma europeia EN 1993-1-2:2005, um valor constante para densidade do aço de 7850 kg/m^3 , podendo ser considerado independente da variação da temperatura. Entretanto, para as propriedades de condutividade térmica e de calor específico, existe variação nos valores de acordo com o aumento da temperatura, ambas as normas apontam a variação, e essa relação é apresentada pela Figura 2.28 para a condutividade térmica, e pela Figura 2.29 para o calor específico.

Figura 2.28 – Condutividade térmica do aço em função da temperatura

Fonte: ABNT NBR 14323 (2013)

Figura 2.29 – Calor específico do aço em função da temperatura

Fonte: ABNT NBR 14323 (2013)

2.5 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

As propriedades mecânicas da madeira e do aço sofrem alterações quando estes materiais são expostos em temperaturas elevadas. Em geral, o que ocorre é uma perda/redução da capacidade resistente destes materiais.

2.5.1 Madeira

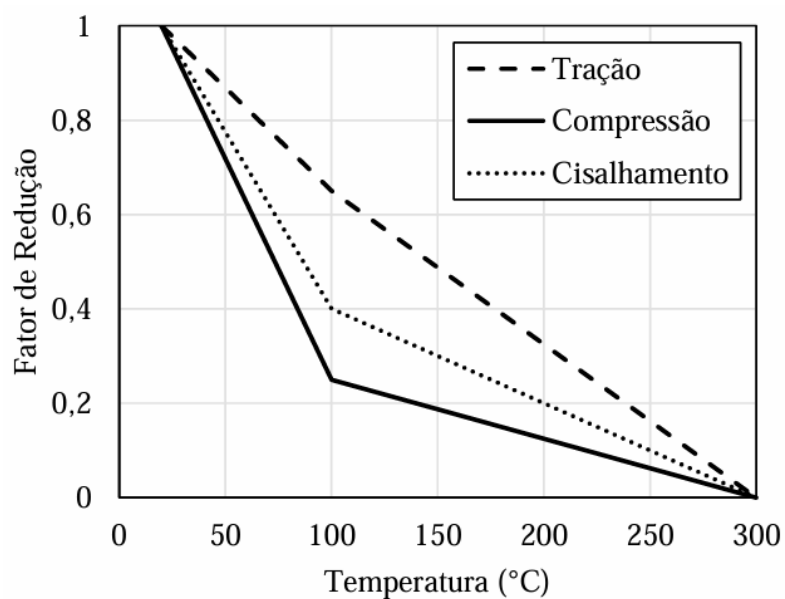
Estudos indicam que a densidade básica da madeira é um dos principais parâmetros que influenciam suas propriedades mecânicas. Pietrobon (2022) demonstrou que há uma correlação direta entre a densidade aparente e propriedades como módulo de elasticidade e resistência à compressão paralela às fibras. Além disso, Lahr (2021) e Scanavaca-Júnior e Garcia (2004) afirmam que a variabilidade da maior parte das propriedades mecânicas da madeira pode ser estimada com base na variação da densidade, devido à sua relação direta com as dimensões e composição química da célula.

A composição química da madeira, incluindo teores de celulose, hemicelulose, lignina e extrativos, também afeta seu comportamento mecânico. Segundo Lobão *et al.* (2004), as propriedades tecnológicas da madeira são influenciadas diretamente pela quantidade e tipo de lignina presente na célula.

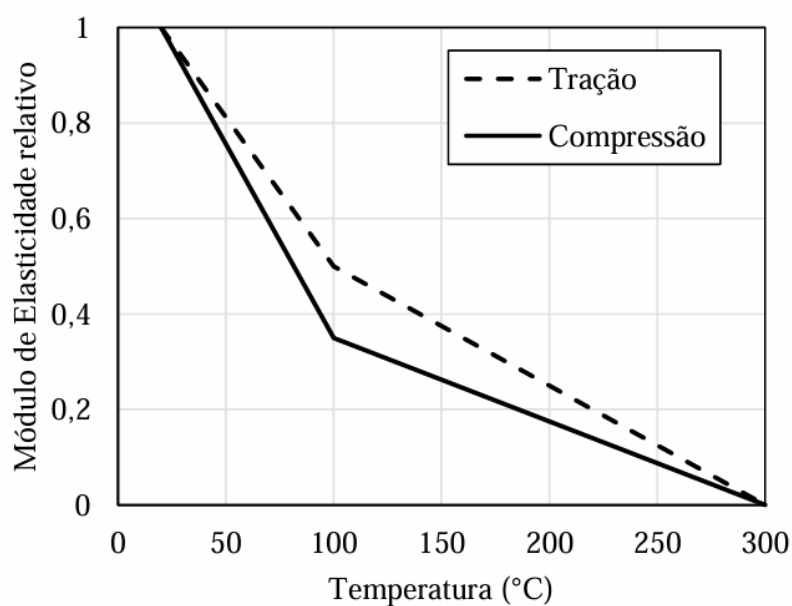
A idade da árvore é outro fator determinante. Pesquisas com a madeira de acácia-negra mostraram que árvores com sete anos de idade apresentam módulos de elasticidade superiores aos de árvores com quatro anos, indicando um aumento na rigidez e resistência com o avanço da idade (Moreschi, 2012).

Além disso, a temperatura influencia significativamente as propriedades mecânicas da madeira. Estudos demonstraram que, ao serem submetidas a temperaturas elevadas, espécies como *Pinus taeda*, *Eucalyptus saligna* e *Schizolobium amazonicum* apresentam redução nas resistências à compressão, flexão e cisalhamento. Esses efeitos térmicos são atribuídos à degradação dos componentes poliméricos da madeira, como a lignina e a hemicelulose (Morales, 2002).

De acordo com a norma EN 1995-1-2:2004, os valores de resistência e módulo de elasticidade devem ser multiplicados por um fator de redução dependente da evolução da temperatura, ilustrado pelas Figura 2.30 e Figura 2.31.

Figura 2.30 – Fator de redução da resistência da madeira

Fonte: Adaptado de EN 1995-1-2 (2004)

Figura 2.31 – Fator de redução do módulo de elasticidade da madeira

Fonte: Adaptado de EN 1995-1-2 (2004)

2.5.2 Aço

O comportamento mecânico do aço é caracterizado por um regime elástico-linear seguido por um regime plástico. No regime elástico, a deformação é proporcional à tensão

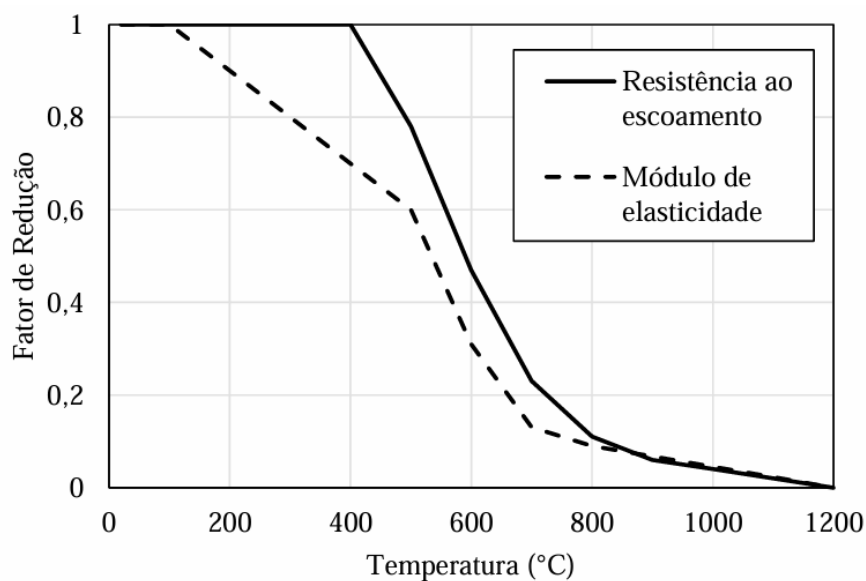
aplicada, sendo descrita pelo módulo de elasticidade, que para o aço é aproximadamente 210 GPa. Ao ultrapassar o limite de escoamento, o aço entra no regime plástico, onde ocorre deformação permanente sem aumento significativo de tensão. O limite de escoamento típico para aços estruturais é de cerca de 210 MPa, enquanto a resistência à tração pode atingir valores em torno de 380 MPa (Callister, 2002).

A ductilidade do aço, medida pelo alongamento percentual antes da ruptura, é uma propriedade crucial para aplicações estruturais, permitindo que as estruturas absorvam energia e deformem sem colapsar abruptamente. Além disso, o aço possui uma densidade de aproximadamente 7.850 kg/m³ e um coeficiente de Poisson de 0,3, indicando a relação entre as deformações laterais e longitudinais sob carga.

Entretanto, à medida que a temperatura do aço aumenta, ocorre uma redução progressiva de sua resistência mecânica. Estudos indicam que, a 600°C, o aço pode perder até 50% de sua resistência original (EN 1993-1-2, 2004). A temperatura crítica, definida como aquela na qual o elemento estrutural não pode mais suportar as cargas aplicadas, varia conforme o tipo de perfil e as condições de carregamento. Para perfis I de aço, essa temperatura crítica pode ser inferior aos 550°C usualmente considerados, dependendo das condições específicas de uso.

Além da redução da resistência, o aço em altas temperaturas apresenta deformações por fluência, que são deformações plásticas dependentes do tempo sob tensão constante. Em temperaturas acima de 30% a 40% do ponto de fusão do material, essas deformações podem ser significativas, afetando a estabilidade e a integridade estrutural (Kodur, Dwaikat e Fike, 2010).

A ABNT NBR 14323:2013 apresenta os fatores de redução para a resistência ao escoamento e módulo de elasticidade do aço em função da elevação da temperatura no material, de acordo com a Figura 2.32.

Figura 2.32 – Fatores de redução das propriedades mecânicas do aço

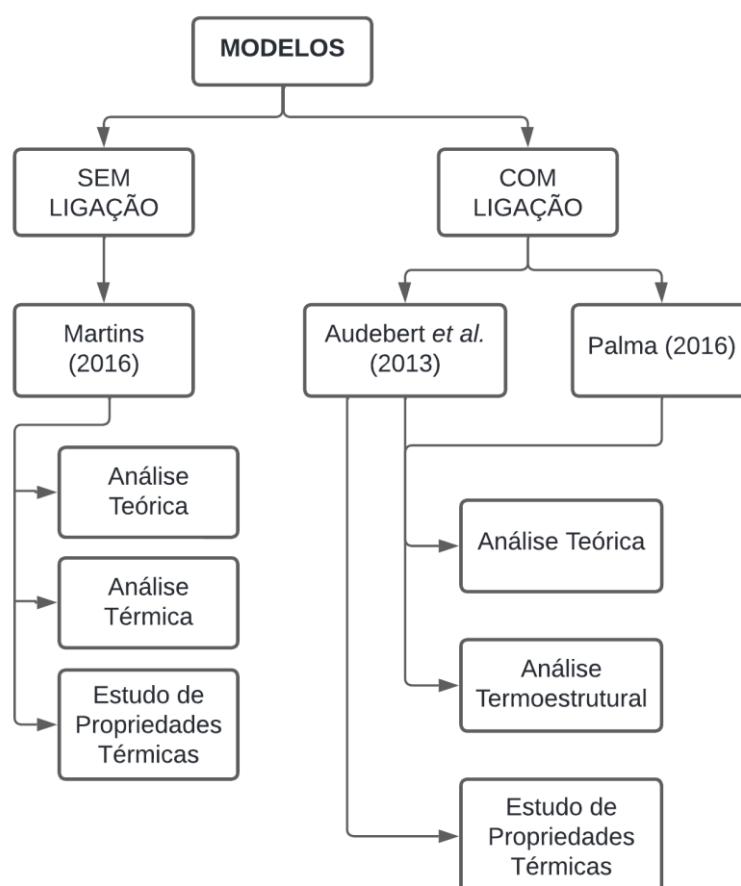
Fonte: Adaptado de ABNT NBR 14323 (2013)

Para mitigar os efeitos do calor, é comum aplicar proteções passivas ao aço, como argamassas projetadas e tintas intumescentes. Essas proteções aumentam o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), permitindo que a estrutura mantenha sua integridade por um período suficiente para a evacuação segura dos ocupantes e a atuação dos serviços de emergência.

3 METODOLOGIA

No presente trabalho, cuja finalidade é a de compreender o comportamento de ligações metálicas em estruturas de madeira em situação de incêndio, foram conduzidas análises teóricas com base em métodos de dimensionamento proposto por normativas nacionais e internacionais e análises numéricas no *software* Abaqus, versão 6.14, com base em estudos experimentais realizados por outros autores. Para organizar e ilustrar a estrutura metodológica adotada, foi elaborado um fluxograma (Figura 3.1), que apresenta os principais autores e os procedimentos de análise empregados em cada etapa da pesquisa.

Figura 3.1 – Fluxograma da organização da metodologia



Fonte: Autor (2025)

As análises desenvolvidas dividem-se em dois grupos. O grupo “sem ligação” refere-se a modelos experimentais realizados com elementos estruturais sem avaliação de ligações

metálicas. Nesses modelos foram realizadas análises teóricas e numéricas, além de um estudo acerca das propriedades térmicas da madeira utilizadas no modelo numérico. O grupo “com ligação” refere-se a modelos experimentais desenvolvidos para avaliação do comportamento de ligações metálicas em elementos estruturais de madeira, dividindo-se em ligações entre vigas, com o modelo de Audebert *et al.* (2013), e entre viga-pilar, com o modelo de Palma (2016).

A análise teórica baseou-se nos métodos de dimensionamento simplificado propostos nas normas ABNT NBR 7190-1 (2022) e EN 1995-1-2:2004, sendo este método utilizado para a verificação da capacidade resistente das estruturas de madeira em situação de incêndio em todos os modelos analisados.

As análises térmica e termoestructural abrangem o método de dimensionamento avançado proposto pela EN 1995-1-2:2004, e foram realizadas com auxílio do programa computacional de elementos finitos Abaqus, versão 6.14, cujos detalhes estão apresentados no item 3.1.

O estudo de propriedades térmicas relacionou diferentes abordagens acerca das propriedades de condutividade térmica e calor específico da madeira. As abordagens foram propostas pela norma EN 1995-1-2:2004, por Audebert *et al.* (2013) e por Fernandes (2022).

3.1 ANÁLISE NUMÉRICA

Os procedimentos adotados para realização das análises numéricas envolveram o uso do pacote computacional Abaqus, versão 6.14, programa de análise de estruturas baseado no método dos elementos finitos, devido à sua adequabilidade para a representação do comportamento ortotrópico da madeira, da possibilidade de representação da situação de incêndio e da licença para seu uso na universidade.

O Abaqus é um programa computacional habilitado para realizar simulações numéricas em diversas áreas do conhecimento, sejam voltadas para a engenharia de estruturas ou não. Foi desenvolvido pela empresa estadunidense HKS Inc Rhode Island e atualmente é comercializado pela SIMULIA, marca da *Dassault Systèmes*. O funcionamento do programa é baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF), sendo capaz de resolver desde problemas mais simples, de natureza linear, até os mais complexos, como os de caráter não-linear, através de três etapas: pré-processamento, processamento ou simulação e pós-processamento.

A primeira etapa é onde se realiza a modelagem numérica, define-se o problema físico, a geometria, as condições de contorno, especifica-se as propriedades dos materiais, cria-se a malha de elementos finitos, através de uma interface gráfica (Abaqus/CAE - *Complete Abaqus Environment*) e das ferramentas disponíveis no programa. A biblioteca do pacote computacional do Abaqus conta com uma diversa gama de ferramentas e modelos que auxiliam na representação do problema físico, podendo ser elaborados modelos bi ou tridimensionais, com diferentes formas variadas formas e a elas ser atribuídas propriedades de diferentes materiais, como concreto, aço e madeira. Na etapa de processamento, ocorre a resolução do problema numérico definido anteriormente no modelo, a duração da simulação é dependente da complexidade do problema analisado, bem como das variáveis que o compõem e da potência do computador usado. A etapa de pós-processamento envolve a visualização e a análise dos resultados apresentados pelo programa, por meio do módulo de visualização do Abaqus e então obtém-se os resultados, análise das tensões e deformações, deslocamentos nodais, animações e exportação de dados.

3.1.1 Análise numérica térmica

A avaliação do comportamento da madeira em temperaturas elevadas pode ser realizada por meio do método avançado de cálculo, que considera a variação das propriedades de condutividade térmica, calor específico e da densidade da madeira conforme a elevação da temperatura, e foi realizado por meio de modelos numéricos desenvolvidos no *software* Abaqus, versão 6.14.

A estratégia de modelagem utilizada consistiu na elaboração de modelos térmicos bidimensionais, para a representação da evolução da temperatura no interior das peças de madeira, e tridimensionais, para a representação da interação térmica entre madeira e aço no mecanismo de ligação. Para a simulação da elevação da temperatura, em todos os modelos, utilizou-se a curva de incêndio-padrão, prescrita pela norma ISO 834:2025, sendo a temperatura inicial da simulação estabelecida em 20°C, representando a temperatura ambiente.

Para a análise térmica tanto dos modelos bidimensionais, quanto dos modelos tridimensionais, foram consideradas as propriedades térmicas de calor específico, condutividade térmica e densidade para a madeira, acrescendo a expansão térmica para o aço. Nos modelos de Martins (2016) e de Audebert *et al.* (2013) foi realizado um estudo dessas

propriedades para a madeira, considerando as propostas apresentadas pela norma europeia EN 1995-1-2:2004, por Audebert *et al.* (2013) e por Fernandes (2022). No modelo de Palma (2016), as propriedades da madeira seguiram as recomendações da EN 1995-1-2:2004. Nos modelos com ligação metálica, Audebert *et al.* (2013) e Palma (2016), utilizou-se as propriedades térmicas do aço propostas pela EN 1993-1-2:2005.

Conforme apresentado na Tabela 3.1, adotou-se como coeficiente de emissividade por radiação o valor de 0,8 para a madeira, e de 0,7 para o aço, de acordo com os valores indicados em EN 1995-1-2:2004 e EN 1993-1-2:2005, respectivamente. Para o coeficiente de transferência de calor por convecção, adotou-se valor igual a 25 W/m² K, independente do material, como indicado em Palma (2016).

Tabela 3.1 – Coeficientes utilizados na análise numérica térmica

Material	Radiação	Convecção (W/m ² K)
Madeira	0,8	25
Aço	0,7	25

Fonte: Autor (2025)

Ainda, para os modelos tridimensionais, devido à complexidade e a simetria das ligações, como estratégia de modelagem as peças foram simplificadas geometricamente, de forma a reduzir o custo computacional durante a execução das análises, ou seja, ao invés de se modelar a ligação inteira, apenas parte dela foi considerada, admitindo-se como uma superfície adiabática as faces internas dos elementos. As peças componentes da ligação foram modeladas separadamente na interface gráfica do Abaqus e, posteriormente, montadas conforme a configuração da conexão utilizando o módulo de montagem (*assembly*) do programa. Definiu-se como perfeita (*tie*) a vinculação entre as peças.

Para a distribuição da temperatura nos modelos bidimensionais de Martins (2016), realizou-se análise de transferência de calor usando o elemento quadrático DC2D8. Para os modelos tridimensionais de Audebert *et al.* (2013) e de Palma (2016), a transferência de calor aconteceu utilizando-se uma malha formada por elementos quadráticos hexaédricos DC3D8.

Foram especificados pontos nodais na malha como dados de saída da análise, para o registro da temperatura no interior dos elementos de cada modelo, com a localização referente ao posicionamento dos termopares que realizam a leitura da temperatura no ensaio experimental de referência, de acordo com o que será ilustrado no item 3.2. A coleta dos dados de temperatura

nesses pontos permitiu a comparação do avanço da temperatura nos elementos entre a simulação numérica e o ensaio experimental, cujos resultados são apresentados e debatidos na seção 4.

3.1.2 Análise numérica termoestrutural

A análise termoestrutural foi realizada apenas para os modelos tridimensionais. A estratégia de modelagem utilizada foi uma análise termoestrutural não acoplada, em que o modelo térmico é independente do modelo mecânico, e o modelo mecânico não influencia no modelo térmico. Ou seja, primeiramente foi elaborado um modelo mecânico sem a consideração da elevação da temperatura, onde foram aplicados os carregamentos na estrutura. Posteriormente, foi realizado o acoplamento dos resultados obtidos na etapa da análise térmica.

Além das propriedades térmicas consideradas anteriormente, para a modelagem termoestrutural foram acrescidas as propriedades mecânicas da madeira e do aço. Os valores referentes a cada modelo tridimensional serão apresentados em 3.2.2 e 3.2.3.

Para a representação da plasticidade do aço, foi utilizado o modelo constitutivo clássico do Abaqus onde foram informadas a tensão de escoamento (f_y) e a deformação plástica (ϵ) do material. Para a representação do comportamento plástico da madeira, no modelo de Palma (2016) foi utilizado o *Concrete Damage Plasticity* (CDP), modelo constitutivo do concreto, porém com valores adaptados para a madeira, apresentados em 3.2.3. No modelo de Audebert *et al.* (2013), utilizou-se o Critério de Hill na representação do comportamento plástico da madeira, cujos valores são apresentados em 3.2.2.

Na malha dos modelos mecânicos utilizou-se elementos do tipo C3D8R, elemento sólido tridimensional com 8 nós e integração reduzida.

3.2 CALIBRAÇÃO DOS MODELOS TÉRMICOS

Nesta subseção serão apresentadas as características gerais dos modelos experimentais de Martins (2016), Audebert *et al.* (2013) e Palma (2016), utilizados para a calibração da análise térmica e da análise termoestrutural.

3.2.1 Martins (2016)

Com o intuito de validar o modelo térmico, realizaram-se análises numéricas térmicas de dois elementos estruturais que foram analisados no trabalho de Martins (2016) com ensaios experimentais em grande escala, e também com análises numéricas. Os elementos analisados foram executados em madeira lamelada colada (MLC), com duas espécies distintas, *Lyptus* (híbrido da espécie *EucaLyptus sp.*), e *Pinus sp.*, ilustradas na Figura 3.2 (a). As características físicas de cada uma das vigas são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Características dos corpos de prova

Identificação	Espécie	Altura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Densidade (kg/m ³)
L4	<i>Lyptus</i>	421	149	3500	683,2
P8	<i>Pinus</i>	420	150	3540	497,5

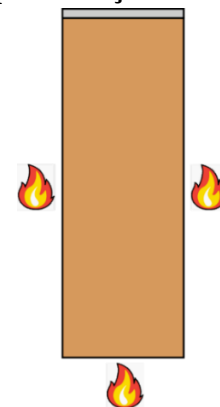
Fonte: Adaptado de Martins (2016)

Na análise numérica, foram consideradas as interações térmicas de radiação e convecção somente nas faces laterais e inferior das vigas e a face superior foi revestida com manta, de acordo com a Figura 3.2 (b), durante um tempo de exposição ao fogo de 40 minutos, assim como realizado experimentalmente por Martins (2016).

Figura 3.2 – Faces expostas ao fogo: (a) Layout dos ensaios; (b) representação ilustrativa



(a)



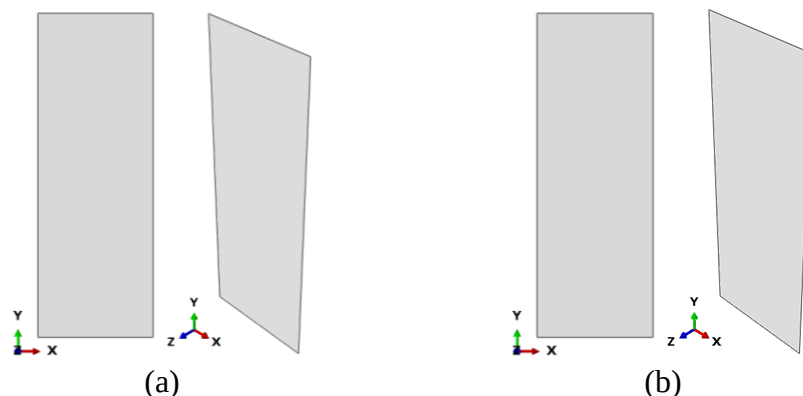
(b)

Fonte: Adaptado de Martins (2016)

A partir dos dados geométricos de cada viga, elaborou-se modelos térmicos bidimensionais, ilustrados pelas Figura 3.3 (a) e (b), utilizando ferramentas fornecidas pela

interface gráfica do *software* Abaqus. Ambos os modelos de *Lyptus* e *Pinus*, foram considerados com 420 mm de altura e 150 mm de largura para a análise numérica. Apesar de os corpos de prova serem feitos de MLC, para a confecção do modelo numérico não foi considerado o adesivo que faz a conexão entre as lamelas e a seção de madeira foi definida como maciça.

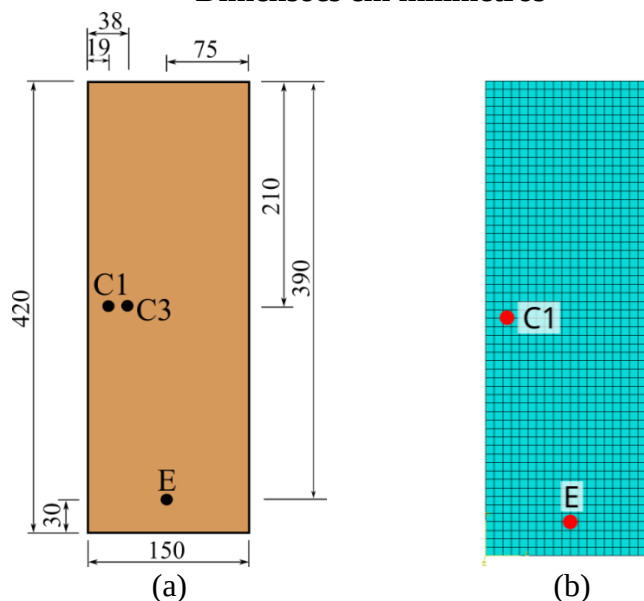
Figura 3.3 – Modelagem bidimensional dos elementos: (a) *Lyptus*; (b) *Pinus*



Fonte: Autor (2025)

A localização dos termopares na seção transversal da viga no ensaio experimental é ilustrada na Figura 3.4 (a). Na análise numérica, foram criados dados de saída na localização desses pontos, Figura 3.4 (b), com o intuito de realizar a leitura da temperatura na madeira e comparar com os valores obtidos experimentalmente. Para as vigas de madeira *Lyptus* e *Pinus* criou-se o ponto C1, distantes 19 mm da face exposta ao fogo (lateral esquerda), e o ponto E, distante 30 mm da face exposta (inferior).

Figura 3.4 – Distribuição dos termopares: (a) Layout; (b) Modelo L4; (c) Modelo P8.
Dimensões em milímetros

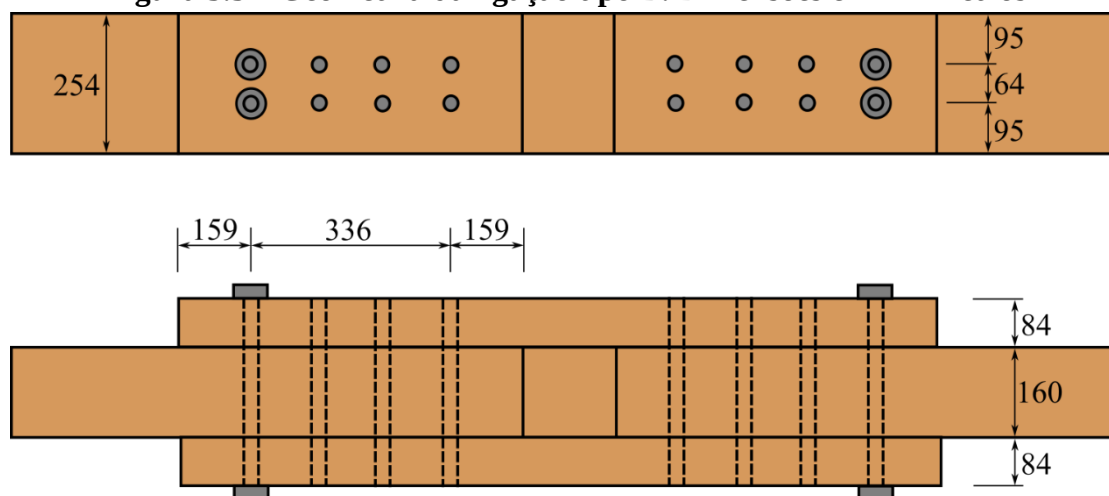


Fonte: (a) Adaptado de Martins (2016); (b) e (c) Autor (2025)

3.2.2 Audebert *et al.* (2013)

Em relação ao trabalho de Audebert *et al.* (2013), escolheu-se representar numericamente uma das tipologias madeira-madeira avaliadas pelos autores, nomeada como ligação tipo B e representada na Figura 3.5. Esse modelo é constituído por vigas de madeira conectadas com duas fileiras de dispositivos metálicos, sendo cada linha composta por três pinos e um parafuso. Os autores não informam a espécie da madeira utilizada, mas apresentam características que correspondem à espécie *Spruce (Picea abies)*, com densidade de 444 kg/m³. Os pinos e parafusos possuem diâmetro de 16 mm e as características do aço que os compõem são determinadas pela EN 1993-1-2:2005. Nas dimensões, apresentadas na Figura 3.5, que vão dos conectores até a borda dos elementos de madeira, foi considerada uma medida de camada adicional na madeira de 47 mm.

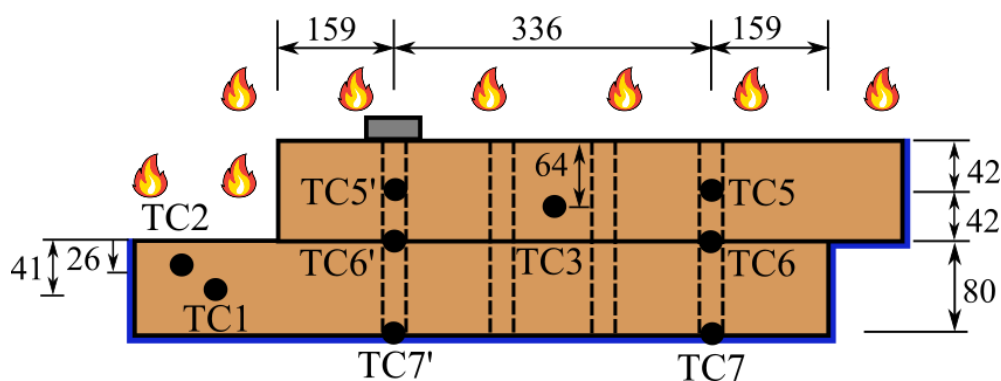
Figura 3.5 – Geometria da ligação tipo B. Dimensões em milímetros



Fonte: Adaptado de Audebert *et al.* (2013)

A ligação analisada por Audebert *et al.* (2013), por apresentar dois eixos de simetria, pôde ser representada numericamente por apenas um quarto do modelo. As superfícies correspondentes aos planos de simetria foram consideradas adiabáticas, conforme indicado pela linha azul na Figura 3.6. A posição dos termopares instalados nas peças é representada na Figura 3.6, cujas medidas são expressas em milímetros e as dimensões estão fora de escala. Os pontos TC1, TC2 e TC3 registram a temperatura na madeira, os pontos TC5, TC6 e TC7 foram posicionados para leitura das temperaturas nos pinos, e os pontos TC5', TC6' e TC7' referem-se às temperaturas medidas no parafuso.

Figura 3.6 – Faces expostas ao fogo e posição dos termopares

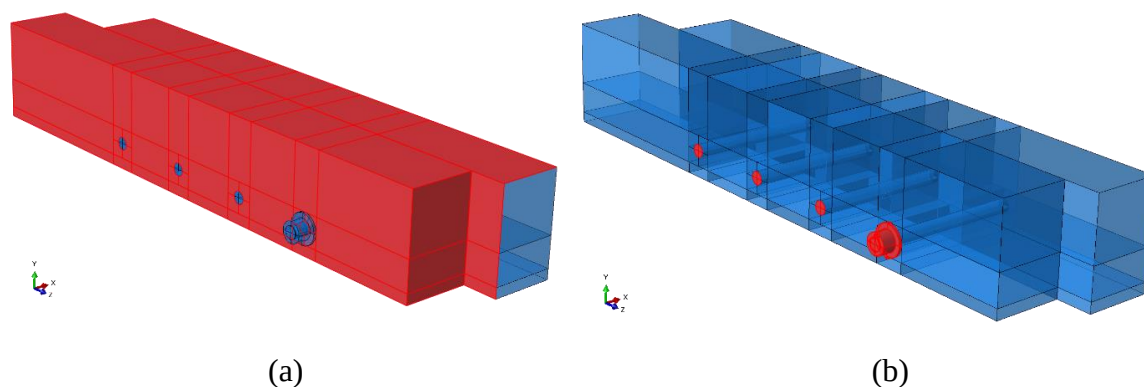


Fonte: Autor (2025)

A Figura 3.7 ilustra a exposição ao fogo no modelo tridimensional, sendo que na Figura 3.7 (a) estão representadas as faces dos elementos de madeira expostos aos mecanismos de

transferência de calor de radiação e convecção, e na Figura 3.7 (b), as faces dos elementos de aço.

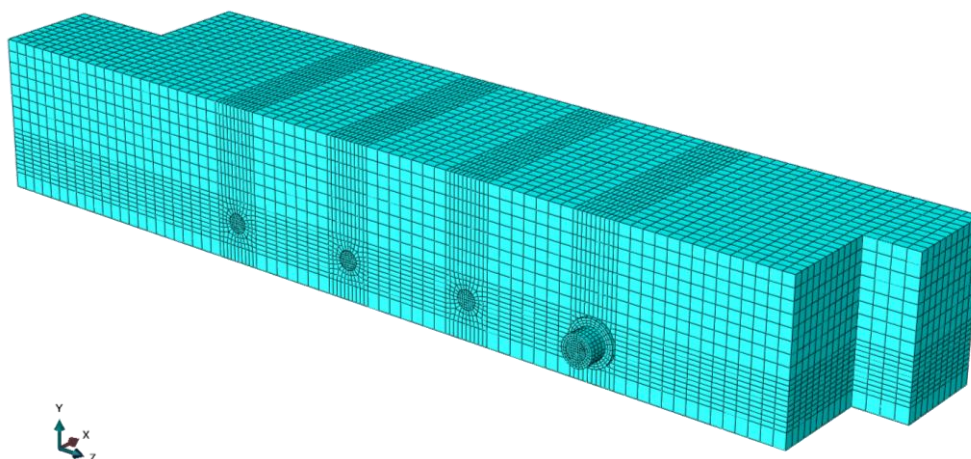
Figura 3.7 – Faces expostas à radiação e convecção: (a) na madeira; (b) nos pinos e parafuso



Fonte: Autor (2025)

Os elementos de madeira (vigas) e de aço (pinos e parafuso) que compõem a ligação, foram modelados separadamente e, posteriormente, cada peça foi alocada em seu lugar por meio do módulo de montagem (*assembly*), como ilustrado pela Figura 3.8. A vinculação entre cada parte foi definida como perfeita (*tie*). A análise térmica considerou um tempo de exposição ao fogo de 45 minutos, a fim de realizar a comparação com os resultados apresentados por Audebert *et al.* (2013). A distribuição da temperatura na ligação foi realizada por meio da análise de transferência de calor, utilizando uma malha formada por elementos quadráticos hexaédricos do tipo DC3C8, ilustrada pela Figura 3.8.

Figura 3.8 – Modelagem tridimensional e malha da ligação tipo B



Fonte: Autor (2025)

Conforme relatado por Audebert *et al.* (2013), no ensaio experimental a ligação foi submetida a esforços de tração paralelo às fibras da madeira. O ensaio em temperatura ambiente permitiu determinar a curva carga-deslocamento e a capacidade resistente da ligação, que serviu de base para definir a razão da carga aplicada às ligações durante os ensaios em situação de incêndio.

Em temperatura ambiente, esta tipologia de ligação suportou um carregamento de 269,4 kN, sendo definidos razões de 10% e 30% para aplicação da carga em situação de incêndio, conforme apresentado na Tabela 3.3, alcançando tempos de resistência ao fogo (t_{fi}) de 79 min e 54 minutos, respectivamente.

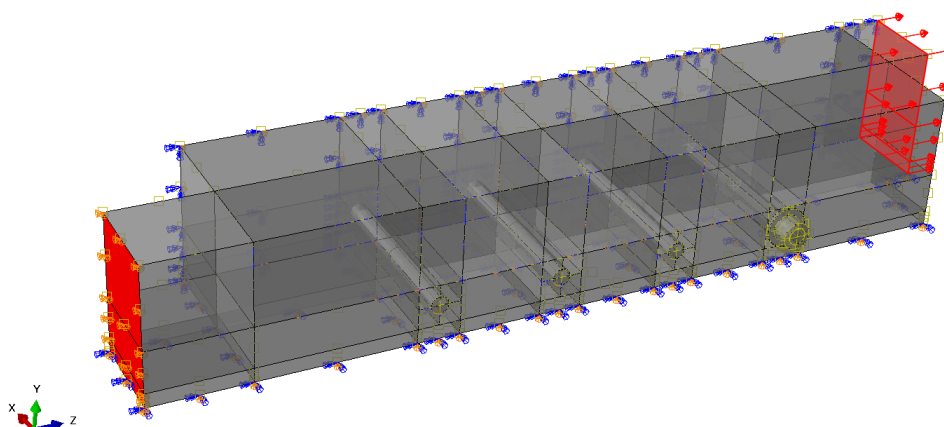
Tabela 3.3 – Valores de tempo de resistência ao fogo no ensaio experimental

$N_{u,exp}$ (kN)	η_{exp} (F/ $N_{u,exp}$)	F (kN)	t_{fi}
269,4	0,10	26,94	79
	0,30	80,82	54

Fonte: Adaptado de Audebert *et al.* (2013)

Para a modelagem numérica, a representação do carregamento em temperatura ambiente deu-se pela imposição de um deslocamento de 10 mm no sentido da tração paralela às fibras da madeira, conforme ilustrado pela Figura 3.9. Na Figura 3.9 também é possível observar a região de apoio da ligação.

Figura 3.9 – Região de apoios e aplicação do carregamento



Fonte: Autor (2025)

Algumas propriedades mecânicas da madeira obtidas no ensaio experimental são apresentadas na Tabela 3.4. Os valores de propriedades mecânicas informados ao programa foram uma combinação da tabela Tabela 3.4 com os dados da norma EN 1194:1999 para a classe de MLC GL24h.

Tabela 3.4 – Propriedades mecânicas da madeira obtidas em ensaio experimental

E₀ (MPa)	E₉₀ (MPa)	G (MPa)	v_{LR=RT}	v_{TL}	f_{c,0} (MPa)	f_{c,90} (MPa)	τ (MPa)
11600	380	720	0,41	0,02	37,6	3,51	3,51

Fonte: Adaptado de Audebert *et al.* (2013)

A madeira é um material ortotrópico caracterizada pelas distintas propriedades mecânicas em cada uma de suas direções, longitudinal (L), transversal (T) e radial (R). Para simplificar as simulações numéricas, partiu-se do pressuposto que as propriedades na direção radial e tangencial são iguais. Dessa forma, utilizou-se o critério de Hill para a representação do comportamento plástico da madeira, o qual consiste em uma versão generalizada do critério de escoamento de von Mises, utilizado para descrever a anisotropia dos materiais (Audebert *et al.* (2013); Fernandes e Munaiar Neto, 2022). A tensão máxima é expressa pela Equação (3.1).

$$\bar{\sigma} = \frac{\left[a_1(\sigma_y - \sigma_z)^2 + a_2(\sigma_z - \sigma_x)^2 + a_3(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 3a_4\tau_{zx}^2 + 3a_5\tau_{yz}^2 + 3a_6\tau_{xy}^2 \right]^{1/2}}{\sqrt{2}} \quad (3.1)$$

Os símbolos σ_x , σ_y e σ_z são os constituintes das tensões normais nas direções X, Y e Z, respectivamente. Os símbolos τ_{xy} , τ_{zx} e τ_{yz} são os constituintes da tensão de cisalhamento da madeira. Os coeficientes a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 e a_6 foram calculados de acordo com as Equações (3.2), (3.3) e (3.4).

$$a_1 = \frac{2}{f_{c,90}^2} - \frac{1}{f_{c,0}^2} \quad (3.2)$$

$$a_2 = a_3 = \frac{1}{f_{c,0}^2} \quad (3.2)$$

$$a_4 = a_5 = a_6 = \frac{2}{3f_v^2} \quad (3.3)$$

$f_{c,90}$, $f_{c,0}$ e f_v são as resistências ao escoamento da madeira em compressão perpendicular à fibra, paralela à fibra e ao cisalhamento, respectivamente.

O aço foi considerado como um material isotrópico não linear. Tanto pinos quanto parafusos pertencem à classe 4.6, cujas características mecânicas do aço são apresentadas na Tabela 3.5. Para representar o comportamento plástico do aço foi considerado o critério de Von Mises.

Tabela 3.5 – Propriedades mecânicas do aço no modelo de Audebert *et al.* (2013)

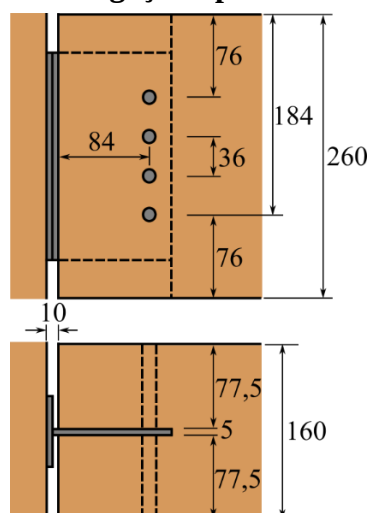
E (GPa)	ν	f_y (MPa)	f_u (MPa)
210	0,3	240	400

Fonte: Audebert *et al.* (2013)

3.2.3 Palma (2016)

Palma (2016) estudou diversas tipologias de ligação entre viga e pilar em estruturas de madeira constituídas por placas de aço e pinos metálicos. Para este trabalho, realizou-se a análise numérica da tipologia de ligação A.1, cujas características geométricas são apresentadas na Figura 3.10.

Figura 3.10 – Geometria da ligação tipo A.1. Dimensões em milímetros

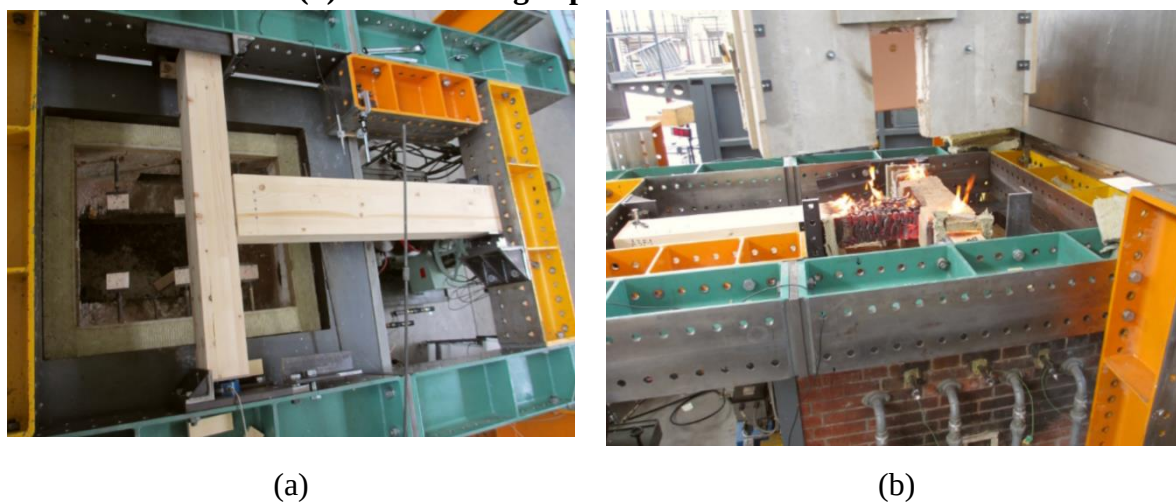


Fonte: Adaptado de Palma (2016)

A madeira utilizada é da espécie *Spruce (Picea abies)*, classificada como uma conífera com densidade de 420 kg/m³, classe GL24h cujas características mecânicas são descritas pela EN 1194:1999. Os quatro pinos que formam a ligação possuem 12 mm de diâmetro e pertencem a classe 6.6 de acordo com a EN 1993-1-8:2005, a placa possui 5 mm de espessura e é classificada como S 355, conforme a EN 10025-1:2004, e os pregos que se conectam com o pilar são da classe 4.6, com diâmetro de 6 mm e comprimento de 80 mm

O ensaio experimental de Palma consistiu em submeter a ligação viga-pilar (Figura 3.11 (a)) a determinado carregamento (30% da carga suportada pela ligação em temperatura ambiente) e, logo após a estabilização dos deslocamentos, o forno era ligado. Nota-se, pela Figura 3.11 (b), que apenas a região próxima à ligação ficou dentro do forno, estando o ponto de aplicação da carga do lado externo.

Figura 3.11 – Ensaio experimental de Palma (2016): (a) Estrutura antes de ir ao forno; (b) Estrutura logo após a abertura do forno

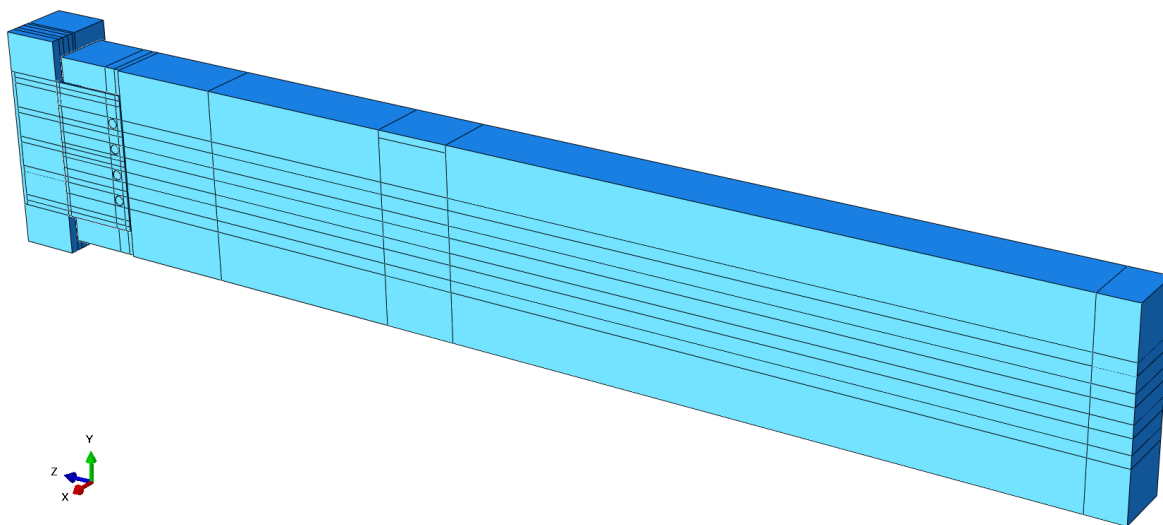


Fonte: Palma (2016)

O foco do estudo de Palma (2016) foi o comportamento da ligação exposta ao fogo na região da viga de madeira, enquanto o pilar foi protegido durante a execução de alguns ensaios. Para a tipologia A.1 e pilar protegido, o ensaio teve duração de 44,1 minutos, entretanto, a análise numérica térmica neste trabalho foi desenvolvida até 90 minutos a fim de se observar a evolução da carbonização e a redução gradual da seção resistente da madeira após o tempo de falha experimental, possibilitando avaliar o comportamento do elemento em tempos superiores em situação de incêndio.

Devido a simetria da ligação, para a análise numérica, o modelo de Palma (2016) foi simplificado dividindo-se a viga na parte central no sentido de seu comprimento, sendo a face interna considerada adiabática. Os elementos de madeira (viga e parte do pilar) e de aço (pinos, placa e pregos) que compõem a ligação, foram modelados separadamente e, posteriormente, foram montados conforme a ligação proposta por Palma (2016). A composição da conexão pronta para a análise numérica é ilustrada pela Figura 3.13.

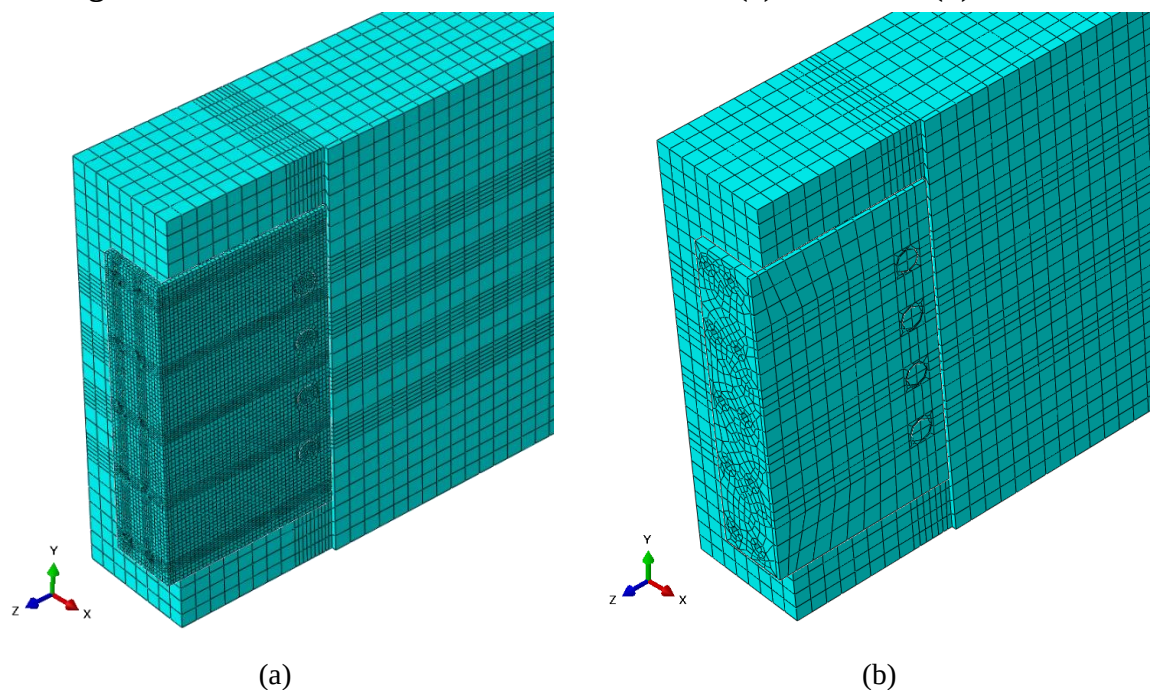
Figura 3.12 – Modelagem tridimensional do modelo A.1



Fonte: Autor (2025)

Na Figura 3.12 observa-se a presença de recortes nos elementos, que foram feitos para construir uma malha mais discretizada no modelo mecânico, Figura 3.13 (a), com o intuito de captar as variações no entorno dos furos. Para o modelo térmico não há necessidade desse nível de refinamento, então utilizou-se malha mais grosseira, ilustrada na Figura 3.13 (b).

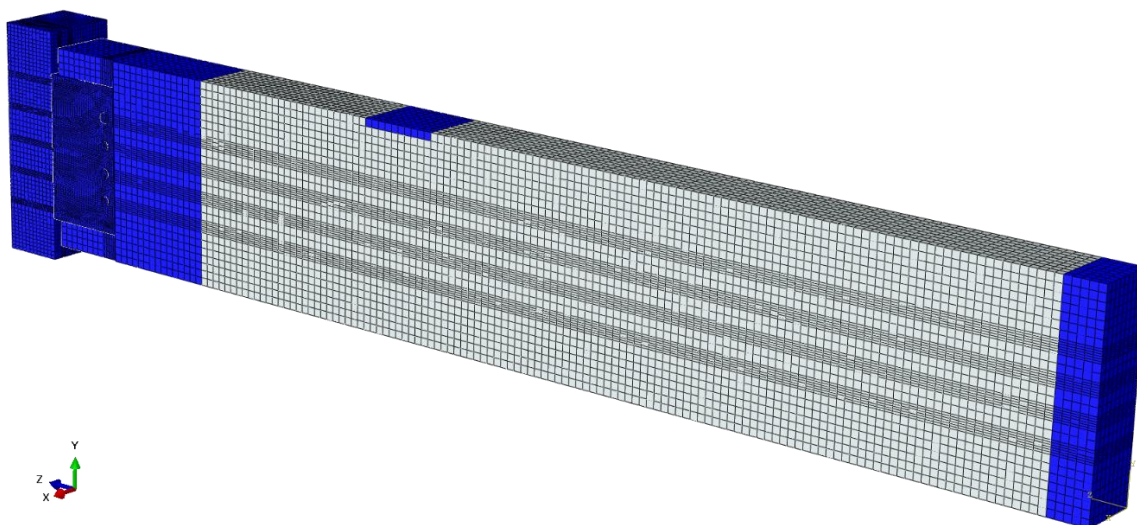
Figura 3.13 – Detalhe nas malhas do modelo A.1: (a) Mecânico; (b) Térmico



Fonte: Autor (2025)

Nas regiões da aplicação da carga e dos apoios (pilar e extremidades da viga), representadas pela cor azul na Figura 3.14, adotou-se o comportamento elástico linear para os materiais a fim de evitar erros de convergência. Dessa forma, ainda que os pinos, os pregos e a placa de aço sejam compostos por diferentes tipos de aço, todos foram modelados considerando elasticidade linear, sendo os valores utilizados apresentados na Tabela 3.6.

Figura 3.14 – Regiões com elasticidade linear no modelo de Palma (2016)



Fonte: Autor (2025)

Tabela 3.6 – Propriedades mecânicas do aço no modelo de Palma (2016)

Elemento	E (GPa)	ν
Placa	210	0,3
Pinos		
Pregos		

Fonte: Autor (2025)

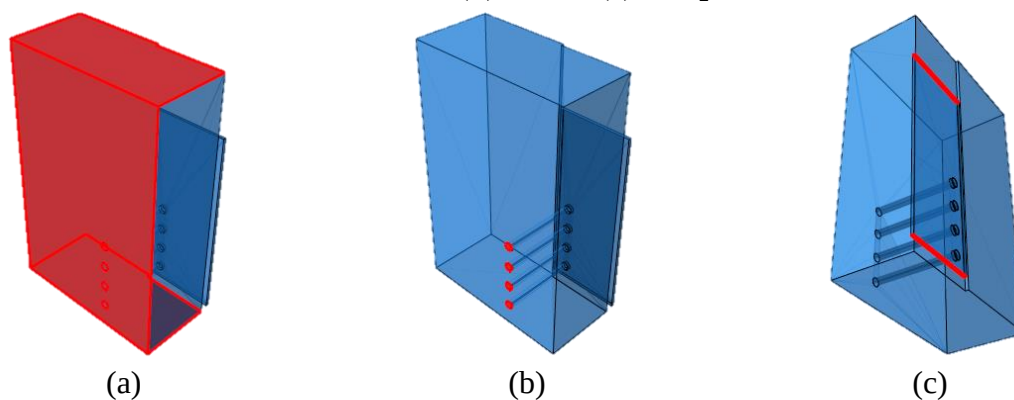
A madeira, ilustrada pela cor cinza na Figura 3.14, teve seu comportamento plástico representado pelo modelo *Concrete Damaged Plasticity* (CDP), cujos valores utilizados na análise mecânica encontram-se na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Propriedades mecânicas da madeira no modelo de Palma (2016)

Ψ (°)	ξ	f_{b0}/f_{c0}	K_c	μ
35	0,15	1,16	0,667	0

Fonte: Autor (2025)

As interações térmicas foram consideradas nas faces destacadas em vermelho, ilustrada pela Figura 3.15, de modo que os parâmetros de radiação e de convecção fossem aplicados nas faces expostas da madeira (a) e dos pinos (b). Para as faces da placa de aço (Figura 3.15 (c)), como não estão diretamente expostas ao calor do forno, pois existe uma distância de 35 mm até a face, a radiação foi considerada juntamente a um fator de redução de 0,5, conforme debatido pelo próprio autor.

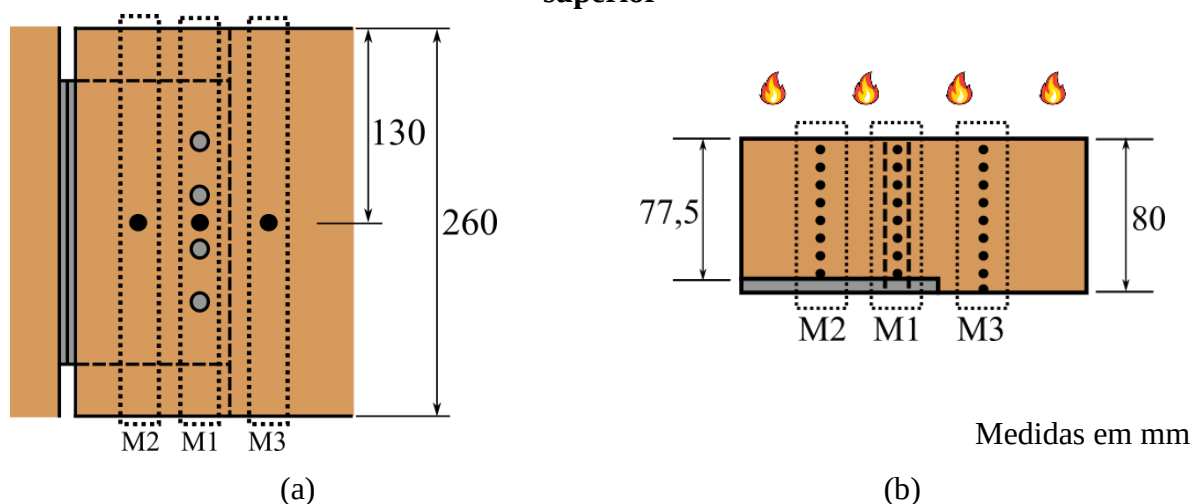
Figura 3.15 – Faces expostas à radiação e convecção no modelo de Palma (2016): (a) Madeira; (b) Pinos; (c) Chapa

Fonte: Palma (2016)

No estudo experimental de Palma (2016), não foram coletados dados de temperatura no interior da conexão. Na análise numérica deste trabalho, foram criados pontos de dados de saída, com o objetivo de se obter as leituras de temperatura no interior do elemento de madeira e na superfície interna do pino e, posteriormente, discorrer sobre o comportamento encontrado.

Os pontos de leitura de temperatura na madeira foram alocados a meia altura do elemento de madeira (Figura 3.16 (a)), em três seções transversais distintas: na região dos pinos e placa (M1), na região da placa (M2) e na região fora da ligação (M3), conforme ilustrado na Figura 3.16 (b). Em cada região foram inseridos pontos a cada 10 mm de profundidade a partir da face exposta ao fogo.

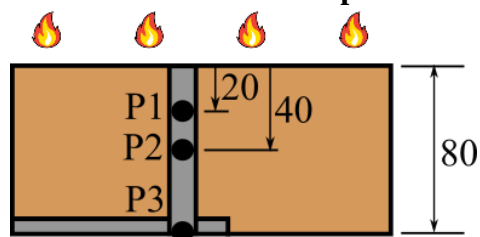
Figura 3.16 – Pontos de leitura de temperatura na madeira: (a) Vista lateral; (b) Vista superior



Fonte: Autor (2025)

Para o registro da temperatura do aço, escolheu-se arbitrariamente um dos pinos, onde foram designados os pontos P1, P2 e P3, distantes 20 mm, 40 mm e 80 mm, respectivamente, a partir da face exposta ao fogo, como observado na Figura 3.17.

Figura 3.17 – Pontos de leitura de temperatura no pino



Fonte: Autor (2025)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são expostos os resultados e as discussões relacionados às análises numéricas e teóricas, com base nos dados experimentais de Martins (2016), Audebert *et al.* (2013) e Palma (2016). Além disso, apresenta-se a discussão acerca do uso de diferentes propriedades térmicas para representar o comportamento da madeira em situação de incêndio, nos modelos de Martins (2016) e de Audebert *et al.* (2013).

4.1 MARTINS (2016)

Considerando os dados dos ensaios experimentais realizados por Martins (2016) foram desenvolvidas análises térmicas bidimensionais.

4.1.1 Estudo das propriedades térmicas

O estudo das propriedades térmicas realizadas neste trabalho visa avaliar a aplicabilidade dos valores de condutividade térmica, calor específico e a relação densidade por densidade seca propostos pela EN 1995-1-2:2004, Audebert *et al.* (2013) e Fernandes (2022).

Audebert *et al.* (2013) propõe valores de condutividade térmica e de calor específico elaborados conforme os estudos de Fredlund (1993) e de Janssens (1994). E Fernandes (2022) propõe valores para condutividade térmica calibrados a partir dos dados experimentais de Martins (2016). A EN 1995-1-2:2004 destaca que os valores propostos para as propriedades térmicas referem-se especificamente a madeiras coníferas. Além disso, a norma reconhece que, dependendo do modelo de cálculo adotado, pode ser necessário ajustar esses valores para melhor representar o comportamento térmico do material analisado.

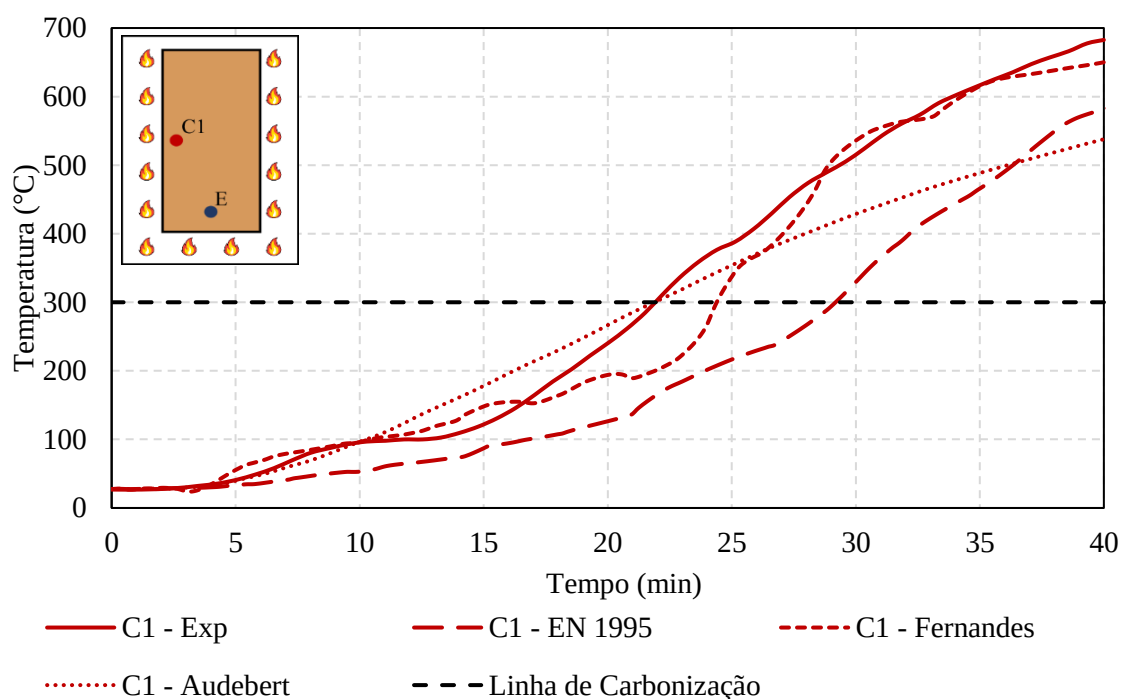
Foram avaliadas duas espécies de madeira: *Pinus* e *Lyptus*. Para cada uma delas fez-se a análise térmica considerando as três diferentes propostas, e observou-se a elevação da temperatura em dois pontos da seção transversal: C1, localizado à 19 mm da face lateral esquerda, e E, distante 30 mm da face inferior.

A Figura 4.1 apresenta a elevação da temperatura para o ponto C1 da viga de madeira *Pinus*, observa-se que as análises numéricas apresentam um comportamento próximo ao obtido no ensaio experimental de Martins (2016), sendo a proposta de Fernandes (2022) a curva com

a melhor correlação com os dados obtidos experimentalmente, o que pode ser explicado devido ao fato de que Fernandes (2022) calibrou sua curva de condutividade térmica com base nos resultados experimentais de Martins (2016).

Ainda assim, a elevação da temperatura obtida com as outras propostas mantêm-se próximas do ensaio, com a proposta de Audebert *et al.* (2013) atingindo a carbonização (identificado pela isoterma de 300°C) do ponto C1 aos 22 minutos de exposição, assim como no ensaio experimental. Entretanto, após esse tempo a curva considerando os dados propostos por Audebert *et al.* (2013) apresenta uma elevação de temperatura inferior em relação ao experimental. Enquanto a elevação da temperatura obtida com as propriedades da EN 1995-1-2:2004 demonstra valores inferiores se comparado ao experimental, contudo, apresenta a mesma tendência de crescimento.

Figura 4.1 – Evolução da temperatura no ponto C1 da viga de *Pinus*



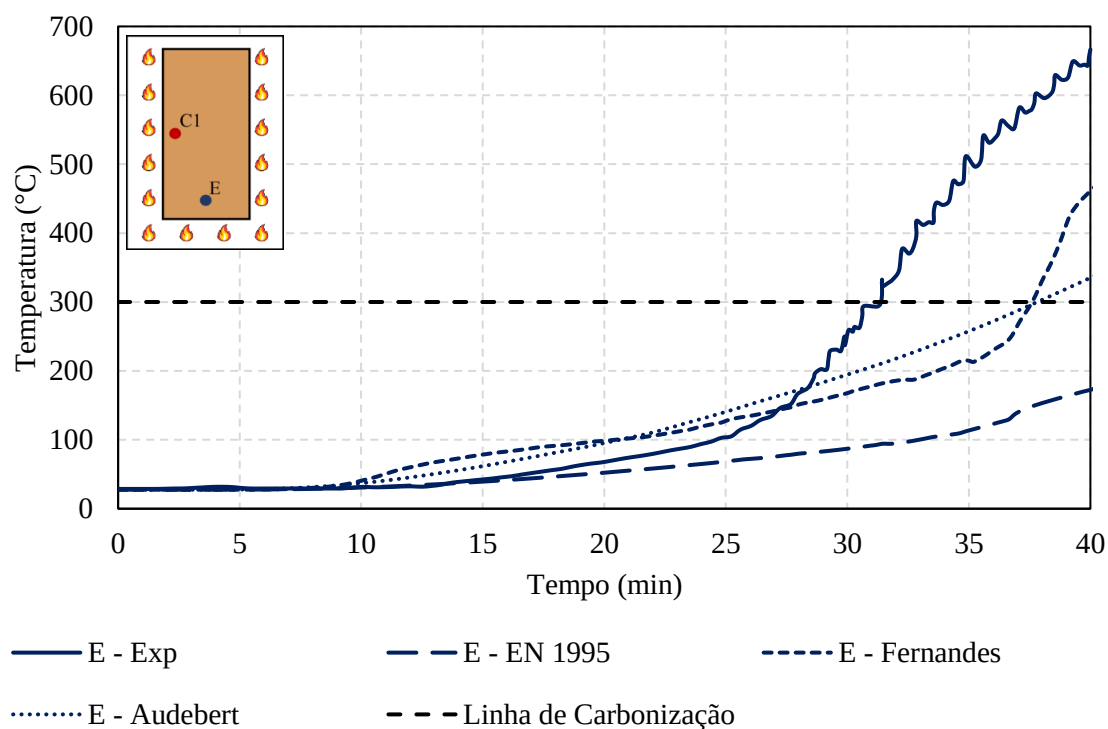
Fonte: Autor (2025)

A Figura 4.2 representa a evolução da temperatura no ponto E da viga de *Pinus*, nos 10 minutos iniciais da exposição ao fogo percebe-se que todas as análises numéricas representam o comportamento do ensaio experimental. Entretanto, a partir de 10 minutos a elevação da temperatura obtida com a proposta da EN 1995-1-2:2004 apresenta um crescimento inferior,

atingindo a temperatura máxima de 172°C ao final da exposição, não indicando carbonização para este ponto, sendo esta a proposta menos representativa.

As curvas obtidas a partir das propostas de Audebert *et al.* (2013) e de Fernandes (2022) apresentam uma melhor correlação com a curva do ensaio experimental - ambas apresentando carbonização por volta de 38 minutos, enquanto o termopar no ensaio experimental registrou 300°C aos 32 minutos - em especial a proposta de Fernandes (2022) que é capaz de representar o aumento maior na temperatura ao final do ensaio. Mais uma vez a curva com as propriedades propostas por Fernandes (2022) apresentou uma melhor correlação, o que era esperado considerando que o autor calibrou sua curva de condutividade térmica com base nos resultados experimentais de Martins (2016).

Figura 4.2 – Evolução da temperatura no ponto E da viga de *Pinus*



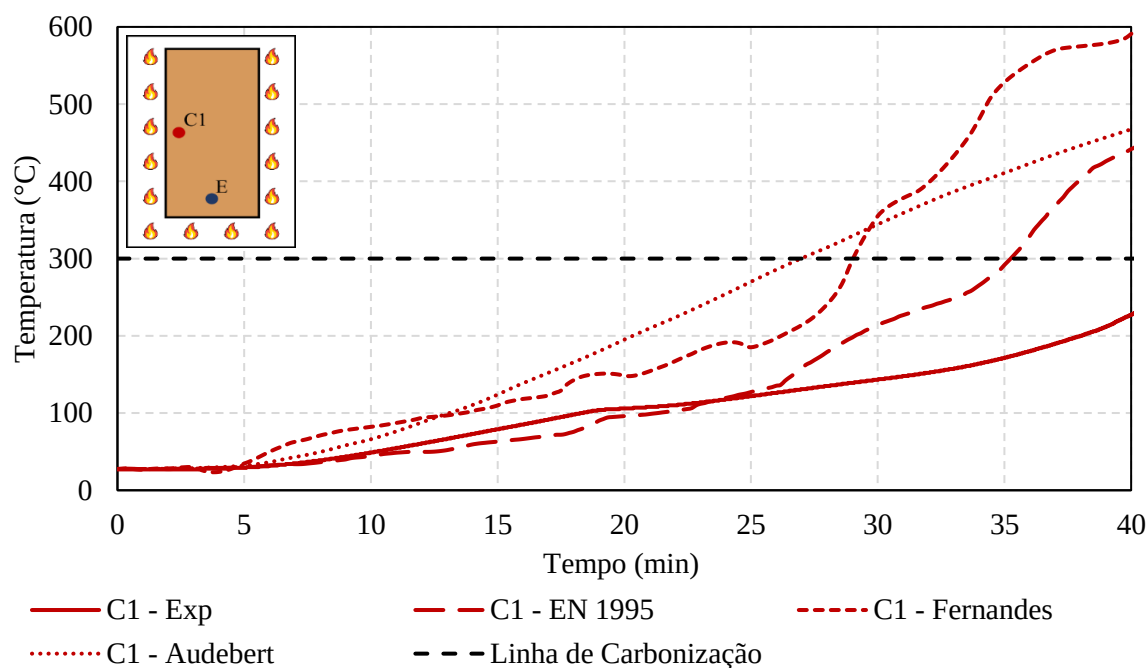
Fonte: Autor (2025)

Para o ponto C1 da viga de madeira *Lyptus* (Figura 4.3), localizado há uma distância de 19 mm da face exposta ao fogo, percebe-se que a curva da evolução da temperatura gerada pelo modelo térmico com a proposta da EN 1995-1-2:2004 demonstra compatibilidade com o comportamento encontrado no ensaio experimental durante os 25 minutos iniciais de exposição ao fogo, registrando temperatura em torno de 125°C. Após esse período, houve uma divergência

de dados, de forma que a curva encontrada a partir da proposta da EN 1995-1-2:2004 passou a apresentar temperaturas mais elevadas do que a análise experimental, ainda assim, foi a proposta com melhor correlação com os dados experimentais entre as três avaliadas.

As curvas de elevação de temperatura com as propostas de Audebert *et al.* (2013) e de Fernandes (2022) apresentam maior elevação de temperatura após os 5 minutos iniciais, com maior divergência do comportamento observado experimentalmente. A curva de Fernandes (2022) segue uma tendência de crescimento semelhante ao experimental até os primeiros 25 minutos, apesar de apresentar temperaturas mais elevadas, entretanto, após esse período demonstra crescimento acentuado, apresentando carbonização do ponto aos 29 minutos, ou seja, temperaturas acima de 300°C. A temperatura máxima registrada pelo termopar durante o ensaio foi de aproximadamente 220°C, o que não indicaria o processo de carbonização da madeira.

Figura 4.3 – Evolução da temperatura no ponto C1 da viga de *Lyptus*



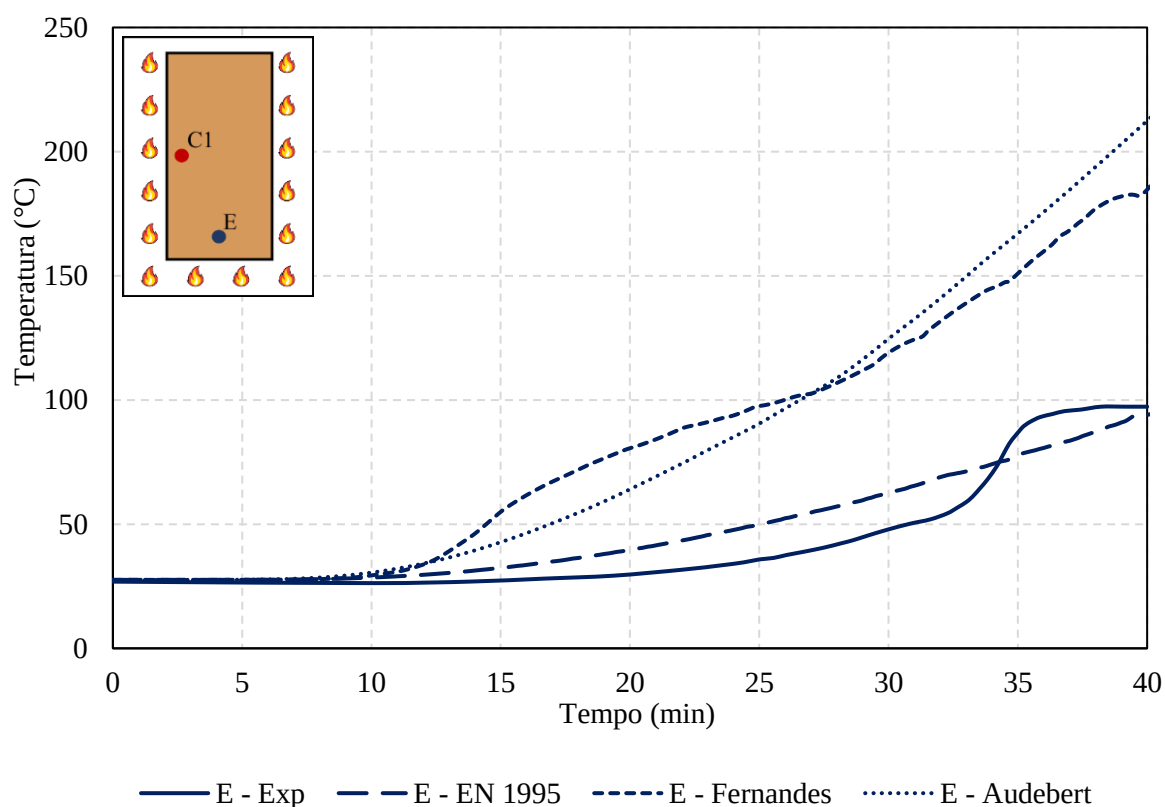
Fonte: Autor (2025)

A Figura 4.4 apresenta a evolução da temperatura no ponto E da viga de *Lyptus*, observa-se que a curva experimental apresenta um comportamento térmico mais gradual, com temperaturas inferiores a 100 °C durante todo o período analisado. Destaca-se uma elevação mais acentuada entre 30 e 35 minutos, seguida de uma estabilização próxima de 95 °C.

Nota-se que as análises numéricas com as propriedades de Fernandes (2022) e de Audebert *et al.* (2013) apresentam uma boa correlação de dados com o ensaio experimental apenas nos primeiros 10 minutos, a partir desse momento ambas as análises apresentam valores superiores aos experimentais, chegando a temperaturas próximas de 200°C.

A curva de evolução da temperatura obtida com as propriedades da EN 1995-1-2:2004 mostrou-se satisfatória em representar o comportamento do ponto E para a viga de madeira *Lyptus*. Embora ainda acima dos valores medidos durante parte da análise, ao final da exposição atingiu temperatura bem próxima ao ensaio experimental, marcando quase 100°C.

Figura 4.4 – Evolução da temperatura no ponto E da viga de *Lyptus*



Fonte: Autor (2025)

No caso da viga de madeira de *Lyptus*, o ponto E não apresentou indícios de carbonização, tanto nos resultados experimentais quanto nas análises numéricas, comportamento distinto daquele observado na viga de madeira *Pinus* para a mesma posição.

Essa diferença observada na taxa de carbonização entre *Pinus* e *Lyptus* pode ser atribuída à influência de fatores internos (propriedades do material) e externos, de acordo com

Friquin (2010). Os fatores internos englobam a densidade da madeira, orientação das fibras, teor de umidade, permeabilidade, composição química, contração e oxidação do carvão, e tamanho da amostra estudada, e dentre os fatores externos destacam-se as características do ambiente de teste do corpo de prova, considerando a exposição térmica, disponibilidade de oxigênio e fator de abertura de compartimento do ensaio (Martins *et al.*, 2025).

Para o elemento de *Pinus*, a melhor proposta para representação das propriedades térmicas via análises numéricas seria a proposta elaborada por Fernandes (2022). Enquanto, para o elemento de *Lyptus* a melhor concordância com os resultados experimentais foi obtida com os valores de propriedades térmicas descritos na EN 1995-1-2:2004.

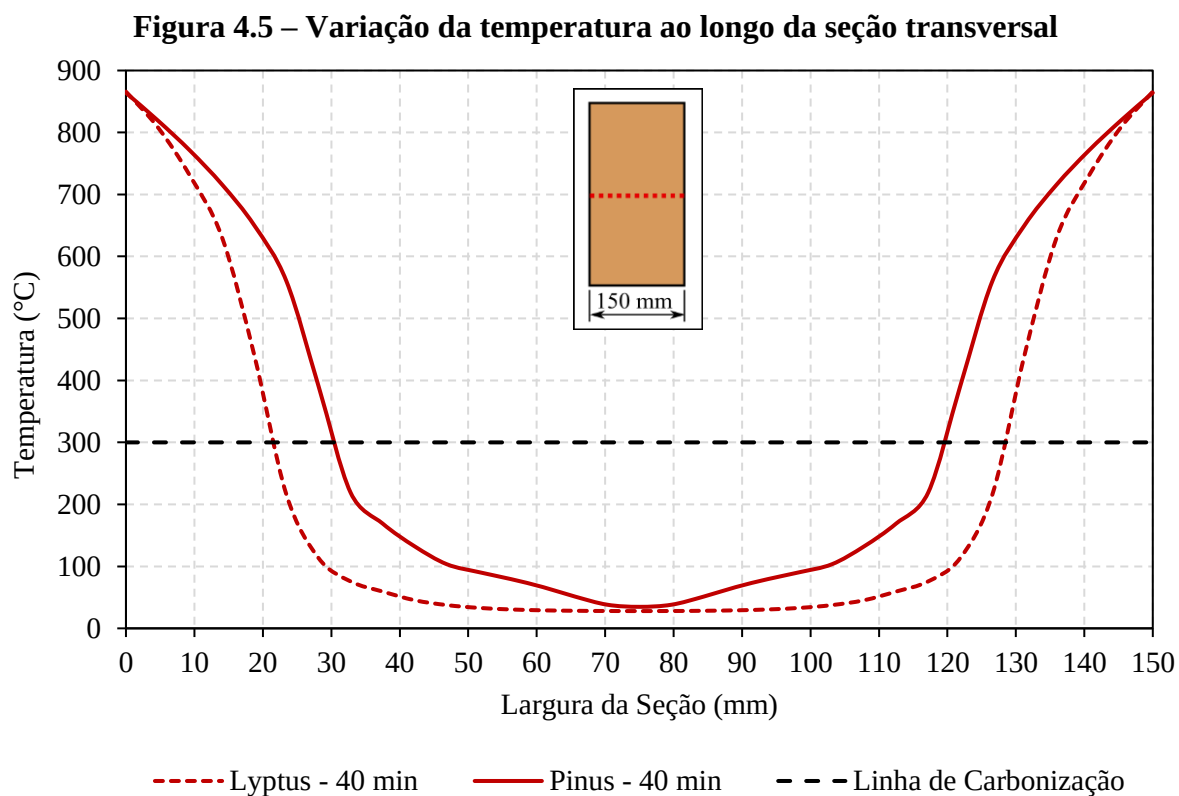
Conforme destacado por Fernandes (2018), a calibração dos parâmetros foi realizada com base nos espécimes de madeira *Pinus* dos ensaios experimentais de Martins (2016). Tal fato justifica a discrepância observada entre os resultados numéricos com propriedades de Fernandes (2022) e os dados experimentais obtidos para a viga de *Lyptus*, evidenciando a necessidade de estudos específicos e aprofundados sobre o comportamento térmico desta espécie.

A EN 1995-1-2:2004, cuja a proposta das propriedades refere-se às madeiras coníferas, apresentou boa correlação com o comportamento térmico observado na viga de *Lyptus*, espécie pertencente ao grupo das folhosas. Vale lembrar que a EN 1995-1-2:2004 menciona a possibilidade de ajuste de valores para a melhor representação do comportamento térmico do material analisado, que é justamente o que Fernandes (2022) faz ao calibrar a curva de condutividade térmica baseada na EN 1995-1-2:2004 com os ensaios de Martins (2016).

A Figura 4.5 ilustra a variação da temperatura que ocorre no interior de cada elemento no interior da seção transversal no final da análise, considerando o modelo numérico com maior correlação com o experimental para cada espécie: proposta de Fernandes (2022) para *Pinus* e proposta da EN 1995-1-2:2004 para *Lyptus*.

Ao comparar as duas espécies, nota-se uma diferença significativa no avanço do fluxo de calor. O *Pinus*, por ser uma conífera com estrutura anatômica mais simples, maior presença de lenho tardio e maior permeabilidade, favorece a condução de calor para o interior da seção. Enquanto o *Lyptus*, uma folhosa com estrutura mais densa e porosidade reduzida, apresenta maior resistência à propagação térmica (Jang; Kang, 2019; Santos *et al.*, 2020). Além disso, os fatores internos e externos, como abordado anteriormente, também influenciam esse comportamento.

Em ambas as espécies, evidencia-se a diferença na elevação de temperatura entre as regiões mais externas da seção e o núcleo da madeira, que permanece com temperaturas mais baixas (inferiores a 50 °C), caracterizando uma região ainda intacta e protegida pela baixa condutividade térmica da madeira.



Fonte: Autor (2025)

4.1.2 Espessura carbonizada

A determinação da espessura carbonizada foi obtida por meio de dados de ensaios experimentais realizados por Martins (2016), modelos numéricos utilizando o método de dimensionamento avançado e pela aplicação do método simplificado, conforme as diretrizes das normas ABNT NBR 7190-1:2022 e EN 1995-1-2:2004.

As Tabela 4.1 e Tabela 4.2 demonstram as espessuras carbonizadas e as taxas de carbonização determinadas para os pontos C1 e E das vigas de *Pinus* e *Lyptus*, respectivamente. O ponto C1 situa-se a 19 mm da face lateral, enquanto o ponto E localiza-se a 30 mm da face inferior. Para o caso do método teórico, a aplicação do método simplificado foi utilizada para a

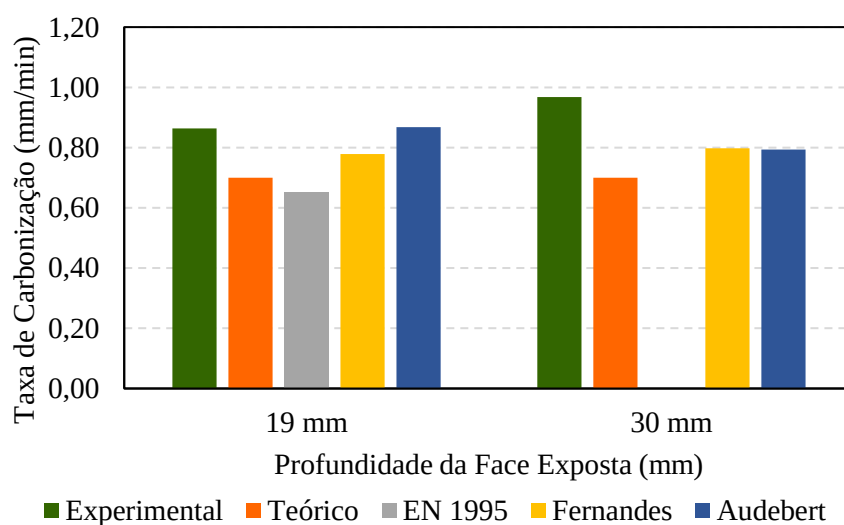
determinação do tempo para carbonização no ponto especificado, sendo utilizada a taxa de carbonização nominal, cujo valor é constante e está disponível na ABNT NBR 7190-1:2022. Nas Tabela 4.1 e Tabela 4.2 os espaços indicados em branco, indicam que não houve carbonização estipulada no ponto especificado por meio do método utilizado para análise.

Tabela 4.1 – Taxas de carbonização nos pontos C1 e E para a espécie *Pinus*

Método	C1 ($e_{carb} = 19 \text{ mm}$)		E ($e_{carb} = 30 \text{ mm}$)	
	Tempo (min)	β (mm/min)	Tempo (min)	β (mm/min)
Experimental	22,0	0,86	31,0	0,97
Teórico (NBR 7190)	27,1	0,70	42,9	0,70
Numérico (EN 1995)	29,2	0,65	-	-
Numérico (Fernandes)	24,4	0,78	37,6	0,80
Numérico (Audebert)	21,9	0,87	37,8	0,79

Fonte: Autor (2025)

Figura 4.6 – Taxas de carbonização para a viga de *Pinus*



Fonte: Autor (2025)

Na Tabela 4.1 e na Figura 4.6, o método experimental indicou as maiores taxas de carbonização em ambos os pontos, sendo 0,86 mm/min em C1 e 0,97 mm/min em E, refletindo um avanço mais rápido da frente de carbonização em relação aos métodos de dimensionamento.

O modelo teórico, baseado no método simplificado normativo, apresenta valores constantes de 0,70 mm/min para ambos os pontos, conforme tabelado na ABNT NBR 7190-

1:2022. Para os demais métodos, com exceção da proposta de Audebert *et al.* (2013) observou-se um aumento da taxa de carbonização com o avanço da espessura carbonizada.

Entre os modelos numéricos, o modelo de Audebert *et al.* (2013) destacou-se como o mais próximo do resultado experimental para o ponto C1, com uma taxa de 0,87 mm/min — praticamente idêntica à observada no ensaio. Os modelos baseados em Fernandes (2022) e na EN 1995-1-2:2004 apresentaram taxas inferiores, de 0,65 e 0,78 mm/min, respectivamente, para o ponto C1, e 0,80 mm/min para o ponto E pela proposta de Fernandes (2022). Destaca-se que pela proposta da EN 1995-1-2:2004, o ponto E não atingiu a carbonização durante o tempo de análise.

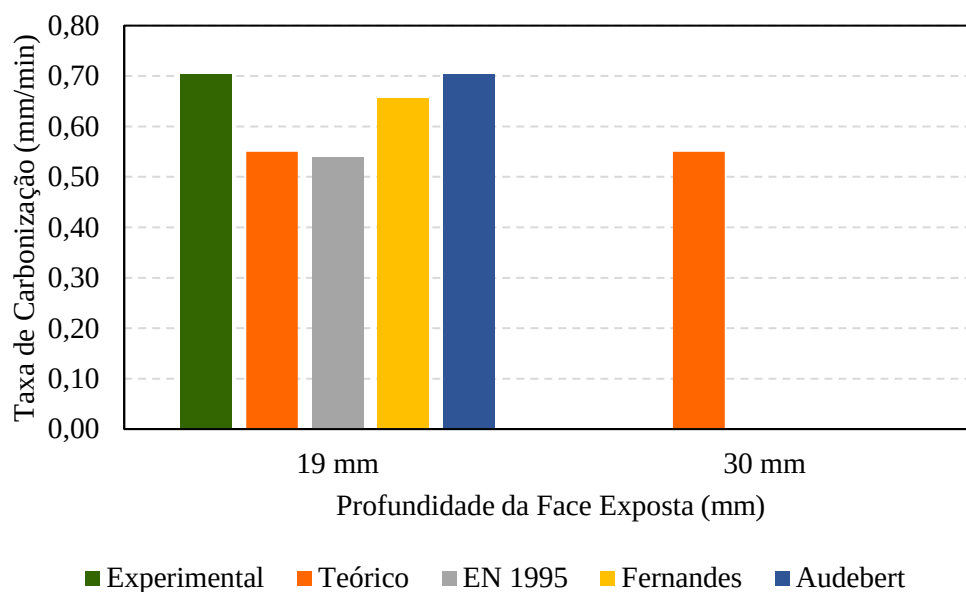
Para a espécie *Lyptus*, não houve registro de carbonização em nenhum dos pontos pelo método experimental durante o ensaio, ou seja, as temperaturas registradas pelos termopares nestes pontos foram inferiores a 300 °C. O modelo teórico apresenta taxa de carbonização constante de 0,55 mm/min, conforme ABNT NBR 7190-1:2022. Destaca-se que para o ponto E no elemento do *Lyptus*, apenas o método teórico estima carbonização, mas considerando um tempo de exposição ao fogo de 54,5 minutos ultrapassando o tempo analisado nos ensaios e via modelo numérico.

Tabela 4.2 – Taxas de carbonização nos pontos C1 e E para a espécie *Lyptus*

Método	C1 (e_{carb} = 19 mm)		E (e_{carb} = 30 mm)	
	Tempo (min)	β (mm/min)	Tempo (min)	β (mm/min)
Experimental	-	-	-	-
Teórico (NBR 7190)	34,5	0,55	54,5	0,55
Numérico (EN 1995)	35,2	0,54	-	-
Numérico (Fernandes)	29,0	0,66	-	-
Numérico (Audebert)	27,0	0,70	-	-

Fonte: Autor (2025)

Figura 4.7 – Taxas de carbonização para a viga de *Lyptus*



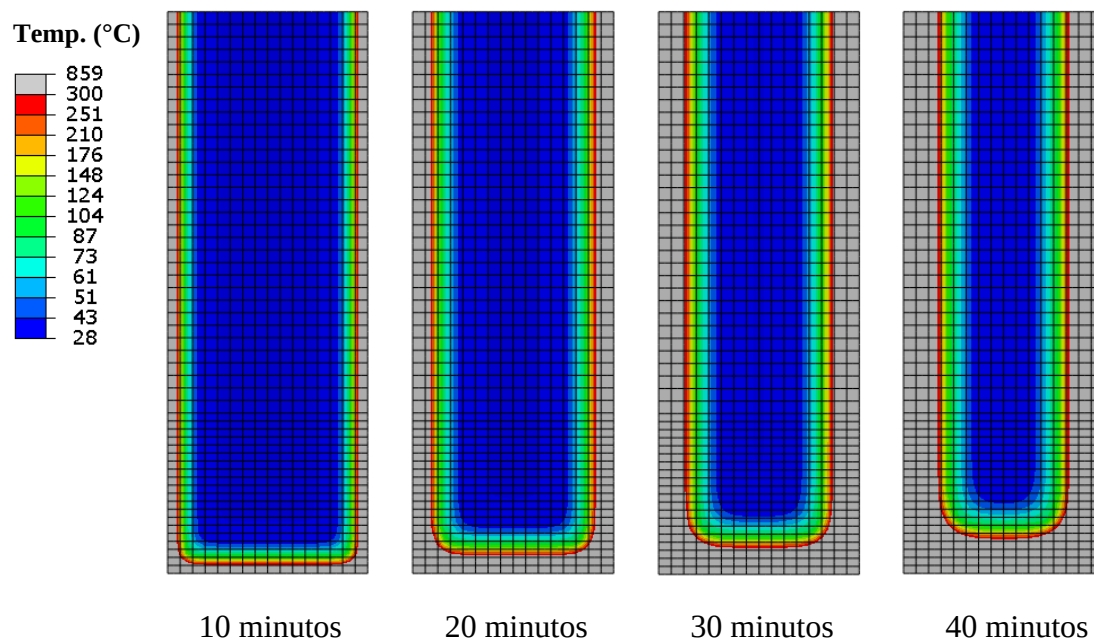
Fonte: Autor (2025)

Para o ponto C1, os valores de taxa de carbonização nos modelos numéricos variaram entre 0,54 mm/min (EN 1995-1-2:2004) e 0,70 mm/min (Audebert *et al.* (2013)). Os modelos de Fernandes (2022) e Audebert *et al.* (2013) indicaram valores superiores aos do modelo baseado na EN 1995-1-2:2004, sugerindo maior velocidade de fluxo de calor em relação à carbonização superficial nesta região.

As Figura 4.8 a Figura 4.13 representam a evolução da carbonização, representada pela cor cinza (região com temperatura acima de 300°C), e o fluxo de calor no interior da seção das vigas de *Pinus* (Figura 4.8 a Figura 4.10) e de *Lyptus* (Figura 4.11 a Figura 4.13), obtidos pelos modelos numéricos considerando as propostas da EN 1995-1-2:2004, de Fernandes (2022) e de Audebert *et al.* (2013). Estes resultados serviram de base para o cálculo da espessura carbonizada, considerando o método de dimensionamento avançado.

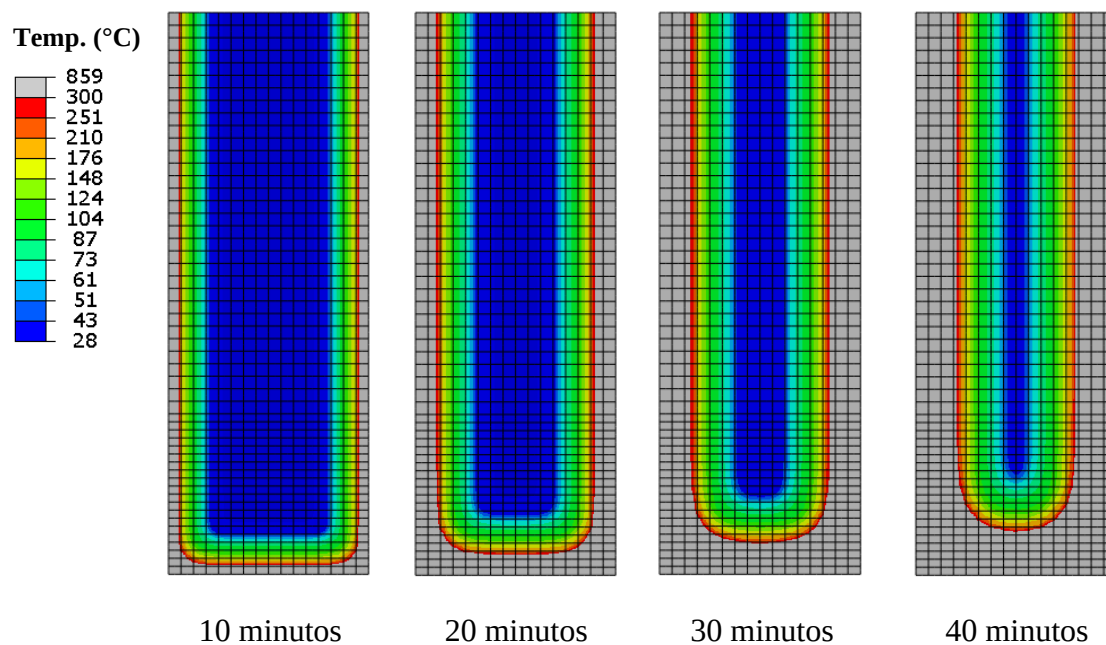
Nota-se que a evolução da temperatura obtida utilizando-se as propriedades de Fernandes (2022) e de Audebert *et al.* (2013) se mostram mais elevados quando comparados com os resultados da EN 1995-1-2:2004, tanto para *Pinus* quanto para *Lyptus*. Também é possível observar a diferença entre espécies de madeira, com o *Pinus* apresentando um maior fluxo de calor e maiores espessuras de carbonização.

Figura 4.8 – Evolução da carbonização e fluxo de calor no interior da seção de *Pinus* com base nas propriedades térmicas da EN 1995-1-2:2004



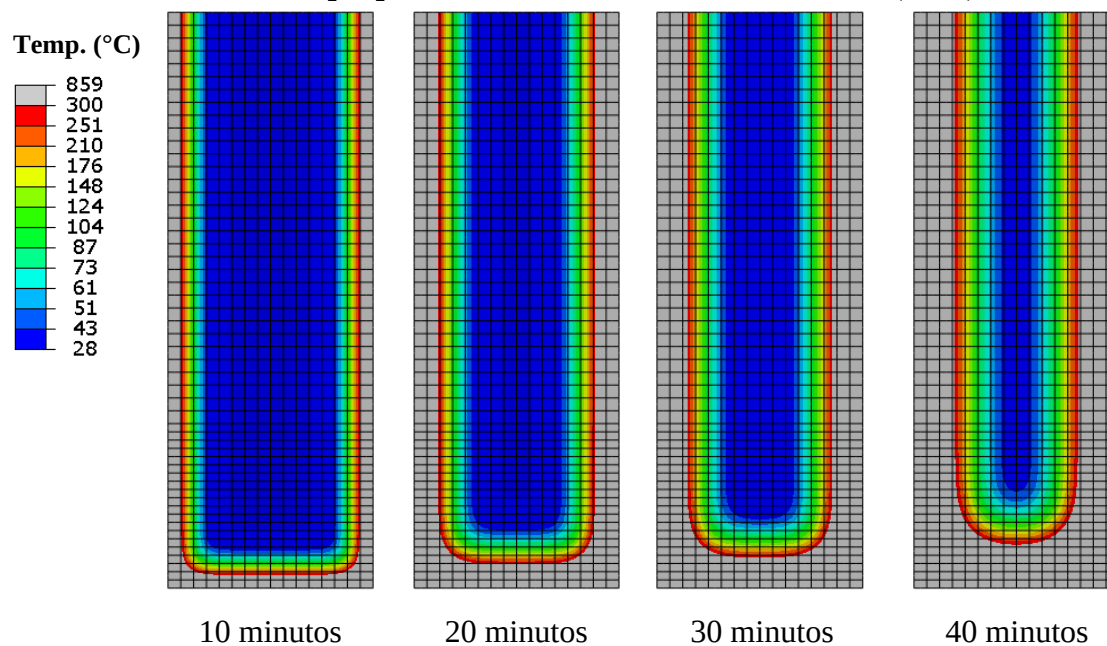
Fonte: Autor (2025)

Figura 4.9 – Evolução da carbonização e fluxo de calor no interior da seção de *Pinus* com base nas propriedades térmicas de Fernandes (2022)



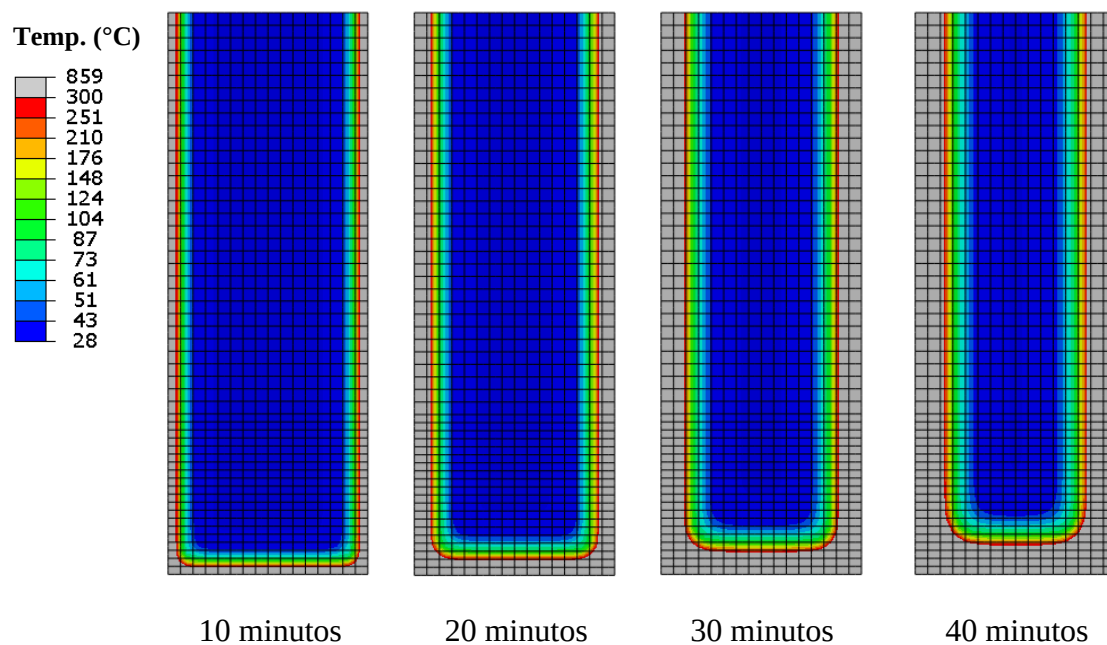
Fonte: Autor (2025)

Figura 4.10 – Evolução da carbonização e fluxo de calor no interior da seção de *Pinus* com base nas propriedades térmicas de Audebert *et al.* (2013)



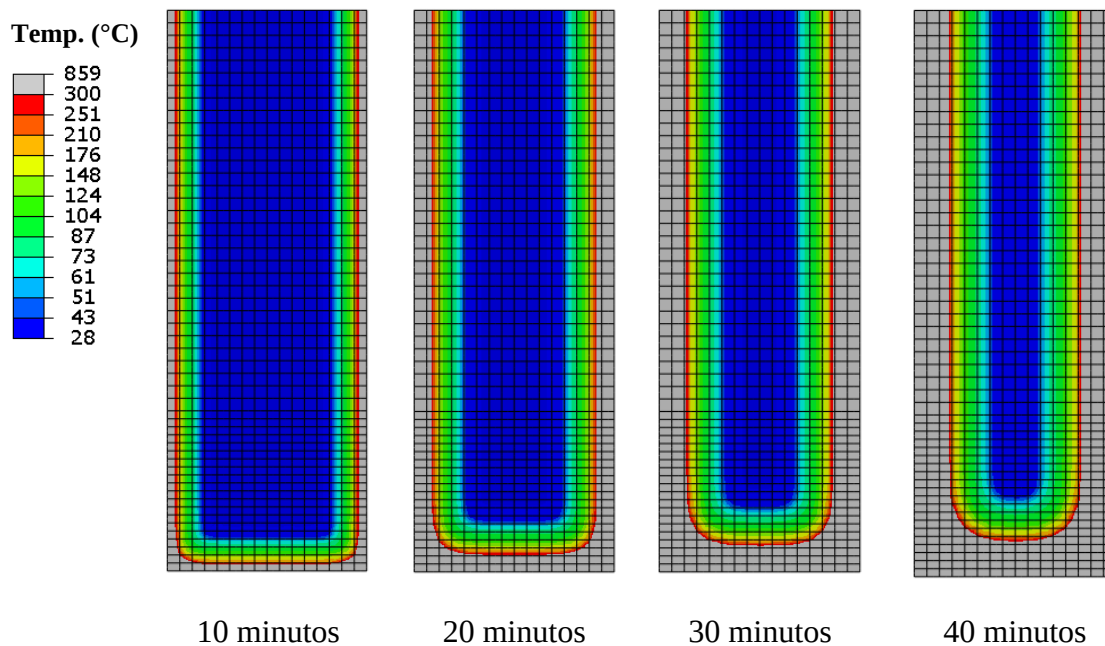
Fonte: Autor (2025)

Figura 4.11 – Evolução da carbonização e fluxo de calor no interior da seção de *Lyptus* com base nas propriedades térmicas da EN 1995-1-2:2004



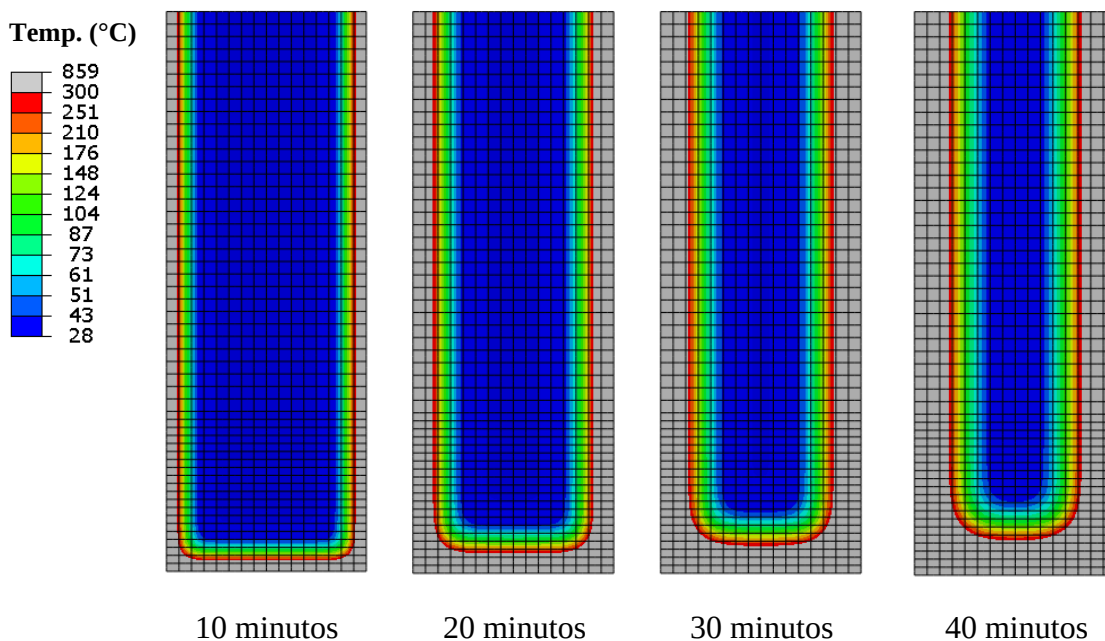
Fonte: Autor (2025)

Figura 4.12 – Evolução da carbonização e fluxo de calor no interior da seção de *Lyptus* com base nas propriedades térmicas de Fernandes (2022)



Fonte: Autor (2025)

Figura 4.13 – Evolução da carbonização e fluxo de calor no interior da seção de *Lyptus* com base nas propriedades térmicas de Audebert *et al.* (2013)

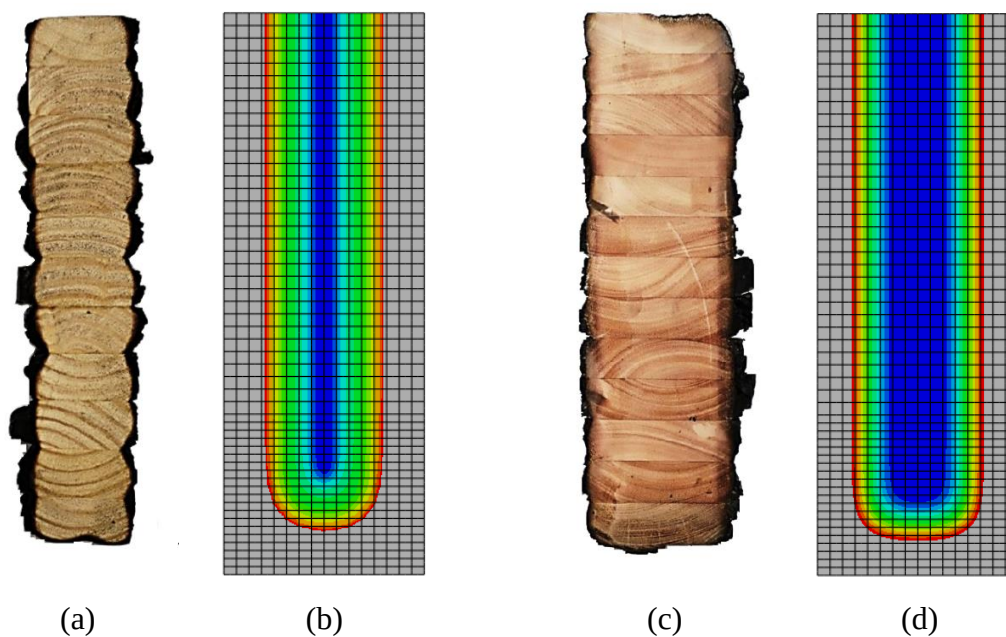


Fonte: Autor (2025)

Por meio das análises representadas nas Figura 4.8 a Figura 4.13, retirou-se as medidas de espessura carbonizada e seção transversal residual, apresentadas nas Tabela 4.3 e Tabela 4.4, para *Pinus* e *Lyptus*, respectivamente.

Em termos de seção residual, a proposta de Fernandes (2022) aproxima-se mais do experimental para o elemento de *Pinus* e, a proposta de Audebert *et al.* (2013) para o elemento de *Lyptus*. Na Figura 4.14 observa-se a comparação entre método experimental e método numérico com maior aproximação para cada uma das espécies. Nota-se que pelo modelo numérico é possível representar o efeito de arredondamento dos cantos que observa-se no ensaio experimental e a diferença que ocorre na espessura carbonizada entre as faces laterais e inferior, sendo a carbonização da face inferior maior do que nas faces laterais.

Figura 4.14 – Seção transversal residual: (a) e (b) *Pinus*; (c) e (d) *Lyptus*



Fonte: Autor (2025)

De acordo com as medidas de espessura carbonizada obtidas e apresentadas pelas Tabela 4.3 e Tabela 4.4, percebe-se que a espessura carbonizada para a face inferior é sempre mais elevada que a das faces laterais, para os métodos numéricos e experimental. O que não acontece ao se utilizar o método teórico, que apresenta os mesmos valores de espessura carbonizada para as faces laterais e inferior, por considerar valor constante para taxa de carbonização e sem distinção de face.

Tabela 4.3 – Espessura carbonizada e seção transversal residual da viga de *Pinus*

Método	Espessura Carbonizada (mm)		Seção Residual (mm)		Redução em relação ao momento de inércia (%)
	Face Lateral	Face Inferior	b	h	
Seção original	-	-	150	420	-
Experimental	37,1	44,8	75,8	375,2	63,97
Teórico (NBR 7190)	28,0	28,0	94,0	392,0	49,05
Numérico (EN 1995)	25,6	28,3	98,8	391,7	46,57
Numérico (Fernandes)	30,6	32,7	88,8	387,3	53,58
Numérico (Audebert)	30,0	31,8	90,0	388,2	52,62

Fonte: Autor (2025)

Tabela 4.4 – Espessura carbonizada e seção transversal residual da viga de *Lyptus*

Método	Espessura Carbonizada (mm)		Seção Residual (mm)		Redução em relação ao momento de inércia (%)
	Face Lateral	Face Inferior	b	h	
Seção original	-	-	150	420	-
Experimental	24,6	34,2	100,8	385,8	47,92
Teórico (NBR 7190)	22,0	22,0	106,0	398,0	39,87
Numérico (EN 1995)	21,5	21,6	107,0	398,4	39,12
Numérico (Fernandes)	26,0	26,4	98,0	393,6	46,23
Numérico (Audebert)	25,7	26,0	98,6	394,0	45,73

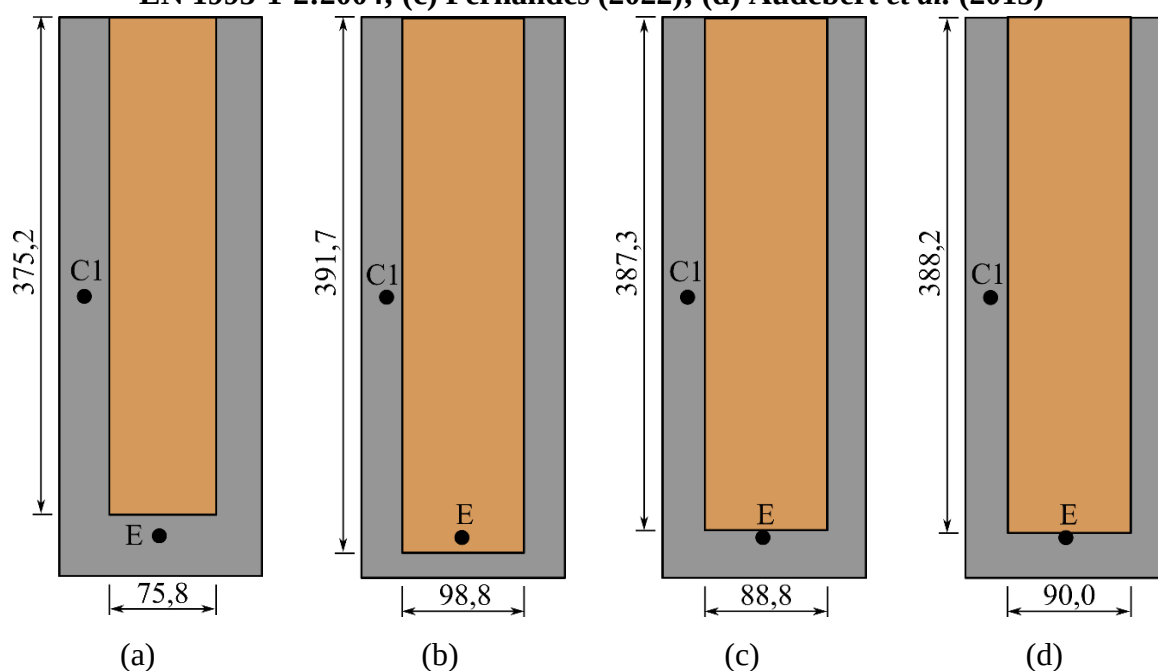
Fonte: Autor (2025)

Nas Tabela 4.3 e Tabela 4.4 apresenta-se a relação da redução do momento de inércia em relação à seção inicial de 150 mm x 420 mm, destacando a diferença de 16% entre os tipos de espécie (dados de ensaio). Bem como, observa-se que a seção residual obtida por meio das propriedades propostas por Fernandes (2022) e Audebert *et al.* (2013) aproximam-se mais da perda de seção obtida via ensaio experimental.

A Figura 4.15 mostra a seção residual e a camada carbonizada para o elemento de *Pinus* considerando as análises numéricas com propriedades de EN 1995-1-2:2004, Fernandes (2022) e Audebert *et al.* (2013), ilustrados pelas Figura 4.15 (b), (c) e (d) respectivamente, com a localização dos pontos de coleta de temperatura, em que é possível comparar a seção residual obtida pelo modelo térmico com a seção residual medida experimentalmente por Martins (2016) após a retirada da viga do forno, apresentada na Figura 4.15 (a). O mesmo é mostrado na Figura 4.16 para o espécime de *Lyptus*.

Percebe-se que para o elemento de *Pinus*, todas as análises numéricas são capazes de representar a carbonização do ponto C1 observado no modelo experimental (Figura 4.15 (a)). Entretanto, para o ponto E, apenas Fernandes (2022) e Audebert *et al.* (2013) conseguiram tal representação, o modelo numérico com a proposta da EN 1995-1-2:2004 apresentou, em geral, menores espessuras carbonizadas e não registrou carbonização no ponto E.

Figura 4.15 – Seção residual da viga de *Pinus*: (a) Experimental de Martins (2016); (b) EN 1995-1-2:2004; (c) Fernandes (2022); (d) Audebert *et al.* (2013)



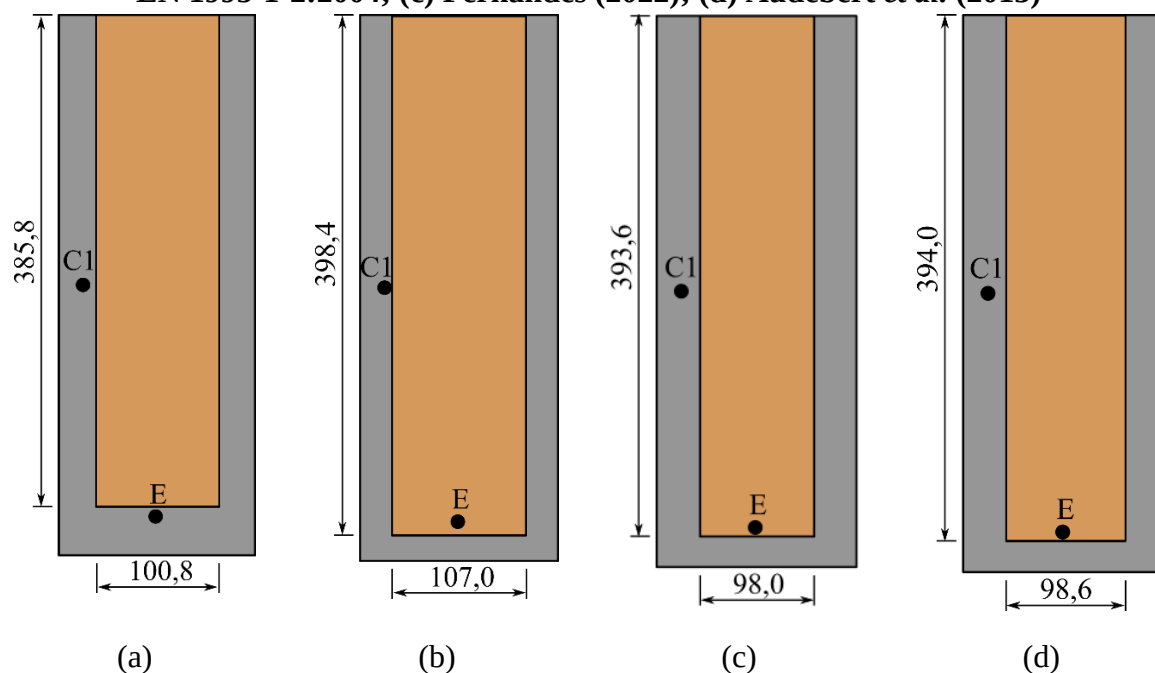
Fonte: Autor (2025)

Apesar da leitura nos termopares não terem registrado temperaturas maiores que 300°C, indicando carbonização, para os pontos estudados do elemento de *Lyptus* (Figura 4.3 e Figura 4.4), Martins (2016) encontrou carbonização no ponto através da medição da seção transversal residual da viga após a finalização do ensaio. A diferença ocorre porque os termopares medem a temperatura no exato momento em que o forno é desligado. No entanto, mesmo nos poucos minutos que se seguem, enquanto a viga é removida do forno e as chamas residuais são extintas, o processo de queima continua. Sendo assim, o resultado observado por meio da seção transversal residual diferente dos dados de leitura do termopar pode ser justificado por essa interferência.

Para a viga de *Lyptus*, os modelos numéricos registraram carbonização para o ponto C1, de forma análoga ao experimental, mas nenhum modelo representou a linha de carbonização

do ponto E. Quando comparadas com as seções residuais de *Pinus*, nota-se que os elementos de *Lyptus* mantém uma maior seção intacta.

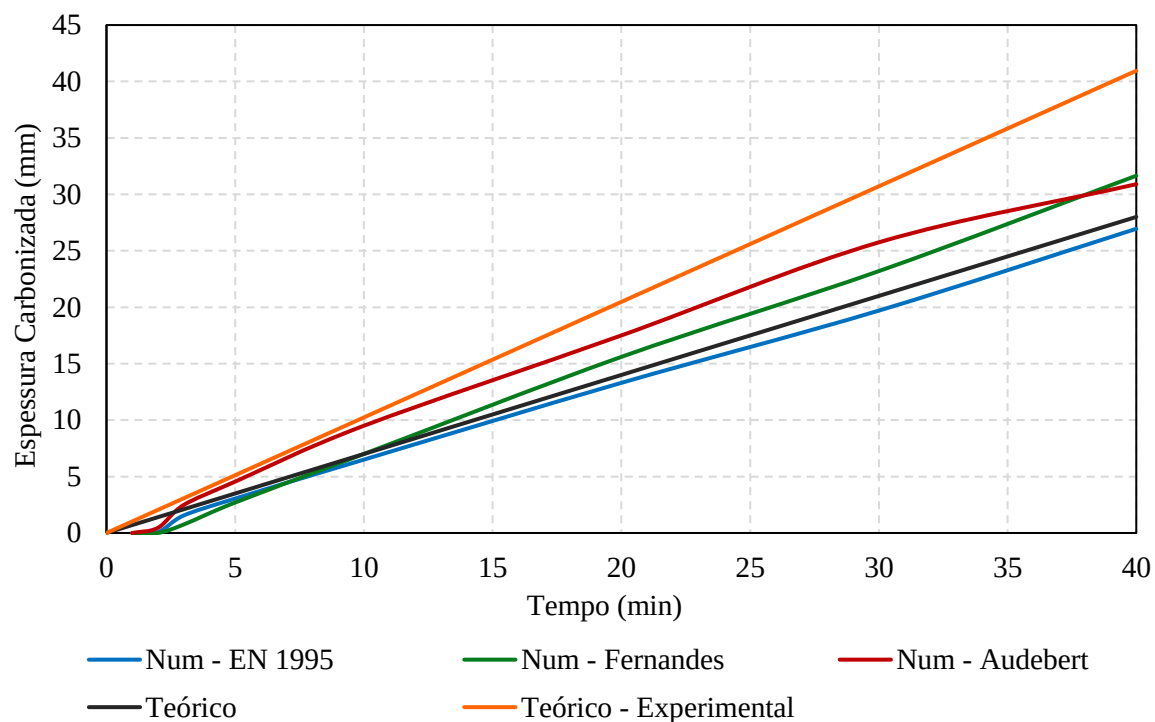
Figura 4.16 – Seção residual da viga de *Lyptus*: (a) Experimental de Martins (2016); (b) EN 1995-1-2:2004; (c) Fernandes (2022); (d) Audebert *et al.* (2013)



Fonte: Autor (2025)

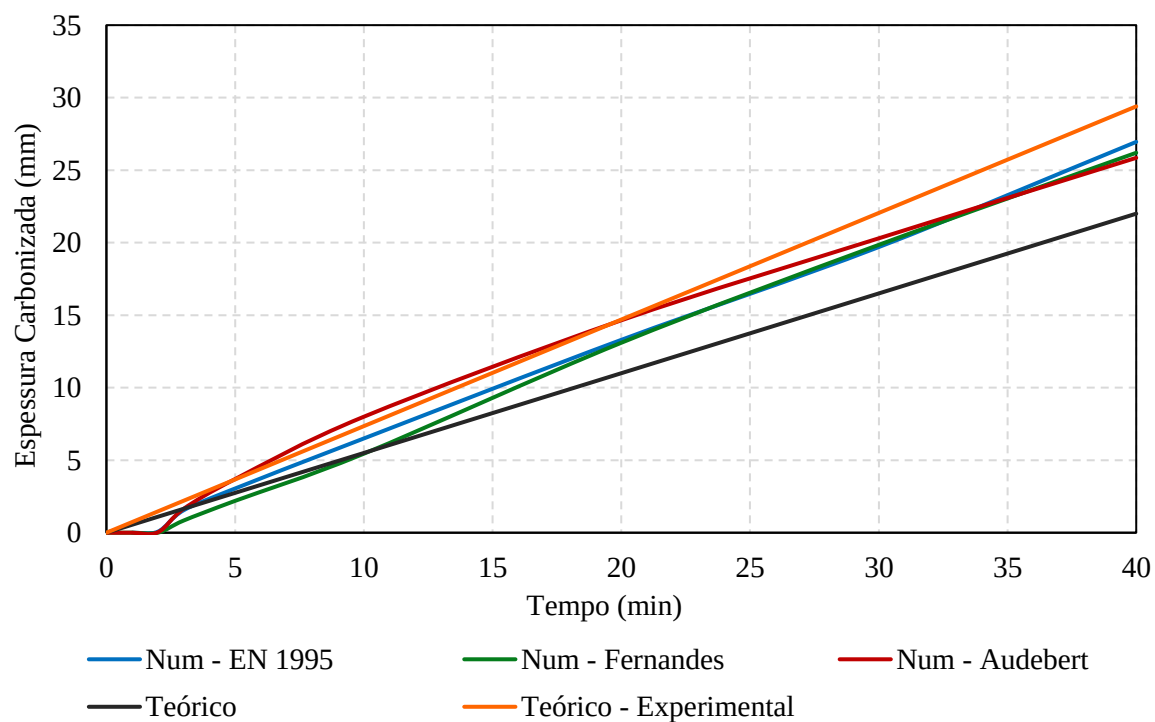
Nas Figura 4.17 e Figura 4.18 mostra-se a evolução do avanço da carbonização, para as vigas de *Pinus* e de *Lyptus* respectivamente, considerando os métodos simplificado e avançado de dimensionamento propostos pelas normas ABNT NBR 7190-1:2022 e EN 1995-1-2:2004. Destaca-se que, pelo método simplificado a evolução da carbonização é inferior ao que foi encontrado com os dados obtidos nos ensaios experimentais de Martins (2016), o que indica que é necessário um estudo mais aprofundado da taxa de carbonização proposta em norma para a aplicação do método com o uso de madeiras nacionais. No trabalho desenvolvido por Martins (2016) a determinação de taxa de carbonização não era o objetivo principal do ensaio, e as dimensões dos elementos utilizados dificultam a precisão dos dados para esta finalidade, sendo assim, os dados servem para uma estimativa e análise do comportamento de carbonização destas espécies.

Figura 4.17 – Evolução temporal da espessura carbonizada da viga de *Pinus*



Fonte: Autor (2025)

Figura 4.18 - Evolução temporal da espessura carbonizada da viga de *Lyptus*



Fonte: Autor (2025)

4.1.3 Principais considerações

A partir dos modelos numéricos é possível representar a seção residual obtida no ensaio experimental, conseguindo demonstrar a distinção entre as espessuras carbonizadas para as faces laterais e inferior, além da representação do arredondamento dos cantos da seção residual, o que não ocorre pelo modelo teórico. Enquanto o método simplificado normativo assume uma taxa de carbonização constante e uniforme, as análises numéricas, corroboradas pelos dados experimentais, mostraram que a perda de seção na face inferior é sempre mais elevada do que nas faces laterais. Essa capacidade do modelo numérico em capturar a geometria da seção residual e o arredondamento dos cantos representa um avanço significativo em relação aos métodos teóricos.

No que se refere à representação das curvas de propriedades térmicas, o estudo demonstrou que a escolha da curva é um fator determinante para a precisão do modelo numérico. Para o *Pinus*, a proposta de Fernandes (2022) apresentou a melhor correlação com os dados experimentais de Martins (2016), o que pode ser atribuído à calibração específica dessa curva com base nos resultados obtidos no ensaio. Curiosamente, para o *Lyptus*, a curva proposta pela EN 1995-1-2:2004, embora desenvolvida para madeiras coníferas, foi a que melhor representou o comportamento térmico. Essa observação reforça a ressalva da própria norma, que destaca a necessidade de ajuste dos valores de propriedades térmicas para uma representação mais precisa do comportamento térmico da madeira.

Este estudo reforça a necessidade da realização de mais pesquisas sobre os valores de propriedades térmicas e determinação de taxas de carbonização para madeiras de espécies brasileiras, tanto coníferas quanto folhosas. A notável diferença de comportamento entre o *Pinus* e o *Lyptus*, observada no avanço do fluxo de calor e na taxa de carbonização, demonstra a influência direta das características de cada espécie.

4.2 AUDEBERT ET AL. (2013)

Considerando os dados do trabalho desenvolvido por Audebert *et al.* (2013) foram desenvolvidas análises termoestruturais tridimensionais.

4.2.1 Análise mecânica em temperatura ambiente

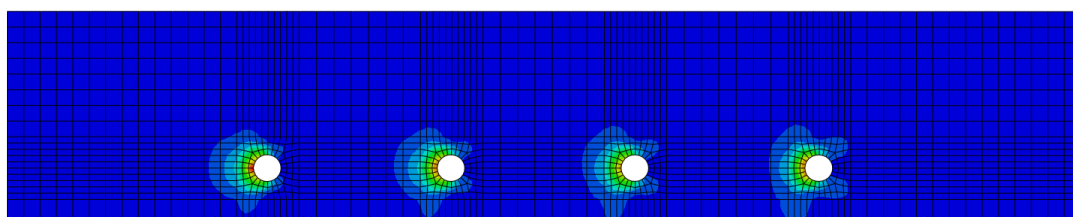
Conforme relatado em Audebert *et al.* (2013), primeiramente foram realizados ensaios das ligações madeira-madeira, conectadas por dispositivos metálicos, submetidas à esforços de tração paralelo às fibras. Para o tipo de ligação analisado neste trabalho, a carga de ruptura obtida no ensaio experimental foi de 269,4 kN, e o modo de falha percebido foi a ruptura por cisalhamento da fileira de conectores.

Além disso, é possível notar, pela Figura 4.19 (a) que houve embutimento dos pinos na madeira, o que foi representado também pela análise numérica, conforme Figura 4.19 (b), podendo ser visualizado pela variação das cores no entorno dos furos.

Figura 4.19 – Modos de ruptura: (a) Ensaio experimental; (b) Análise numérica



(a)



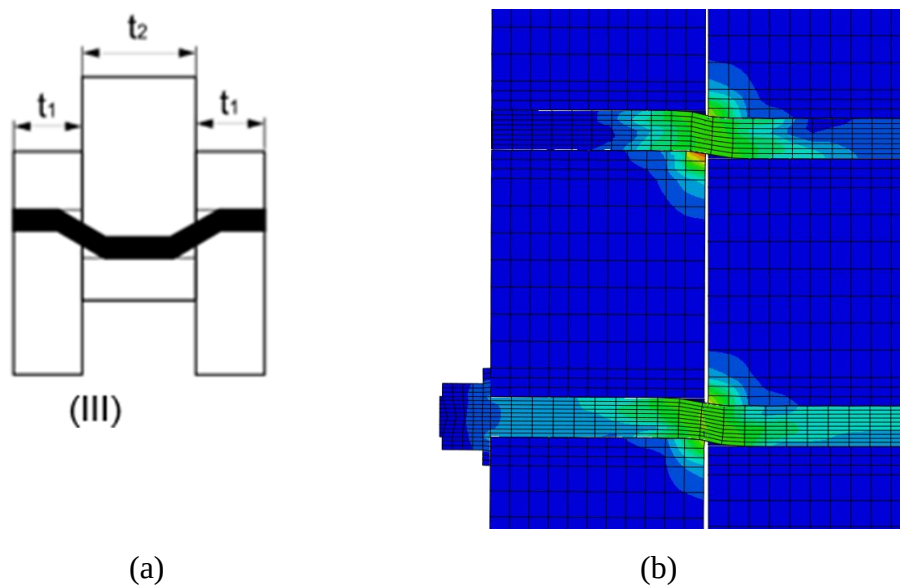
(b)

Fonte: Autor (2025)

Ao aplicar o método teórico de cálculo prescrito pela ABNT NBR 7190-1:2022 para compreender o modo de ruptura da ligação com duas seções de corte, verifica-se a ocorrência do modo de falha (III), ilustrado pela Figura 4.20 (a). Neste modo, a ruptura ocorre nos conectores (pinos e parafusos, neste caso) que sofrem uma deformação plástica no plano da ligação, formando uma rótula plástica em cada seção de cisalhamento. Este comportamento

também foi observado no modelo numérico, a Figura 4.20 (b) representa um recorte da ligação onde é possível perceber a plastificação dos conectores na seção de cisalhamento. Vale lembrar que o modelo numérico representa um quarto da ligação, por isso na imagem vê-se apenas uma seção de cisalhamento.

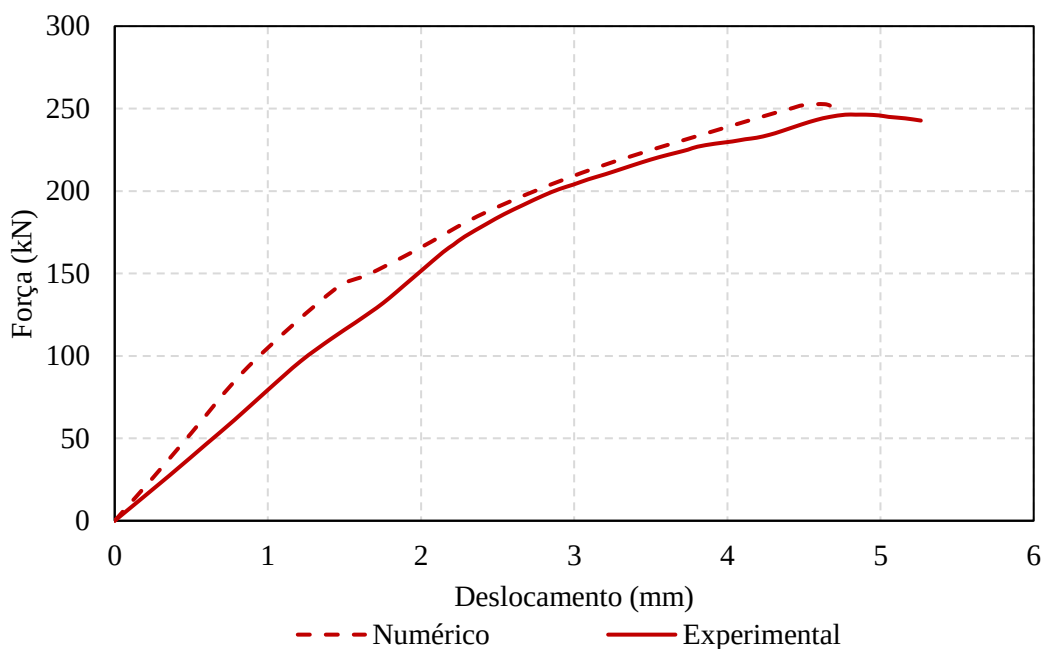
Figura 4.20 – Plastificação dos conectores metálicos: (a) Representação da norma; (b) Análise numérica



Fonte: Autor (2025)

A Figura 4.21 apresenta a curva de carga-deslocamento obtida pelo modelo numérico e faz o comparativo com a curva obtida no ensaio experimental em temperatura ambiente, com o objetivo de validar o modelo numérico proposto. De modo geral, observa-se uma boa concordância entre as curvas, sobretudo no que diz respeito à forma global do comportamento carga-deslocamento.

Figura 4.21 – Curvas carga-deslocamento da análise mecânica em temperatura ambiente



Fonte: Autor (2025)

Em relação à rigidez inicial, o modelo numérico proposto apresenta um comportamento ligeiramente mais rígido que o observado experimentalmente. Tal discrepância pode estar associada à ausência de imperfeições geométricas ou variações nas propriedades dos materiais que ocorrem naturalmente nos ensaios experimentais e que não foram consideradas na modelagem numérica.

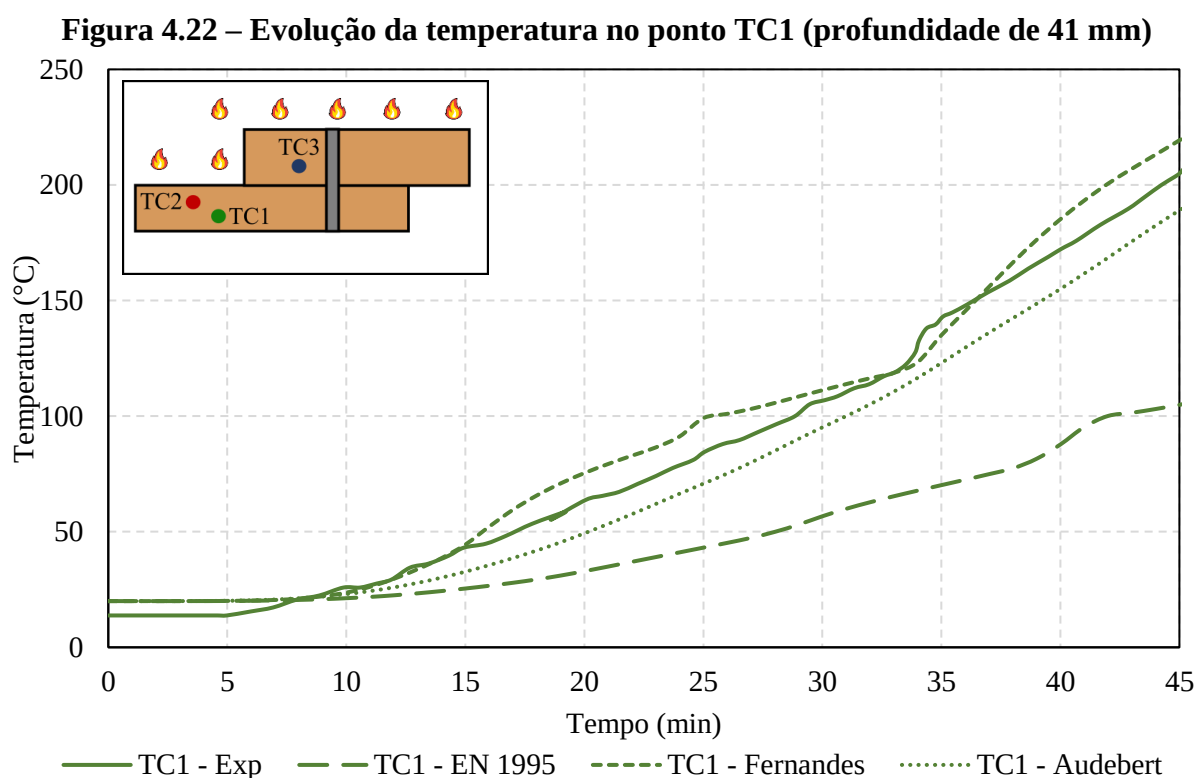
A partir de 150 kN as curvas passam a se aproximar mais significativamente, indicando que a partir desse nível de carregamento, o modelo numérico reproduz de maneira mais realista o comportamento não linear da ligação. Ressalta-se que, mesmo com diferenças na rigidez inicial, a carga última estimada numericamente é muito próxima da carga máxima observada experimentalmente, evidenciando a capacidade do modelo de prever adequadamente a resistência da ligação. A ruptura no modelo numérico ocorre quando o deslocamento atinge 4,60 mm, enquanto que a ruptura no ensaio experimental ocorreu com um deslocamento de 4,75 mm.

Além disso, no geral a curva numérica acompanha satisfatoriamente a tendência da curva experimental, tanto na fase elástica quanto na fase pós-pico, sugerindo que os mecanismos de falha foram representados de maneira coerente.

4.2.2 Estudo das propriedades térmicas

De forma análoga ao realizado para os modelos de Martins (2016), realizou-se o estudo das propriedades térmicas visando a aplicabilidade das propriedades dos valores de condutividade térmica, calor específico e a relação densidade por densidade seca propostos pela EN 1995-1-2:2004, Audebert *et al.* (2013) e Fernandes (2022) em um modelo, considerando ligação metálica na estrutura de madeira.

Foram registradas as temperaturas em três pontos distintos na madeira, sendo o ponto TC1 localizado a 41 mm da face exposta ao fogo, o ponto TC2 a 26 mm e o ponto TC3 a 64 mm, conforme ilustrado na Figura 3.6 em 3.2.2. A Figura 4.22 apresenta a evolução da temperatura no ponto TC1, nota-se que os resultados obtidos a partir das propostas de Audebert *et al.* (2013) e de Fernandes (2022) apresentam boas correlações com os dados obtidos experimentalmente, demonstrando uma tendência de elevação de temperatura semelhante ao experimental.



Pela proposta de Audebert *et al.* (2013) têm-se que as temperaturas, após os 10 minutos iniciais, marcam aproximadamente 15°C a menos em relação ao experimental durante o restante do ensaio, registrando 190°C aos 45 minutos, o que representa uma diferença de 9,5% em comparação com os 210°C obtidos no ensaio experimental.

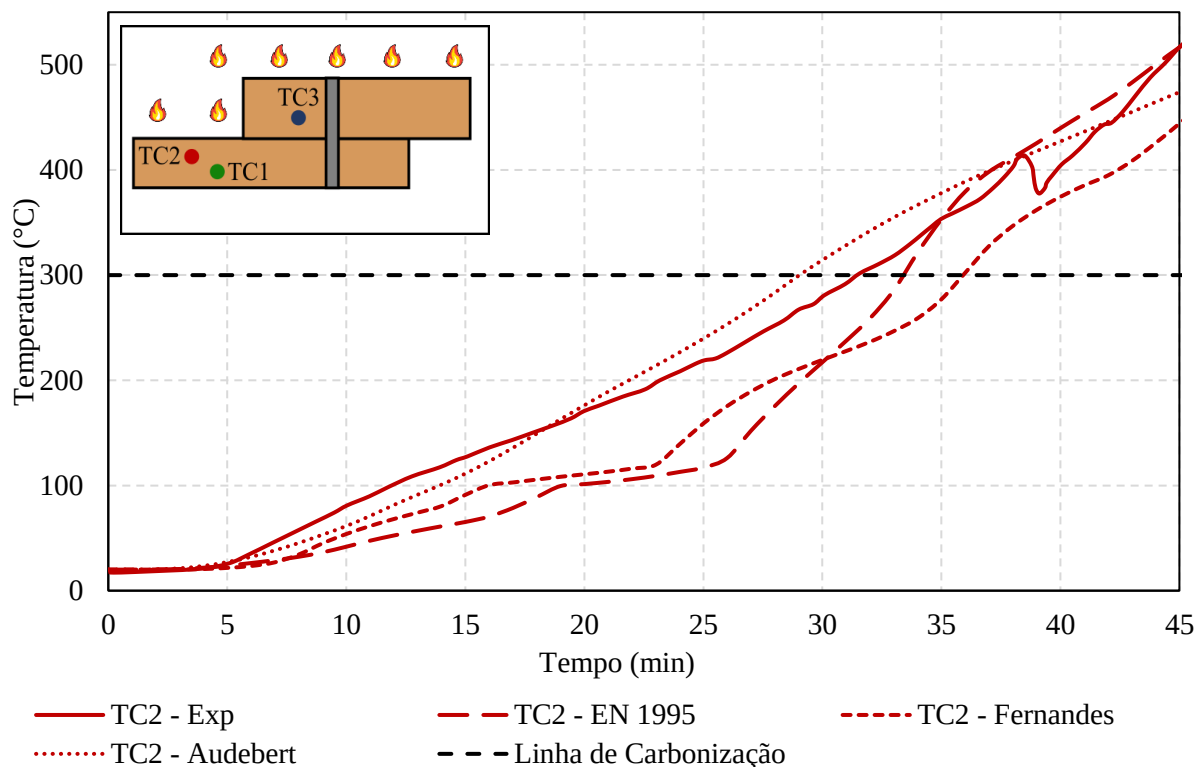
Na proposta de Fernandes (2022), a curva de elevação de temperatura apresentou algumas variações durante a análise, alternando entre temperaturas ora superiores ora inferiores em relação às temperaturas experimentais. Durante os 15 minutos iniciais o comportamento foi semelhante ao experimental, entre 15 e 33 minutos a proposta de Fernandes (2022) superou levemente as temperaturas. Observa-se que, aos 33 minutos, no ensaio experimental houve um aumento repentino na temperatura, mas estabilizou-se aos 35 minutos e voltou a apresentar a mesma tendência de crescimento anterior. Dos 33 aos 37 minutos, a proposta de Fernandes (2022) foi superada pelo experimental, mas voltou a crescer e, no fim da análise, registrou temperatura de 220°C, apenas 10°C acima do encontrado no ensaio experimental, representando uma diferença de 4,8%.

A análise considerando as propriedades da EN 1995-1-2:2004 aproximou-se do experimental durante os 10 minutos iniciais de exposição e, posteriormente, distanciou-se demonstrando valores cada vez menores. Atingindo temperatura final de, aproximadamente 100°C, abaixo dos 200°C obtido no ensaio experimental, ficando 50% abaixo da temperatura registrada no ensaio, revelando-se uma proposta não muito representativa para o ponto localizado a 41 mm da face exposta ao fogo.

O ponto TC1, distante 41 mm da face exposta ao fogo, não apresentou indícios de carbonização (temperaturas acima de 300°C).

A evolução da temperatura no ponto TC2 é ilustrada na Figura 4.23, percebe-se temperaturas mais altas em relação ao ponto anterior, visto que o ponto TC2 está situado a uma distância menor da face exposta ao fogo, distante 26 mm. Todas as propostas demonstram, em geral, uma boa correlação com os dados do ensaio experimental, sendo a proposta de Audebert *et al.* (2013) a mais satisfatória para representar o comportamento deste ponto. Nela é possível observar que a temperatura oscila superando ou declinando em relação à curva do ensaio experimental, mas sempre se mantém muito próxima a esta. No final da análise, a temperatura registrada é de 474°C, 8,3% inferior aos 517°C obtidos via ensaio experimental.

Figura 4.23 – Evolução da temperatura no ponto TC2 (profundidade de 26 mm)



Fonte: Autor (2025)

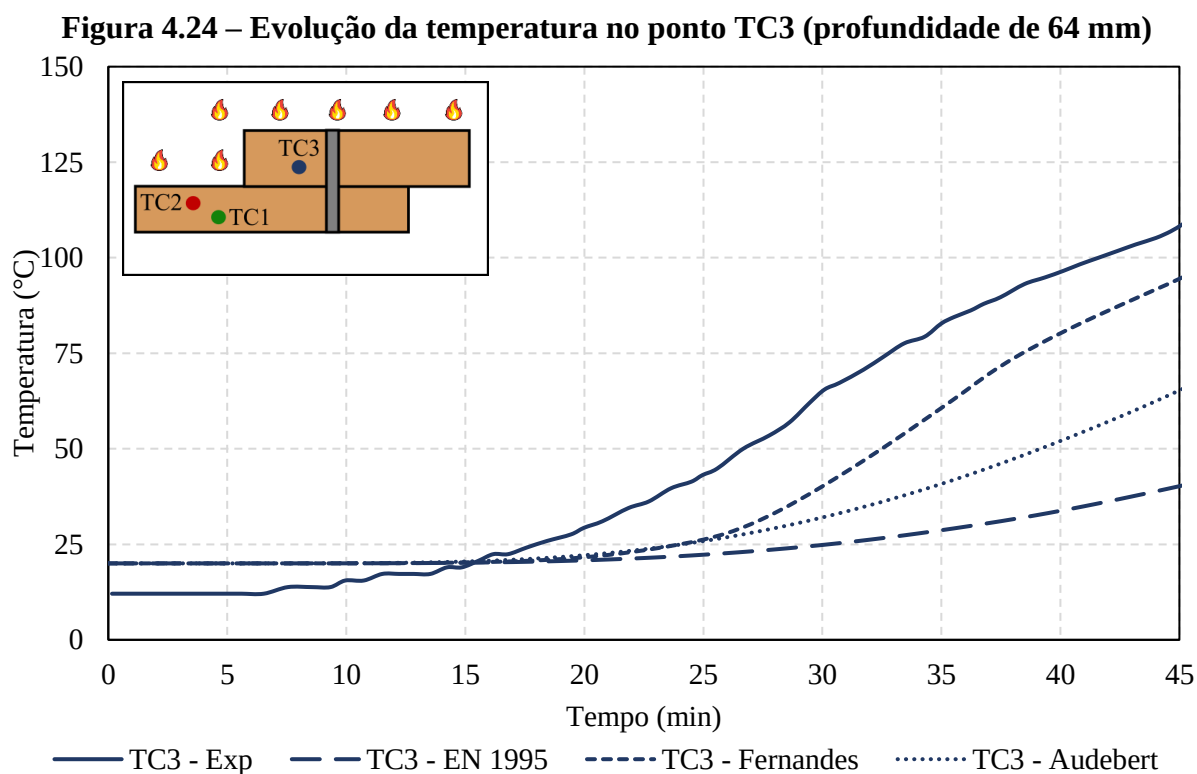
A proposta de Fernandes (2022) apresenta valores inferiores em comparação com o experimental, mas segue a mesma tendência de elevação de temperatura. Demonstra um comportamento satisfatório durante os 5 primeiros minutos, dos 5 aos 16 minutos apresenta uma tendência de elevação de temperatura semelhante à curva experimental, embora registre temperaturas inferiores. Entre 16 e 23 minutos, a elevação torna-se mais gradual, distanciando do comportamento experimental e registrando a maior diferença de temperatura, sendo de 76°C aos 23 minutos. No entanto, a partir daí a curva volta a elevar de forma semelhante ao experimental, registrando 444°C aos 45 minutos, inferior em 73°C e indicando diferença de 14% em comparação com o resultado do ensaio experimental.

Inicialmente, a curva obtida com a proposta de propriedades da EN 1995-1-2:2004 é a que mais se distancia do experimental, subestimando as temperaturas obtidas no ensaio. Apresenta comportamento semelhante nos 5 minutos iniciais, mas com tendência de crescimento mais suave até os 26 minutos, chegando a registrar uma diferença de temperatura de 100°C nesse instante. Entretanto, a partir dos 26 minutos, a curva passa a apresentar uma elevação pronunciada, alcançando e superando as temperaturas obtidas experimentalmente aos

35 minutos. Dos 35 minutos até o final assemelha-se ao comportamento experimental e registram, aos 45 minutos, temperaturas iguais a 517°C.

O ponto TC2 apresentou evidências de carbonização, ou seja, a temperatura ultrapassou os 300°C. Pela proposta de Audebert *et al.* (2013), o ponto TC2 atingiu a carbonização aos 29 minutos, enquanto, nos registros do ensaio experimental, ocorreu após 31 minutos. Nas demais propostas o fluxo de calor é mais lento no ponto TC2 até o início da carbonização, todavia, após o início da carbonização observa-se que o fluxo de calor aumenta com as curvas propostas pela EN 1995-1-2:2004, que pode ser entendida como o comportamento do carvão sob as condições das propriedades térmicas, visto que a EN 1995-1-2:2004 apresenta variação nas propriedades térmicas considerando o aumento da temperatura tanto para a madeira, quanto para o carvão, que é a madeira que já passou pelo processo de carbonização.

A Figura 4.24 apresenta a evolução da temperatura para o ponto TC3 que, por ser um ponto mais interno (localizado a 64 mm da face exposta ao fogo), registrou temperaturas mais baixas em relação aos outros pontos analisados, sem registro de carbonização da madeira. Percebe-se, pela Figura 4.24, que todas as análises com diferentes propostas subestimaram as temperaturas do ensaio experimental após os 15 minutos de ensaio.



A proposta de Fernandes (2022), ainda que não atinja as temperaturas do ensaio experimental, apresenta a melhor correlação de tendência de crescimento da temperatura, registrando ao final da análise, temperaturas 15°C mais baixas, diferindo em 13,6% da temperatura obtida experimentalmente, de 110°C.

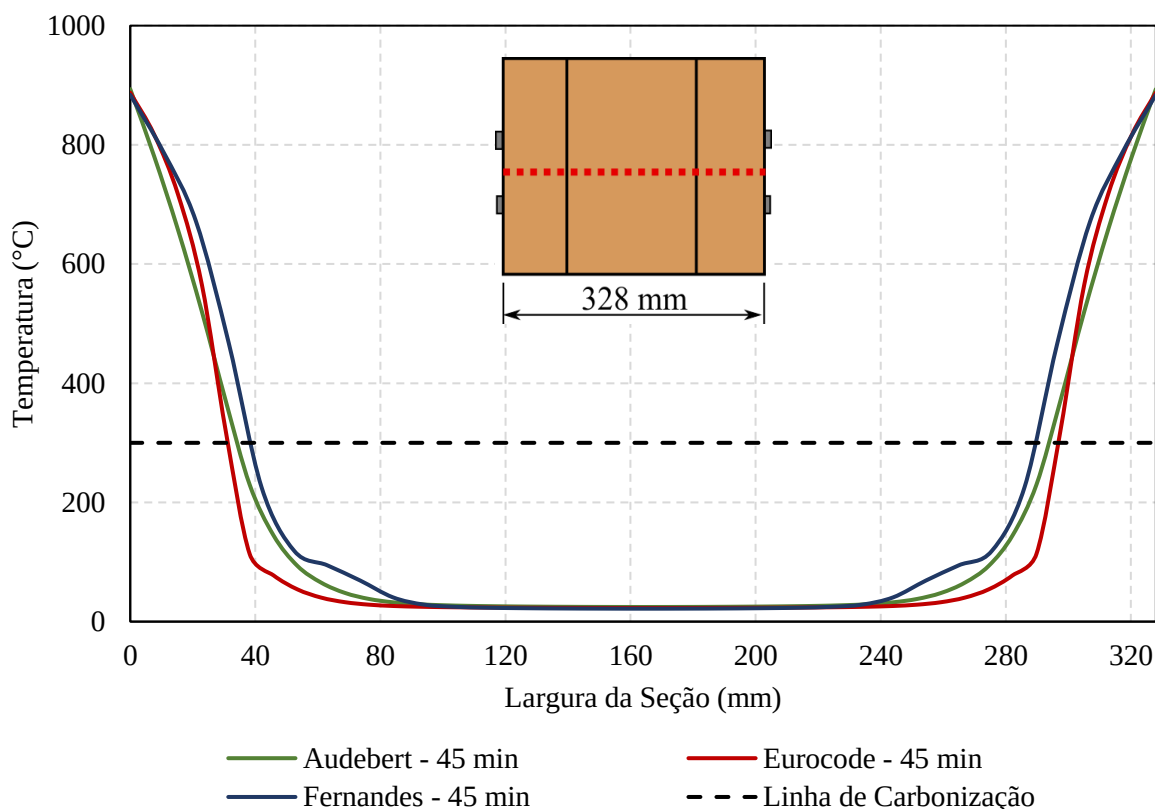
A proposta de Audebert *et al.* (2013) assemelha-se a de Fernandes (2022) até os 25 minutos de análise, porém, a partir daí apresenta um crescimento de temperatura mais suave e difere-se do comportamento experimental. No final do ensaio, a proposta de Audebert *et al.* (2013) para o ponto TC3, registra uma temperatura de 65°C, inferior em 45°C (41%) quando comparada com os 110°C obtidos no ensaio experimental.

A curva de crescimento da temperatura considerando os dados de propriedades da EN 1995-1-2:2004 apresenta um comportamento muito mais gradual, sem conseguir representar a elevação da temperatura do ensaio experimental. Apresenta uma diferença em torno de 70°C ao final da exposição em relação ao registro no ensaio experimental, cerca de 63,6%, sendo a mais discrepante das propostas para este ponto mais interno.

É esperado que a proposta de Audebert *et al.* (2013) se assemelhe ao ensaio experimental neste caso, visto que os valores de condutividade térmica e de calor específico propostos por Audebert *et al.* (2013) foram selecionados, a partir de uma análise de sensibilidade com valores de diferentes autores, de forma a representar a transferência de calor no interior desta ligação em específico. Entretanto, observa-se para o ponto mais externo (TC2) e para o ponto mais interno (TC3) diferenças de temperatura de 43°C e 45°C, respectivamente. Para o ponto TC1 essa diferença foi menor, de apenas 10°C.

A Figura 4.25 ilustra a distribuição de temperatura ao longo da largura da seção transversal da peça de madeira após 45 minutos de exposição ao fogo, considerando as três propostas analisadas: EN 1995-1-2:2004, Audebert *et al.* (2013) e Fernandes (2022). A linha tracejada preta representa a temperatura de 300 °C, adotada como critério para a definição da profundidade de carbonização da madeira.

Figura 4.25 – Variação da temperatura ao longo da seção transversal



Observa-se que, em todas as abordagens, as maiores temperaturas ocorrem nas regiões mais externas da seção, diretamente expostas à ação térmica, enquanto o núcleo central permanece com temperaturas significativamente inferiores, demonstrando o efeito isolante da camada superficial carbonizada. Este comportamento é coerente com o esperado para a madeira, cuja baixa condutividade térmica retarda a propagação do calor para o interior do elemento.

O modelo baseado na EN 1995-1-2:2004 resulta na menor profundidade de carbonização, sugerindo um comportamento mais conservador quanto ao avanço do aquecimento para o núcleo da peça. A proposta de Audebert *et al.* (2013) apresenta resultados intermediários entre os dois. Essas diferenças evidenciam como cada abordagem representa de maneira distinta a propagação do calor para o interior da seção, refletindo variações importantes na estimativa da extensão da zona carbonizada após 45 minutos de exposição.

4.2.3 Determinação da seção transversal residual

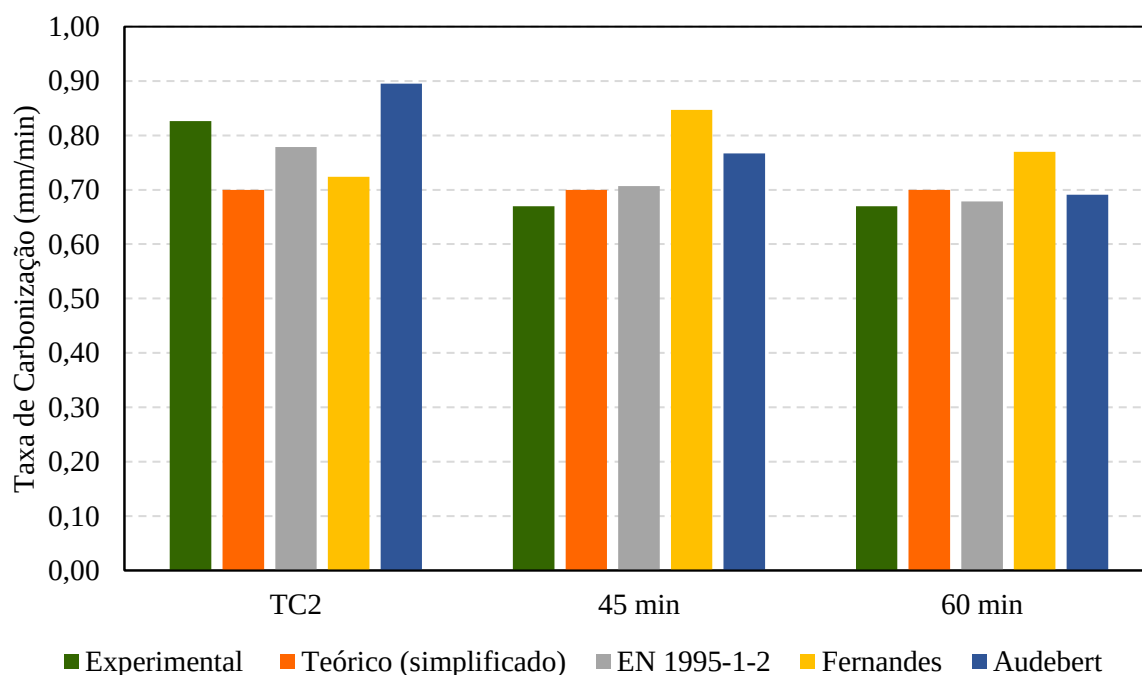
Dos pontos avaliados, TC2 foi o único a apresentar carbonização devido a profundidade que está localizado ser mais superficial. Na Tabela 4.5 e na Figura 4.26 observam-se as taxas de carbonização calculadas via ensaio experimental, método teórico simplificado e análises numéricas considerando as três propostas na profundidade do ponto TC2, no tempo de 45 minutos e no tempo de 60 minutos.

Tabela 4.5 – Taxas de carbonização no ponto TC2 e em 45 e 60 minutos

Método	TC2 ($e_{carb} = 26 \text{ mm}$)		45 minutos	60 minutos
	Tempo (min)	β (mm/min)	β (mm/min)	β (mm/min)
Experimental	31,47	0,83	0,67	0,67
Teórico (NBR 7190)	37,14	0,70	0,70	0,70
Numérico (EN 1995)	33,40	0,78	0,71	0,68
Numérico (Fernandes)	35,91	0,72	0,85	0,77
Numérico (Audebert)	29,04	0,90	0,77	0,69

Fonte: Autor (2025)

Figura 4.26 – Taxas de carbonização no ponto TC2, em 45 minutos e em 60 minutos



Fonte: Autor (2025)

A taxa de carbonização de 0,83 mm/min obtida pelo método experimental no ponto TC2 foi calculada considerando os dados mostrados no gráfico de temperatura *versus* tempo apresentado por Audebert *et al.* (2013). De acordo com Audebert *et al.* (2013), a taxa de carbonização medida no final do ensaio experimental (entre 40 e 79 minutos) foi de, aproximadamente, 0,67 mm/min, mostrando o declínio esperado da taxa com o passar do tempo devido a formação de carvão que retarda o aumento da taxa de carbonização.

Para o caso do método teórico, a aplicação do método simplificado foi utilizada para determinar o tempo necessário para que o ponto especificado inicie o processo de carbonização. Para isso, aplica-se as equações para determinação da espessura carbonizada, mas definindo o tempo como incógnita. Está sendo considerada a taxa de carbonização nominal, e os valores da taxa são constantes e tabelados (ABNT NBR 7190-1:2022). Com isso, calculou-se o tempo em que ocorreria a carbonização, sendo de 37,14 minutos, mostrando-se um tempo mais elevado que o registrado no experimental e nos métodos numéricos. A taxa de carbonização é constante para o método teórico, não sendo possível analisar diferenças com o aumento da duração de exposição ao fogo.

Com relação aos métodos numéricos, o que mais se aproxima dos resultados experimentais é o modelo numérico com o uso das propriedades térmicas propostas por Fernandes (2022), que apresentou taxas de 0,78 mm/min aos 45 minutos e 0,77 mm/min aos 60 minutos, próximas das obtidas experimentalmente (0,83 mm/min e 0,67 mm/min, respectivamente). Além da boa proximidade numérica, o modelo de Fernandes (2022) reproduz a tendência de redução da taxa de carbonização com o tempo, que pode ser associada a camada de carvão atuando como isolante térmico e retardando o avanço do fluxo do calor para o interior da seção.

O modelo com aplicação das propriedades térmicas propostas na norma EN 1995-1-2:2004 também demonstrou bom desempenho, com valores de 0,79 mm/min aos 45 minutos e 0,73 mm/min aos 60 minutos. Apesar de levemente mais conservador que o experimental aos 60 minutos, este modelo é amplamente utilizado em dimensionamentos por fornecer estimativas seguras e fundamentadas em ensaios padronizados.

Por sua vez, o modelo numérico com as propriedades térmicas de Audebert *et al.* (2013) apresentou as menores taxas de carbonização entre os modelos numéricos, com 0,77 mm/min aos 45 minutos e 0,69 mm/min aos 60 minutos. Embora siga a tendência de redução ao longo do tempo, seus valores se afastam mais dos dados experimentais.

De maneira geral, todos os modelos numéricos analisados representaram a variação da taxa de carbonização ao longo do tempo, diferentemente do modelo teórico simplificado. No entanto, o modelo de Fernandes (2022) se destacou pela maior proximidade com os dados experimentais, tanto em valores absolutos quanto na reprodução do comportamento térmico observado, revelando-se, portanto, o mais representativo para a simulação das condições analisadas.

Na Tabela 4.5 e na Figura 4.26, o método de Audebert *et al.* indicou a maior taxa de carbonização considerando o ponto TC2, sendo de 0,90 mm/min, refletindo um avanço mais rápido da frente de carbonização em relação aos métodos de dimensionamento teóricos.

A Tabela 4.6 apresenta as espessuras carbonizadas e as seções residuais transversais obtidas por cada método após 45 minutos de exposição ao fogo. Ressalta-se que os autores não informaram as espessuras carbonizadas medidas via método experimental, então elas foram calculadas de acordo com a taxa de carbonização fornecida para o tempo de 45 minutos (considerado como final do ensaio) resultando em uma espessura carbonizada de 30,15 mm, sendo considerada em todas as faces, no sentido da largura e da altura. O método experimental apresentou uma redução de 63,80% no momento de inércia se comparado com a seção original.

Tabela 4.6 – Espessura carbonizada e seção transversal residual

Método	Espessura Carbonizada (mm)		Seção Residual (mm)		Redução em relação ao momento de inércia (%)
	Faces Laterais	Face Inf/Sup	b	h	
Seção original	-	-	328,0	254,0	-
Experimental	30,15	30,15	267,7	193,7	63,80
Teórico (NBR 7190)	31,5	31,5	265,0	191,0	65,65
Numérico (EN 1995)	31,3	32,3	265,4	189,4	66,45
Numérico (Fernandes)	38,8	37,4	250,4	179,1	73,19
Numérico (Audebert)	34,4	34,7	259,2	184,6	69,66

Fonte: Autor (2025)

O modelo teórico simplificado estimou espessuras ligeiramente superiores (31,5 mm), resultando em uma redução de 65,65%, o que representa uma superestimação moderada da perda de seção. Apesar de não considerar efeitos térmicos complexos, o modelo fornece uma aproximação razoável para situações onde não se dispõe de recursos computacionais mais avançados.

O modelo numérico baseado na EN 1995-1-2:2004 apresentou valores próximos ao teórico, com espessuras carbonizadas de 31,3 mm e 32,3 mm, e uma redução de 66,45% no momento de inércia. Essa semelhança entre os dois métodos é esperada, uma vez que o modelo normativo se baseia em abordagens simplificadas e conservadoras, voltadas para a segurança estrutural.

O modelo de Fernandes (2022) apresentou as maiores espessuras carbonizadas (38,8 mm e 37,4 mm) e, conseqüentemente, as menores dimensões residuais da seção: 250,4 mm (b) e 179,1 mm (h). Essa redução resultou na maior perda de momento de inércia entre todos os métodos analisados: 73,19%, evidenciando que este modelo prevê um avanço térmico mais agressivo, em concordância com os resultados da Tabela 4.5, que apontaram maiores taxas de carbonização para esse método.

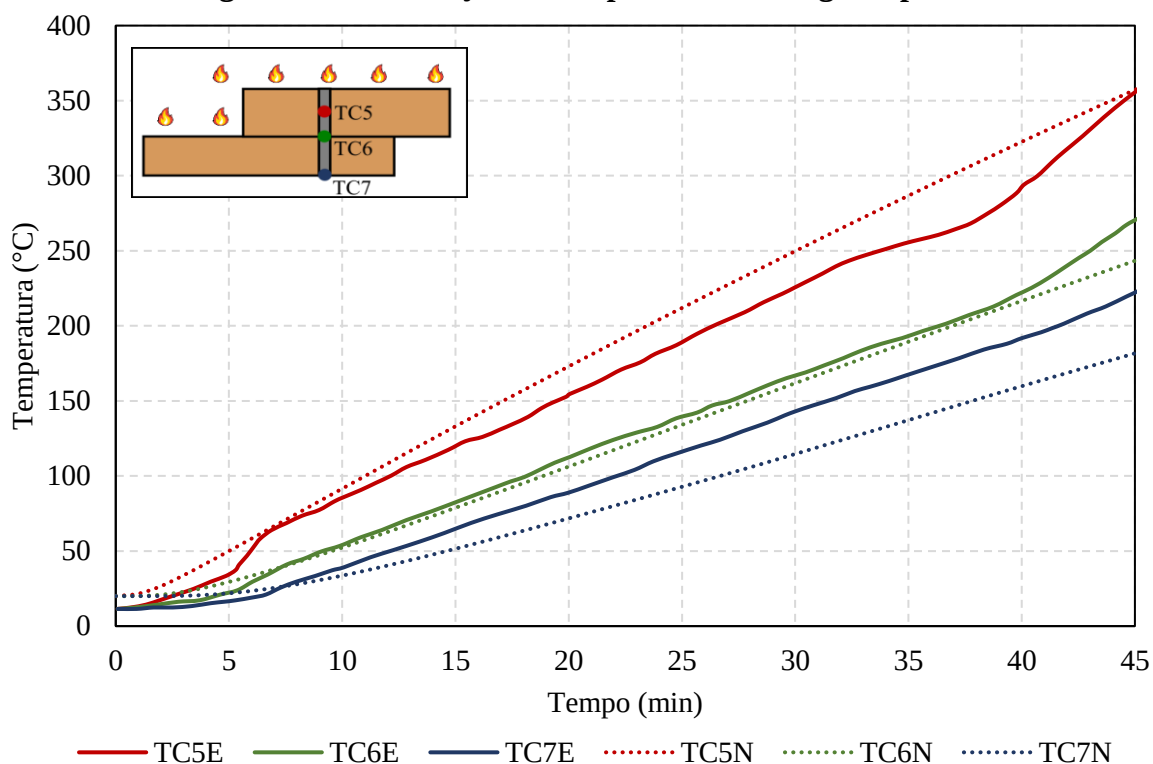
O modelo de Audebert *et al.* (2013) também estimou valores superiores ao experimental, com espessuras de 34,4 mm e 34,7 mm, resultando em uma redução de 69,66% no momento de inércia. Embora menos conservador que o modelo de Fernandes (2022), seus resultados ainda indicam perdas estruturais mais significativas do que as observadas experimentalmente.

Comparando todos os métodos ao experimental, observa-se que os modelos numéricos tendem a superestimar a profundidade carbonizada, especialmente o de Fernandes (2022). Apesar disso, esses modelos conseguem representar de maneira mais realista a geometria degradada da seção em situação de incêndio, quando comparados aos modelos teóricos simplificados.

4.2.4 Comportamento térmico da ligação

Os pontos TC5, TC6 e TC7 são leituras dos termopares posicionados no pino e a sua evolução da temperatura é apresentada na Figura 4.27. Os resultados demonstram boa correlação entre pontos TC5 e TC6, apresentando uma pequena divergência entre os dados após 40 minutos de exposição. O ponto TC7N apresentou comportamento semelhante ao experimental nos primeiros 10 minutos de exposição ao fogo, após esse período os dados divergiram, demonstrando uma queda no registro da temperatura, ainda assim, segue a tendência de elevação de temperatura experimental.

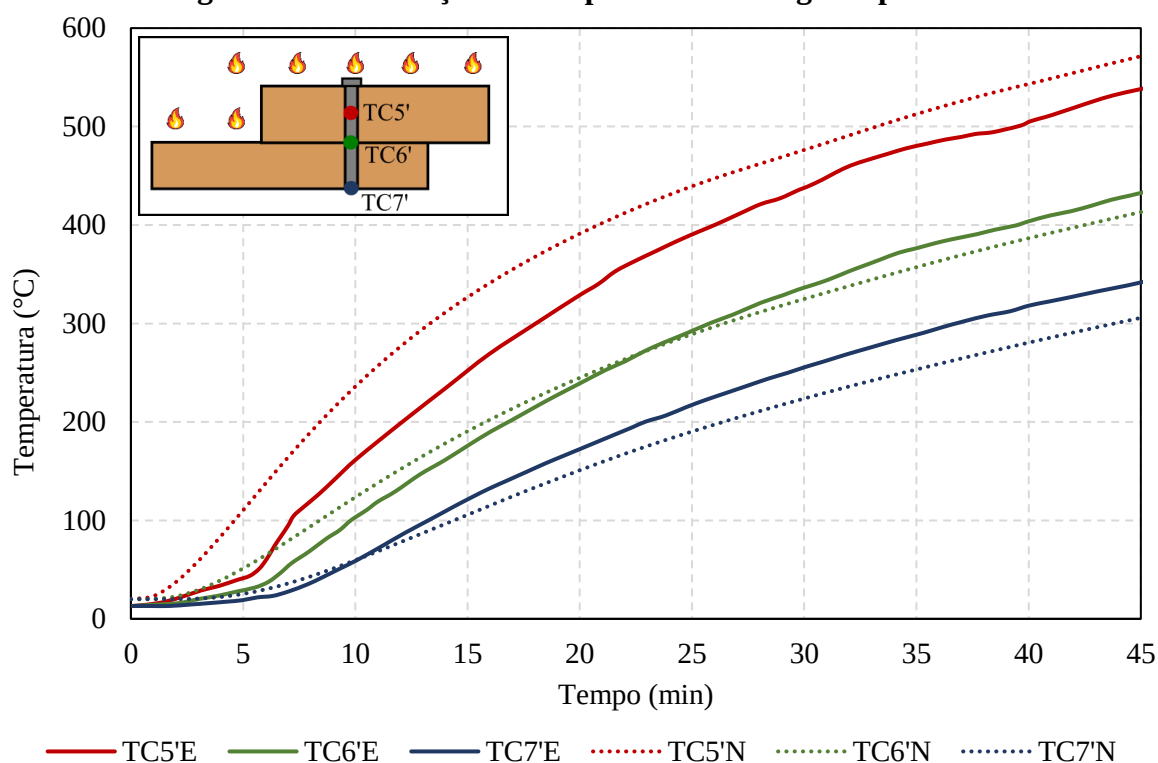
Figura 4.27 – Evolução da temperatura ao longo do pino



Fonte: Autor (2025)

Os pontos TC5', TC6' e TC7' são as leituras dos termopares posicionados no parafuso, a evolução da temperatura é mostrada na Figura 4.28. O ponto TC5'N, durante toda a análise, apresentou um pequeno aumento de temperatura com relação ao experimental. O ponto TC7'N, após 10 minutos de exposição ao fogo, passou a apresentar uma ligeira queda na temperatura, mas em geral, as avaliações numérica e experimental apresentaram boa correlação para todos os pontos, sendo os dados obtidos numericamente representativos.

Figura 4.28 – Evolução da temperatura ao longo do parafuso

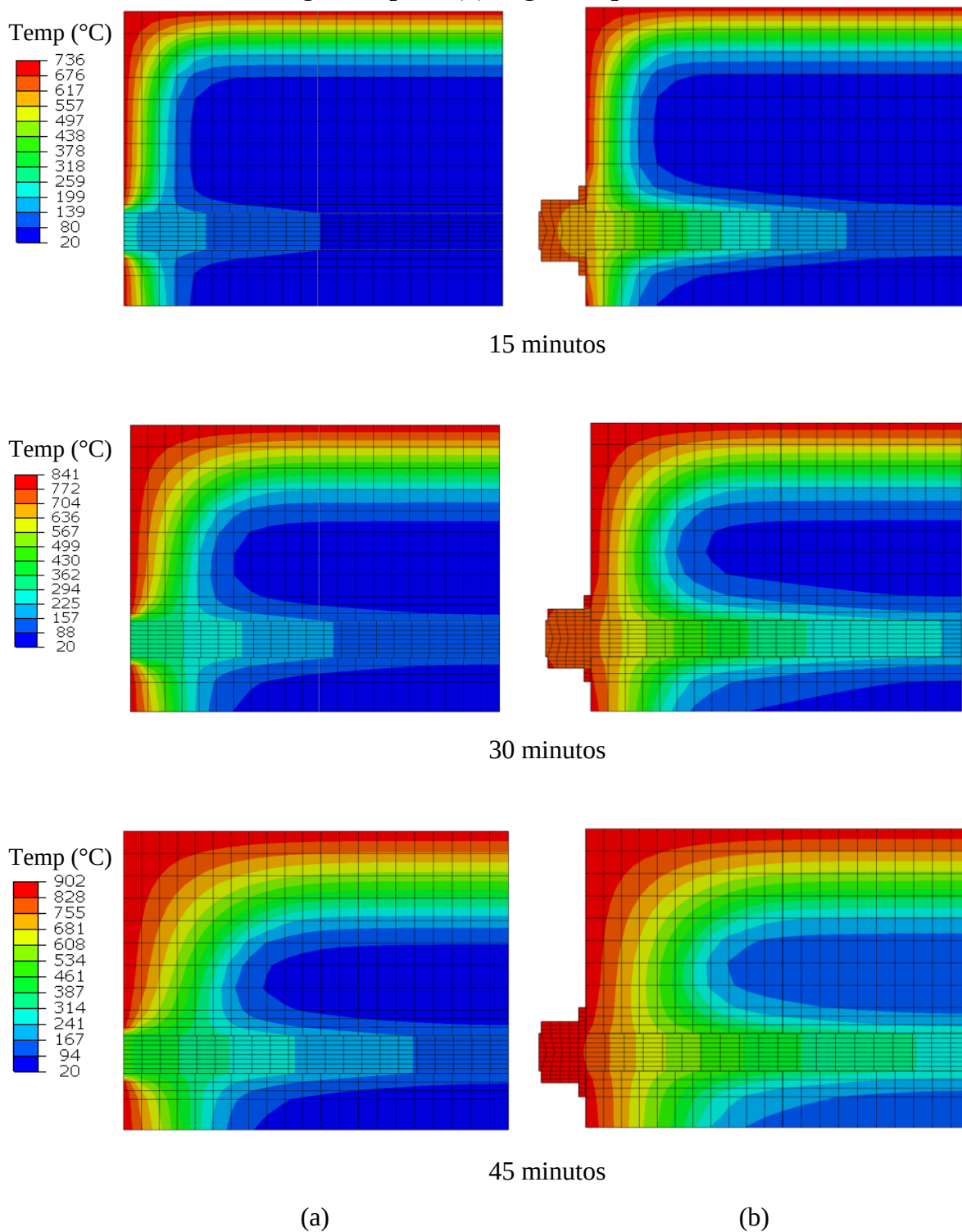


Fonte: Autor (2025)

Embora os pinos e o parafuso sejam compostos pelo mesmo tipo de aço e possuam o mesmo diâmetro, ao comparar as Figura 4.27 e Figura 4.28, percebe-se as temperaturas mais elevadas registradas ao longo do parafuso.

A Figura 4.29 ilustra a evolução da temperatura na seção transversal do pino e do parafuso, onde nota-se novamente o maior aquecimento na região do parafuso desde o início da exposição. Esse comportamento pode ser justificado pelo fato de o parafuso possuir uma cabeça, composta por uma porca e uma arruela, que ficam expostas ao aquecimento externo. Essa maior área de contato exposta ao fogo e posição externa a madeira contribui para um aquecimento mais rápido do parafuso e, conseqüentemente, para o aumento do fluxo de calor no interior da conexão devido à alta condutividade do aço, como mencionado por Almeida (2012).

Figura 4.29 – Perfis de temperatura para diferentes tempos de exposição ao fogo na: (a) Região do pino; (b) Região do parafuso

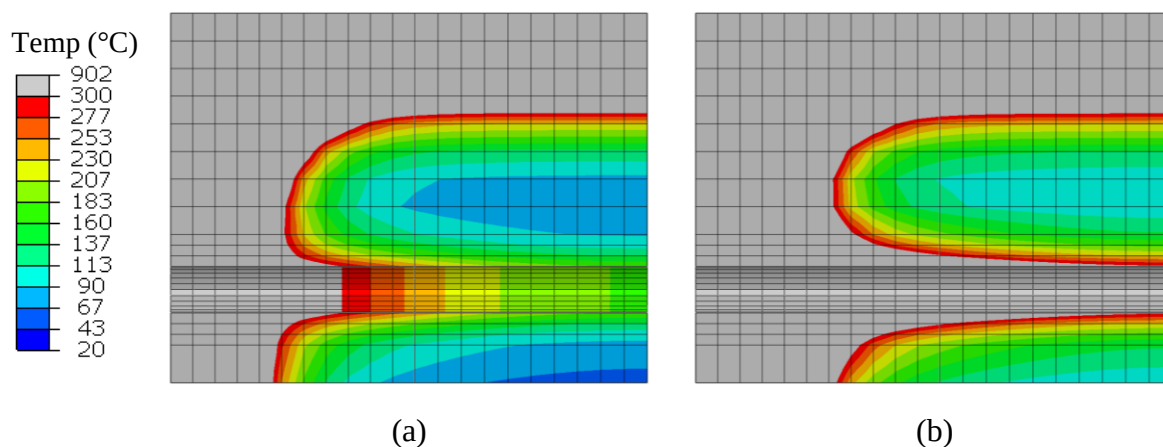


Fonte: Autor (2025)

Nas Figura 4.30 e Figura 4.31 estão representados os perfis de temperatura na madeira na seção transversal do pino (a) e do parafuso (b) aos 45 minutos de exposição, com a cor cinza

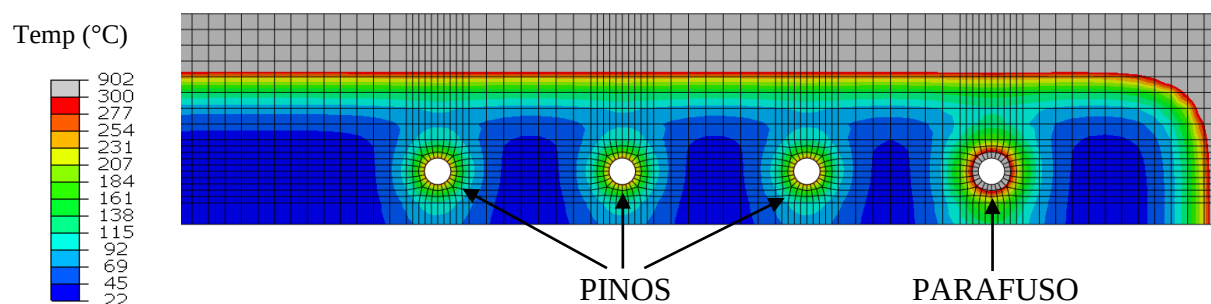
representando a área carbonizada (temperatura acima de 300°C). A Figura 4.31 também ilustra a carbonização da madeira aos 45 minutos, representando o perfil de temperatura na região da interface dos elementos de madeira, nela o furo na extrema direita é o furo do parafuso, enquanto os outros são os furos dos pinos. É possível observar a maior degradação térmica da madeira em torno do parafuso, isso acontece devido a cabeça do parafuso como já abordado anteriormente.

Figura 4.30 – Carbonização da madeira aos 45 minutos na: (a) Região do pino; (b) Região do parafuso



Fonte: Autor (2025)

Figura 4.31 – Carbonização da madeira na interface dos elementos de madeira aos 45 minutos de exposição



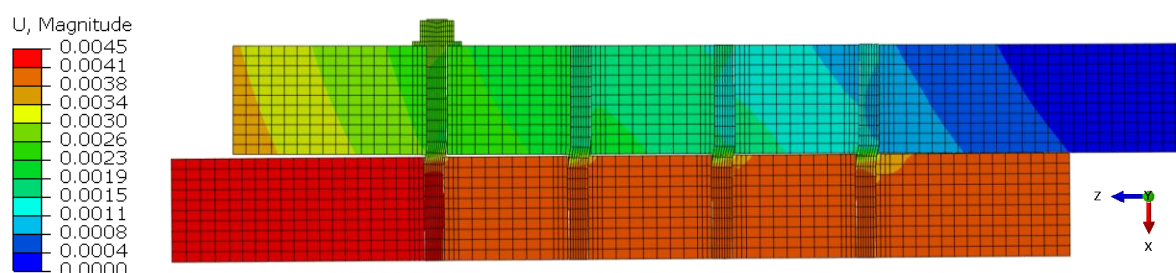
Fonte: Autor (2025)

4.2.5 Comportamento termoestrutural

A análise termoestrutural foi elaborada a partir da análise mecânica com adição da fase de aquecimento da ligação. Como observado em 4.2.1, ao se impor um deslocamento de 10 mm, a ligação alcançou a falha quando atingiu um deslocamento de 4,6 mm. A fim de poder aplicar o aquecimento no modelo termoestrutural, o deslocamento imposto inicialmente foi definido em 4,5 mm, evitando assim a ruptura antes da aplicação da temperatura.

Ao final da análise, os deslocamentos observados são apresentados na Figura 4.32, nota-se que o deslocamento máximo manteve-se em 4,5 mm, não registrando aumento após a exposição ao fogo. A região em azul manteve-se sem grandes deslocamentos pois representa a região fixa do apoio. Também se percebeu um afastamento entre os elementos (central e lateral) de madeira na região mais próxima a aplicação do deslocamento.

Figura 4.32 – Deslocamento na região dos conectores. Medidas em metros.



Fonte: Autor (2025)

Na Tabela 4.7 são apresentados os tempos de falha da ligação em situação de incêndio obtidos para a análise numérica ($t_{fi,num}$), ensaio experimental ($t_{fi,exp}$) e calculadas de acordo com o método teórico simplificado ($t_{d,fi}$) proposto pela EN 1995-1-2:2004.

Tabela 4.7 – Tempos de falha da ligação em situação de incêndio

Carga (%)	$t_{fi,num}$ (min)	$t_{fi,exp}$ (min)	$t_{d,fi}$ (min)
10	-	79	66,6
30	-	54	39,2

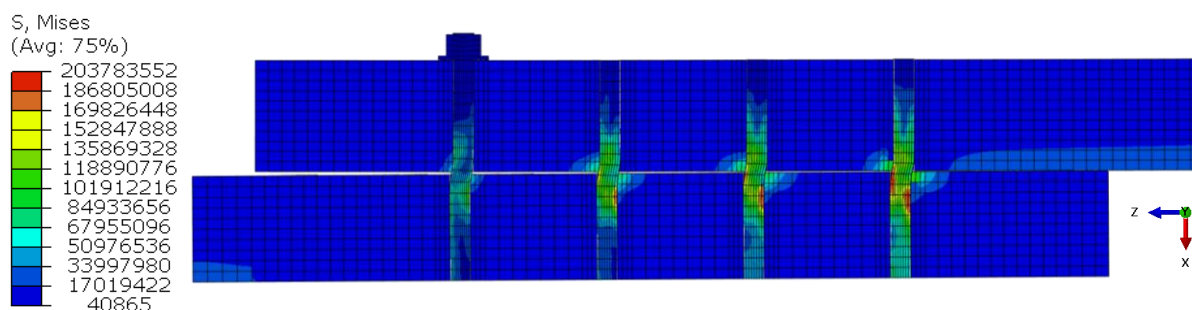
Fonte: Autor (2025)

A análise numérica termoestrutural não apresentou ruptura durante o período avaliado, motivo pelo qual não foram registrados valores de $t_{fi,num}$. Como essa etapa depende do arquivo

de resultados térmicos gerado anteriormente, limitado a 60 minutos, o tempo total da análise termomecânica também ficou restrito a esse intervalo. Ao longo dos 60 minutos analisados, não foram observadas deformações excessivas que levassem à ruptura da ligação, embora seja possível que esta pudesse ocorrer em um tempo posterior.

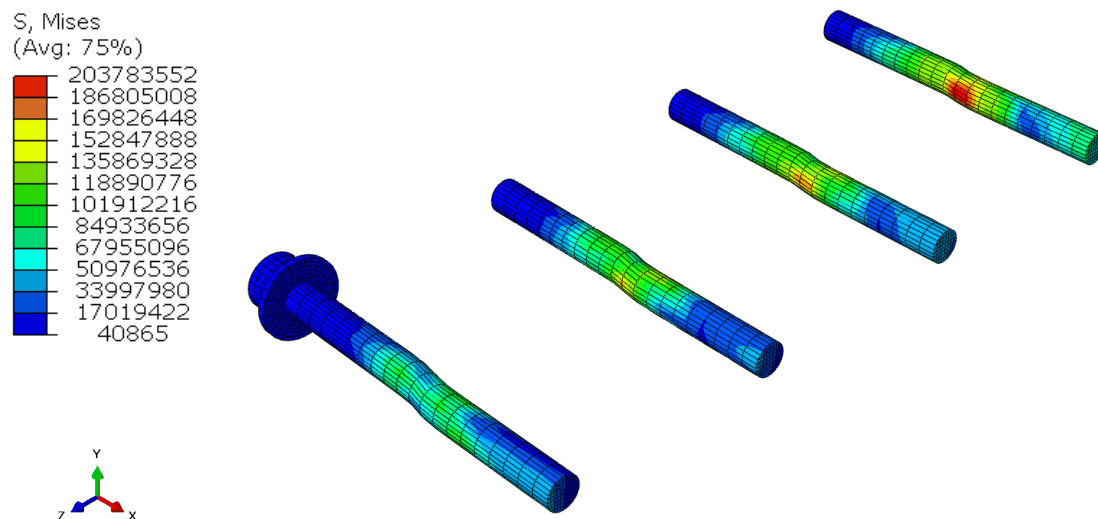
Ainda que não tenha atingido o colapso completo e mantido o processamento até 60 minutos, a análise termomecânica conseguiu captar deformações nos conectores, que indicam a sua plastificação, como ilustrado pela Figura 4.33, e com mais detalhes pela Figura 4.34. As maiores tensões ocorreram no pino mais distante da aplicação do deslocamento.

Figura 4.33 – Tensões na região dos conectores. Medidas em Pa.



Fonte: Autor (2025)

Figura 4.34 – Tensão nos pinos e parafuso. Medidas em Pa.



Fonte: Autor (2025)

4.2.6 Principais considerações

O modelo numérico representou adequadamente o comportamento plástico da madeira na análise mecânica em temperatura ambiente. A resposta numérica reproduziu bem o modo de falha por cisalhamento da fileira de conectores, com formação de rótulas plásticas nos elementos metálicos, e apresentou boa concordância com os resultados experimentais em termos de carga última.

No estudo das propriedades térmicas da madeira, com relação à evolução da temperatura em diferentes pontos na madeira, a proposta de Fernandes (2022) resultou em um aumento de temperatura mais acentuado após 25 minutos em todos os pontos analisados. Esse comportamento esteve mais próximo dos resultados experimentais, principalmente nos pontos intermediários e internos, demonstrando maior precisão na simulação do aquecimento da madeira ao longo do tempo.

Enquanto a proposta da norma EN 1995-1-2:2004 apresentou bom desempenho no ponto onde ocorreu carbonização da madeira. Pode ser que, devido à norma apresentar valores aparentes das propriedades de condutividade que não são medidos diretamente no carvão, mas que consideram o aumento da transferência de calor devido à fissuração por retração acima de 500°C, houve uma representação mais realista nesta fase do material.

Além disso, considerando que no trabalho de Audebert *et al.* (2013) provavelmente foi utilizada a mesma espécie de madeira usada nos testes que dão embasamento para a EN 1995-1-2:2004, percebeu-se maior correlação entre as taxas de carbonização do método teórico simplificado com relação ao experimental, e do método numérico com proposta da EN 1995-1-2:2004 em relação ao experimental. Demonstrando que estudos específicos para cada espécie ou classe de madeira geram resultados próximos à realidade esperada.

A comparação entre pino e parafuso mostrou diferenças relevantes na transferência de calor para o interior da ligação. O parafuso, por conter maior área exposta ao fogo devido a exposição direta da cabeça, conduziu calor mais rapidamente, atingindo temperaturas elevadas em menor tempo. Todavia, o pino, com maior proteção da madeira, aquece mais lentamente, o que resultou em menor influência térmica na região interna da ligação.

Durante o tempo de duração da análise estrutural, não foram registradas deformações excessivas que causassem a falha da ligação, apesar de que, pelo menos visualmente, a análise captou a deformação do pino que indica sua plastificação.

4.3 PALMA (2016)

Considerando os dados do trabalho desenvolvido por Palma (2016) foram desenvolvidas análises térmicas tridimensionais.

4.3.1 Comportamento térmico da ligação

A seguir são apresentados os resultados da análise numérica térmica para o mecanismo de conexão tipo A.1 elaborado por Palma (2016). Obteve-se a evolução da temperatura para pontos nos pinos e na madeira por meio da análise numérica térmica. Ressalta-se que no trabalho experimental de Palma (2016) a análise térmica não foi abordada de maneira isolada, e sim, apresenta-se resultados termomecânicos. Portanto, a discussão nesta subseção se dará por meio da análise do comportamento dos materiais, madeira e aço, assim como a interação entre eles, quando expostos a temperaturas elevadas, por meio da análise numérica.

As leituras de temperatura na madeira foram obtidas na metade da altura da viga, em três seções transversais distintas, sendo duas seções na região da ligação (M1 e M2) e outra na região fora da ligação (M3), conforme ilustrado pela Figura 3.16. Enquanto a temperatura dos pinos foi coletada em três pontos distintos de sua superfície, conforme Figura 3.17.

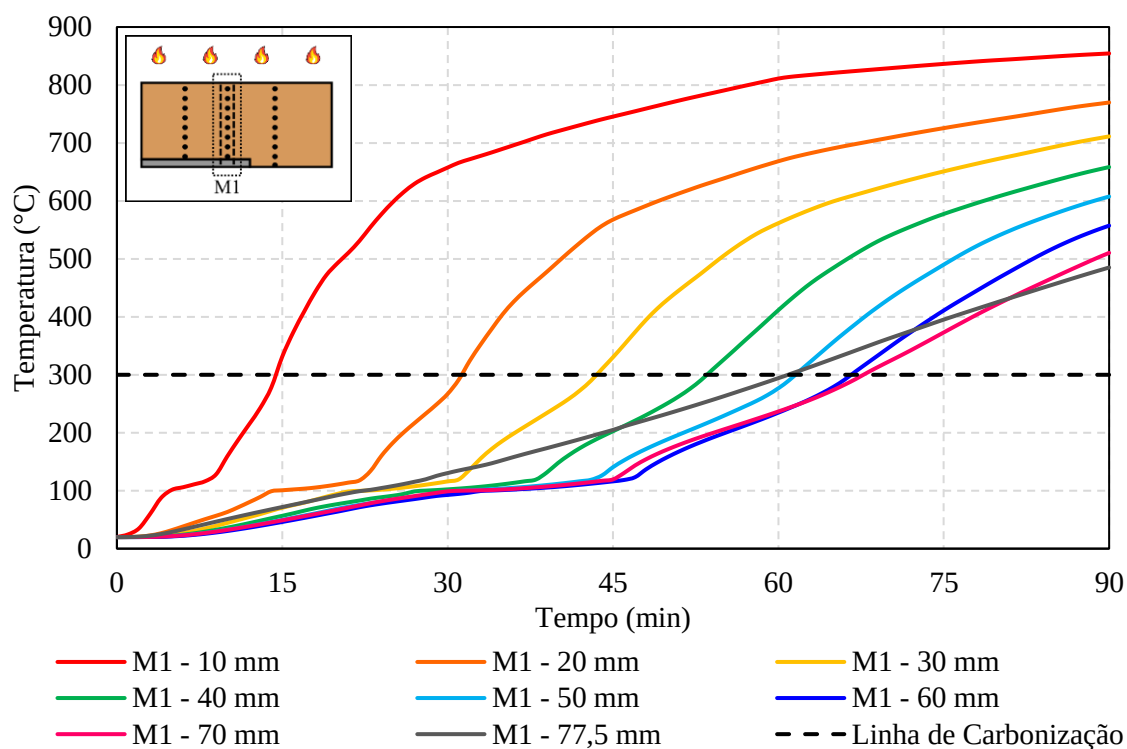
A Figura 4.35 apresenta a evolução da temperatura ao longo do tempo em diferentes profundidades da seção transversal M1, localizada na região da ligação metálica da viga de madeira. Essa seção é caracterizada pela presença de pinos metálicos e de uma placa metálica posicionada próxima ao ponto mais profundo analisado (77,5 mm), o que influencia diretamente no comportamento térmico observado.

A curva correspondente à profundidade de 10 mm apresenta aquecimento acentuado nos primeiros minutos de exposição, ultrapassando 800 °C ao final dos 90 minutos. A profundidade de 20 mm também atinge valores elevados, ultrapassando os 600 °C. Com o aumento da profundidade, observa-se uma atenuação da temperatura, o que é compatível com o comportamento térmico esperado para elementos de madeira expostos ao fogo, dada sua baixa condutividade térmica.

A linha tracejada preta representa o limite de 300 °C, comumente adotado como referência para o início do processo de carbonização da madeira. Essa linha permite identificar os momentos em que cada profundidade ultrapassa a temperatura crítica. Verifica-se que a

carbonização ocorre rapidamente nas regiões mais superficiais (10 mm e 20 mm), sendo atingida por volta de 10 e 30 minutos, respectivamente. Enquanto nas profundidades intermediárias (30 a 60 mm), a temperatura de carbonização é alcançada entre 50 e 80 minutos de exposição.

Figura 4.35 – Avanço da temperatura na seção M1 de acordo com a profundidade



Fonte: Autor (2025)

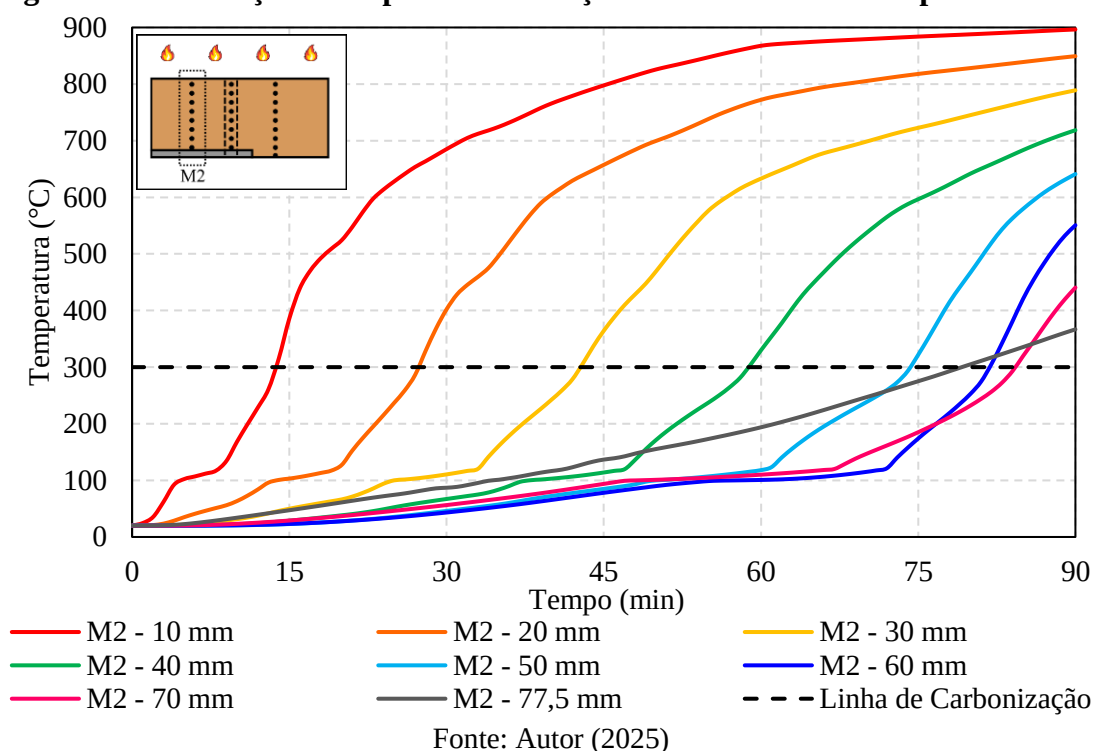
Contudo, destaca-se um comportamento atípico no ponto mais profundo (77,5 mm), que ultrapassa a linha de 300 °C antes de outras profundidades intermediárias, como 50 mm e 60 mm. Esse comportamento se deve à presença da placa metálica na região, que atua como condutor térmico, favorecendo a transferência de calor para áreas mais internas da viga. Como resultado, ocorre um aumento significativo da temperatura nesse ponto e uma antecipação do processo de carbonização, o que não seria esperado em condições homogêneas de madeira.

Esse efeito reforça a importância de considerar os elementos metálicos inseridos na madeira ao se analisar o comportamento térmico de ligações em situação de incêndio. A condutividade térmica do aço pode acelerar o aquecimento de regiões internas, comprometendo a integridade da madeira em locais que, de outra forma, permaneceriam a temperaturas mais baixas. Assim, os resultados da seção M1 evidenciam que a presença de componentes metálicos

altera significativamente o perfil térmico do elemento, sendo um fator crítico para a previsão da resistência residual da ligação ao longo do tempo.

A evolução da temperatura da madeira na seção M2 ocorre de maneira semelhante à observada na seção M1. A Figura 4.36 ilustra a evolução da temperatura na seção M2 em diferentes profundidades ao longo do tempo. Diferentemente da seção M1, a seção M2 está localizada fora da região dos pinos de conexão metálicos, mas ainda sob influência da presença da chapa metálica posicionada nas proximidades do ponto mais profundo da seção. Essa configuração permite avaliar de forma mais isolada o impacto da chapa metálica na condução de calor, sem o efeito combinado dos pinos.

Figura 4.36 - Avanço da temperatura na seção M2 de acordo com a profundidade



Como esperado, a tendência geral de aquecimento segue o comportamento típico da madeira exposta ao fogo: camadas mais próximas da superfície (como a profundidade de 10 mm) atingem rapidamente temperaturas elevadas, ultrapassando os 800 °C ao final da análise. A profundidade de 20 mm também apresenta elevação acentuada, alcançando valores superiores a 600 °C. À medida que a profundidade aumenta, a taxa de elevação de temperatura diminui, evidenciando o efeito isolante da madeira.

Os dados indicam que as profundidades de 10, 20 e 30 mm atingem 300 °C, por volta de 10, 30 e 45 minutos, respectivamente. Nas profundidades de 40 a 60 mm), o cruzamento com a linha de carbonização ocorre entre 60 e 85 minutos, de forma coerente com o avanço da frente térmica.

Destaca-se, novamente, o comportamento singular do ponto mais profundo (77,5 mm), que apresenta elevação de temperatura mais pronunciada que o esperado para sua posição. Embora o aquecimento seja menos abrupto do que o observado na seção M1, nota-se que o ponto ultrapassa a linha de carbonização pouco antes dos 90 minutos de exposição. Essa antecipação pode ser atribuída à proximidade da chapa metálica, que, apesar de não estar em contato direto com a região dos pinos, ainda atua como condutor térmico relevante, facilitando a transferência de calor até as regiões internas da madeira.

Em comparação à seção M1, a seção M2 evidencia um comportamento térmico intermediário: a ausência dos pinos reduz o efeito de condução localizada observado anteriormente, porém a influência da chapa metálica permanece notável, principalmente nas camadas mais profundas. Esses resultados confirmam a importância de se considerar a geometria e a disposição dos elementos metálicos nas análises térmicas, uma vez que mesmo a presença parcial ou pontual de metal pode comprometer o desempenho térmico da ligação.

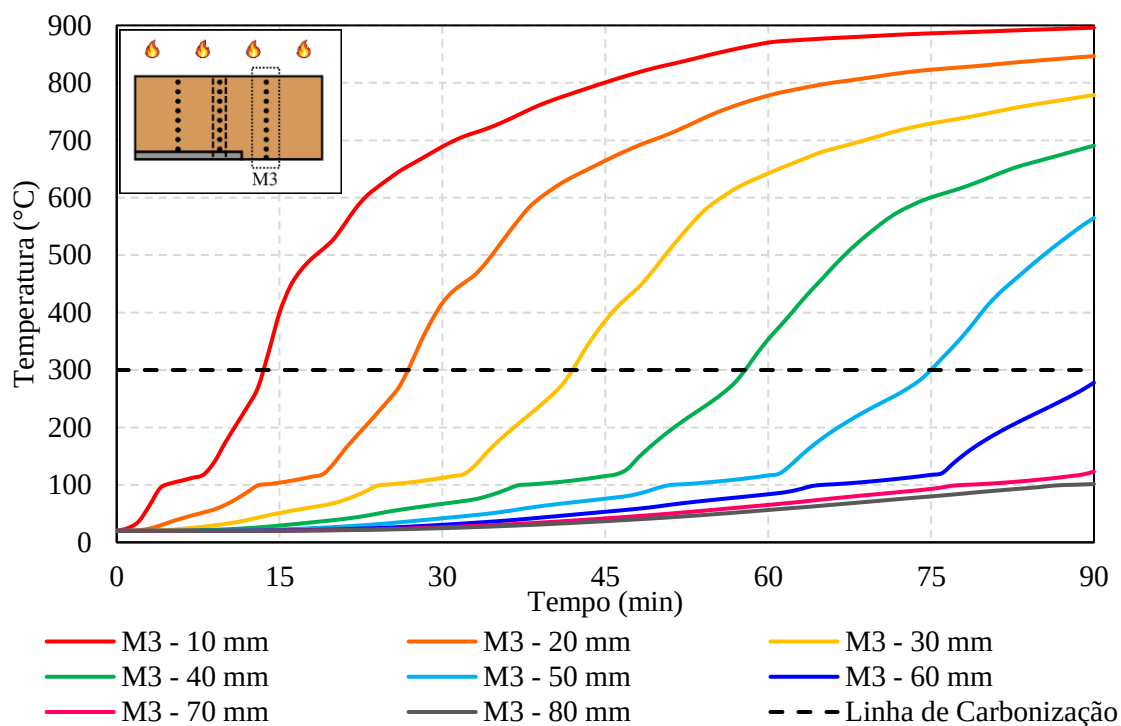
Assim, os dados da seção M2 reforçam a conclusão de que a condutividade do aço interfere significativamente na distribuição de temperatura dentro da madeira, podendo antecipar a carbonização em regiões que, em uma condição homogênea, estariam mais protegidas. A avaliação conjunta das seções M1 e M2 permite observar com clareza os diferentes graus de influência térmica dos componentes metálicos da ligação, contribuindo para uma análise mais precisa da segurança da estrutura em situação de incêndio.

A Figura 4.37 apresenta o avanço da temperatura na seção transversal M3, localizada fora da região da ligação metálica, onde o material é composto exclusivamente por madeira, sem a presença de pinos ou chapas metálicas. Essa seção representa, portanto, o comportamento térmico da viga em sua condição mais homogênea e idealizada, sendo fundamental para o entendimento do desempenho térmico natural da madeira em situação de incêndio.

A curva de temperatura para a profundidade de 10 mm revela um aquecimento acelerado, ultrapassando 800 °C ainda nos primeiros 60 minutos de exposição. As profundidades de 20 mm e 30 mm seguem a mesma tendência, alcançando valores significativos, acima de 600 °C e 500 °C, respectivamente. A linha de 300 °C (representando o

limiar de carbonização) é cruzada por essas camadas rasas entre 10 e 45 minutos, em tempos compatíveis com o avanço da frente térmica típica da madeira.

Figura 4.37 - Avanço da temperatura na seção M3 de acordo com a profundidade

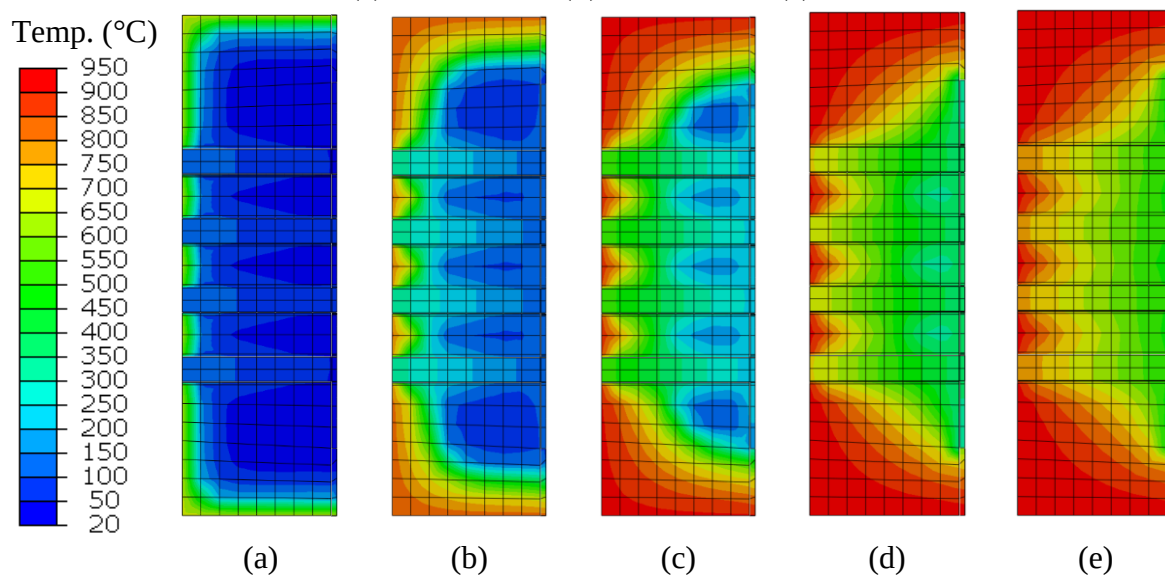


Fonte: Autor (2025)

As camadas mais profundas (40 a 80 mm) apresentam um comportamento térmico gradual e uniforme, evidenciando a eficiência natural da madeira como isolante térmico. Os pontos a 70 mm e 80 mm não ultrapassam o limite de 300 °C ao longo dos 90 minutos de simulação, demonstrando que essas regiões internas permanecem estruturalmente intactas, sem indícios de carbonização. Esse perfil térmico confirma a confiabilidade da madeira como material com capacidade de manter sua integridade em situações de fogo, especialmente em regiões afastadas de interferências metálicas.

A análise comparativa entre as seções M1, M2 e M3 revela o impacto significativo da presença de elementos metálicos na propagação térmica dentro da madeira. A seção M1 (Figura 4.38), situada na região da ligação com pinos metálicos e chapa de aço, apresentou os maiores valores de temperatura nas camadas profundas, com antecipação da carbonização no ponto de 77,5 mm, evidenciando um efeito de condução intensa promovido pelos materiais metálicos.

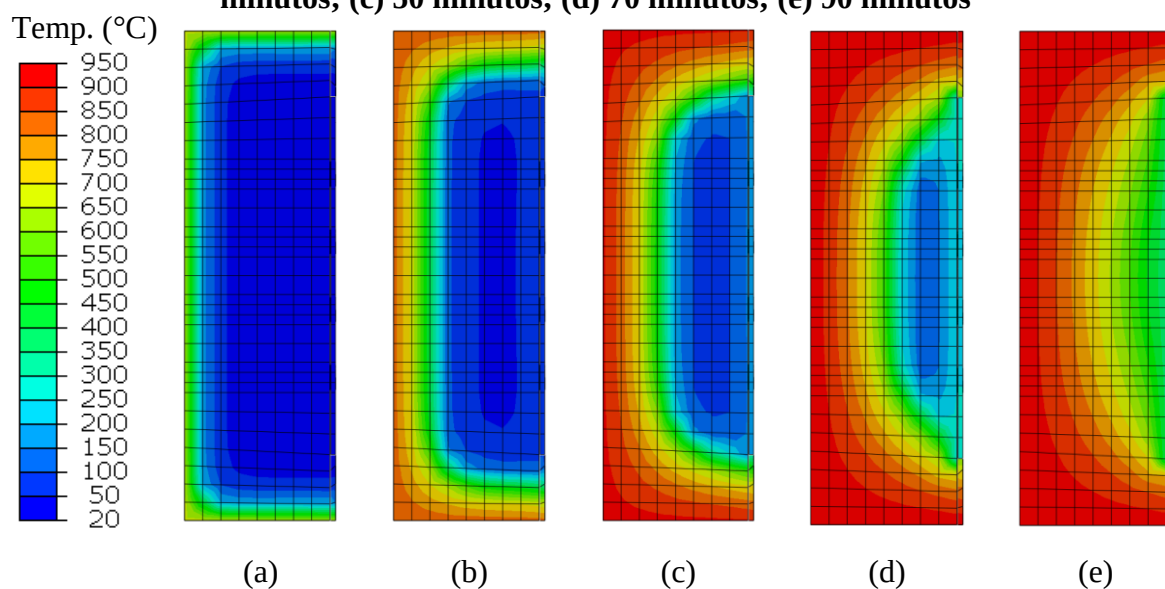
Figura 4.38 – Perfis de temperatura da madeira na seção M1 em: (a) 10 minutos; (b) 30 minutos; (c) 50 minutos; (d) 70 minutos; (e) 90 minutos



Fonte: Autor (2025)

A seção M2, Figura 4.39, embora localizada fora da zona dos pinos, ainda mostrou aquecimento acentuado em camadas internas devido à proximidade da chapa metálica, demonstrando que sua influência se estende além da interface direta com os conectores.

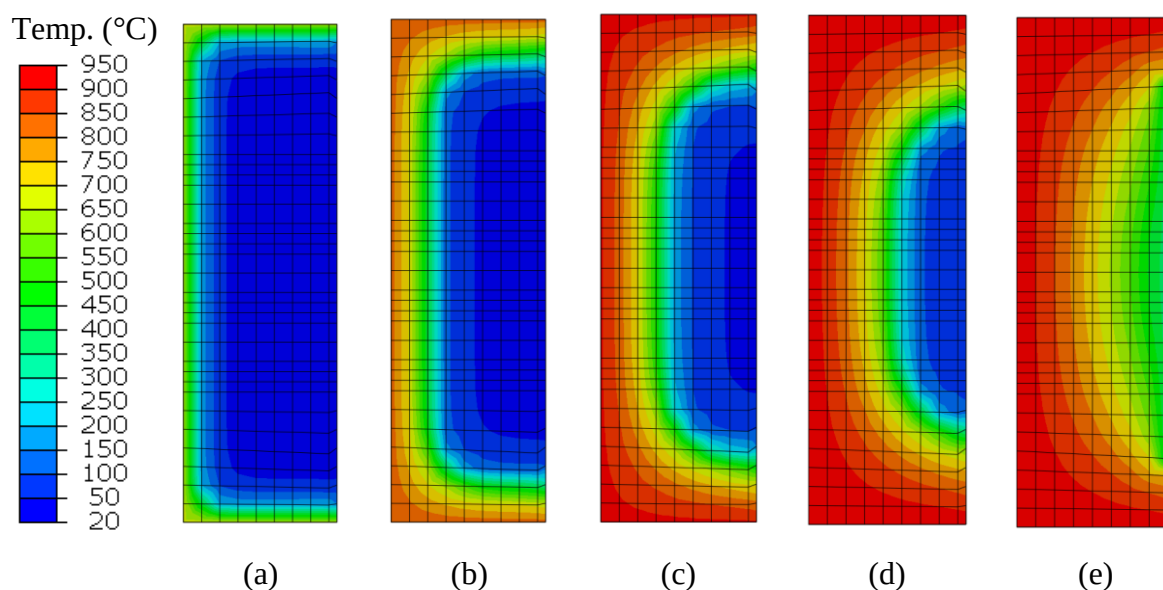
Figura 4.39 – Perfis de temperatura da madeira na seção M2 em: (a) 10 minutos; (b) 30 minutos; (c) 50 minutos; (d) 70 minutos; (e) 90 minutos



Fonte: Autor (2025)

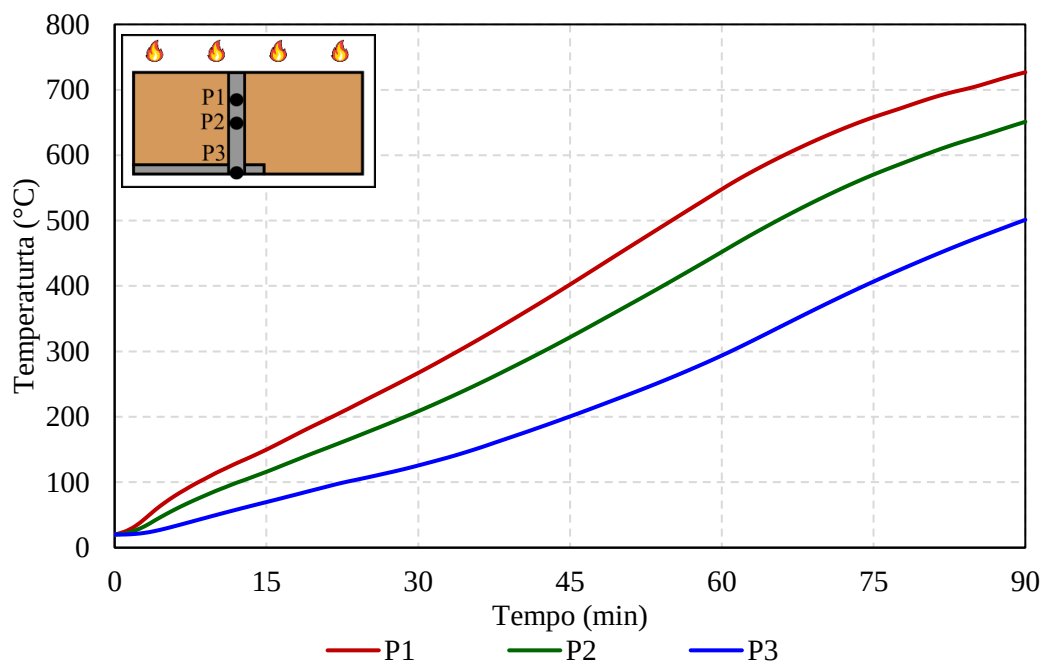
A seção M3, Figura 4.40, composta exclusivamente por madeira, apresentou o comportamento mais estável e previsível, com aquecimento superficial expressivo, porém com retenção térmica eficiente nas camadas internas, que permaneceram abaixo do limiar de carbonização.

Figura 4.40 – Perfis de temperatura da madeira na seção M3 em: (a) 10 minutos; (b) 30 minutos; (c) 50 minutos; (d) 70 minutos; (e) 90 minutos



Fonte: Autor (2025)

Os pontos P1, P2 e P3 referem-se as temperaturas do pino, anteriormente viu-se o perfil de temperatura na seção dos pinos, na Figura 4.38. A Figura 4.41 ilustra a evolução da temperatura do pino em diferentes profundidades, sendo P1 o ponto mais próximo a face exposta ao fogo, e P3 o ponto mais interno, localizando-se próximo a chapa de aço. Após 90 minutos de análise de exposição ao fogo, as temperaturas registradas foram de 740°C para o ponto P1, 650°C para P2 e 500°C em P3. As curvas de evolução da temperatura demonstram comportamento semelhante ao observado nas curvas dos pinos metálicos da análise da conexão de Audebert *et al.* (2013), descrita em 4.2.4.

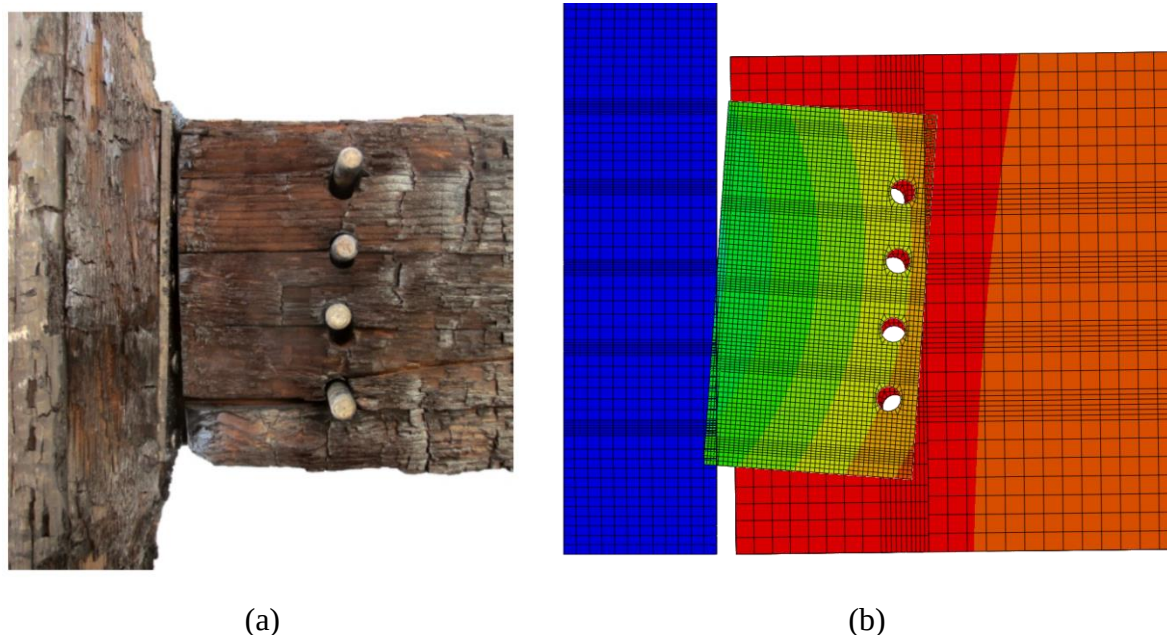
Figura 4.41 – Evolução da temperatura nos pinos

Fonte: Autor (2025)

Com relação ao comportamento termoestructural da ligação entre viga e pilar, conforme observado na Figura 4.42, o modelo numérico foi capaz de representar a movimentação dos elementos da ligação: a viga, com a aplicação do carregamento, apresenta um leve afastamento de sua extremidade à parte inferior do pilar e aproximação da extremidade superior, entretanto não chega a encostar no pilar devido ao distanciamento de 10 mm previsto para a tipologia estudada neste trabalho.

Observa-se a parte inferior da chapa adentrando o pilar, causando esmagamento. Além do embutimento dos pinos na madeira observado pelo fato de os furos da placa não estarem mais alinhados com os furos da viga na Figura 4.42.

Figura 4.42 – Comportamento termoestructural da ligação viga-pilar: (a) ensaio experimental; (b) modelagem numérica



Fonte: Autor (2025)

4.3.2 Determinação da seção transversal residual

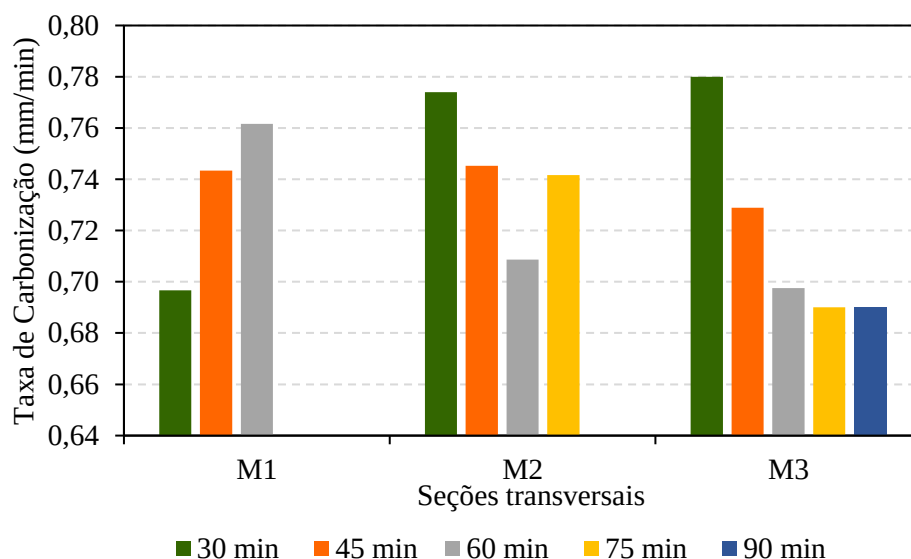
De acordo com Palma (2016), os testes de resistência ao fogo para a tipologia A.1 duraram 38,7 minutos, considerando a estrutura completa (viga e pilar), e 44,1 minutos considerando apenas o lado da viga exposta ao fogo. Apesar disso, a Tabela 4.8 apresenta taxas de carbonização para tempos superiores aos resistidos em ensaio experimental, com o intuito de analisar a evolução da taxa de carbonização nas diferentes seções, visto a facilidade da aplicação da análise numérica em relação ao ensaio experimental.

A Tabela 4.8 e a Figura 4.43 apresentam as taxas de carbonização obtidas para as seções transversais M1, M2 e M3 em diferentes tempos de exposição ao fogo, comparando os valores estimados por meio do método teórico simplificado com os resultados obtidos numericamente com base na EN 1995-1-2:2004. Essa análise quantitativa complementa os resultados gráficos previamente discutidos e permite uma avaliação mais precisa da influência de elementos metálicos sobre o avanço da frente de carbonização ao longo do tempo.

Tabela 4.8 – Taxas de carbonização para diferentes tempos de análise

Seção	Método	β (mm/min)				
		30 min	45 min	60 min	75 min	90 min
M1	Teórico (NBR 7190)	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
	Numérico (EN 1995)	0,70	0,74	0,76	-	-
M2	Teórico (NBR 7190)	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
	Numérico (EN 1995)	0,77	0,75	0,71	0,74	-
M3	Teórico (NBR 7190)	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
	Numérico (EN 1995)	0,78	0,73	0,70	0,69	0,69

Fonte: Autor (2025)

Figura 4.43 – Evolução das taxas de carbonização nas seções M1, M2 e M3

Fonte: Autor (2025)

Não são apresentados dados de taxa de carbonização, espessura carbonizada e seção transversal residual para o ensaio experimental. Portanto, na Tabela 4.8 e na Figura 4.43, faz-se uma comparação das taxas de carbonização obtidas via análise numérica e método teórico simplificado, para os tempos de 30, 45, 60, 75 e 90 minutos, nas seções transversais M1, M2 e M3.

Os resultados numéricos revelam variações importantes nas taxas de carbonização ao longo do tempo e entre as diferentes seções. A seção M1 (região da ligação com proximidade dos pinos) apresentou uma elevação nas taxas de carbonização com o passar do tempo de exposição, saindo de 0,70 mm/min aos 30 minutos, atingindo 0,74 mm/min aos 45 minutos e 0,76 mm/min aos 60 minutos. Esse aumento reflete o papel condutivo dos elementos metálicos,

que intensificam o fluxo de calor para o interior da madeira, acelerando o processo de degradação térmica e antecipando o início da carbonização mesmo em regiões mais profundas. Esse comportamento é ilustrado na Figura 4.44.

A seção M2, localizada fora da região dos pinos, mas ainda sob influência da chapa metálica, também apresentou taxas superiores às do modelo teórico, embora ligeiramente inferiores às da seção M1. A taxa de carbonização para M2 aos 30 minutos é de 0,77 mm/min, cai para 0,75 mm/min aos 45 minutos e para 0,71 mm/min aos 60 minutos, indicando a tendência de redução da taxa de carbonização com o tempo. Entretanto, aos 90 minutos de exposição ocorre um aumento na taxa de carbonização, para 0,74 mm/min, que pode ser explicado pela proximidade da chapa metálica, que exerce influência relevante na condução de calor para o interior do elemento, como também pode ser observado na Figura 4.45 (d).

A seção M3, composta exclusivamente por madeira e localizada fora da região da ligação, apresentou tendência de comportamento semelhante a seção M2 até os 60 minutos, quando se registrou 0,70 mm/min. Todavia, por não haver interferência de nenhum elemento metálico na seção M3, após os 60 minutos, as taxas de carbonização não se elevaram, mas estabilizaram-se em 0,69 mm/min, valor bem próximo aos 0,70 mm/min do método teórico simplificado. Observa-se apenas um leve acréscimo nos primeiros 30 minutos (0,78 mm/min), possivelmente devido ao rápido aquecimento superficial nos estágios iniciais da exposição. Após esse período, a propagação térmica tende a se estabilizar, evidenciando a função isolante natural da madeira e a previsibilidade do avanço da frente de carbonização em seções homogêneas

Seguindo o método teórico simplificado, adota-se a taxa de carbonização constante de 0,70 mm/min, sendo esta a taxa de carbonização nominal, conforme a ABNT NBR 7190-1:2022, independente da seção que está sendo avaliada. Embora essa abordagem forneça uma estimativa conservadora e seja amplamente utilizada para fins de dimensionamento, não captura as variações reais provocadas por heterogeneidades na composição da seção, como a presença de conectores metálicos ou placas de aço, que afetam significativamente o comportamento térmico do conjunto.

Os resultados da Tabela 4.8 e da Figura 4.43, aliados às análises gráficas de temperatura da apresentadas em 4.3.1, reforçam que a presença de componentes metálicos nas ligações de madeira tem papel determinante no comportamento térmico da estrutura em situação de incêndio, como observado anteriormente por Palma *et al.* (2013). Nas seções M1 e M2, a

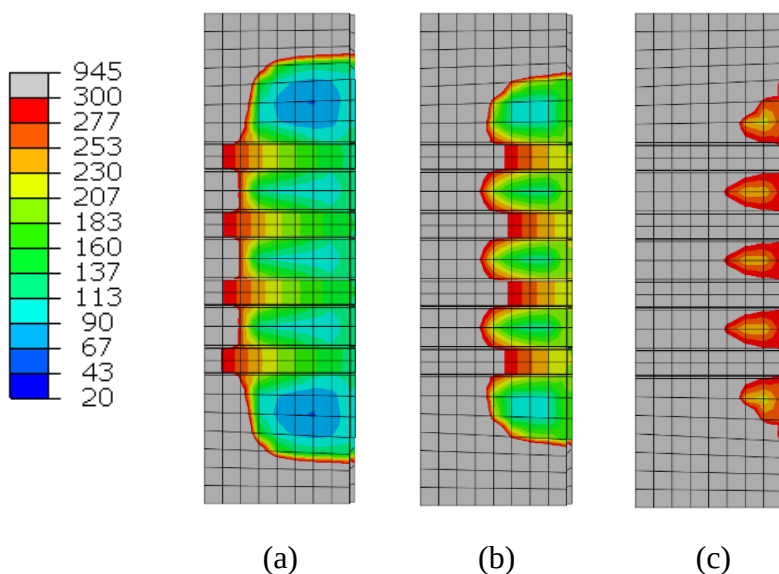
condutividade térmica do aço promove um aquecimento mais acentuado das regiões internas, elevando localmente as taxas de carbonização e, conseqüentemente, comprometendo a seção resistente efetiva da madeira em um tempo menor do que o previsto por métodos teóricos simplificados. Na seção M3, a ausência de interferências metálicas permite que a madeira desempenhe seu comportamento térmico típico, resultando em taxas mais estáveis e conservadoras ao longo do tempo.

Dessa forma, os dados numéricos evidenciam a limitação de se adotar exclusivamente abordagens simplificadas para estruturas mistas madeira-aço, especialmente em regiões de ligação, e reforçam a necessidade de considerar modelagens refinadas que incluam a influência térmica dos conectores e elementos metálicos para garantir avaliações seguras da capacidade resistente da estrutura sob exposição ao fogo.

Considerando as Figura 4.44, Figura 4.45 e Figura 4.46, observa-se a evolução da carbonização da madeira nas seções M1, M2 e M3, respectivamente, ao longo do tempo de exposição ao fogo. As distribuições de temperatura obtidas por meio da simulação numérica permitem identificar o avanço da frente de carbonização, representada pela região em cinza, caracterizada pela isoterma acima de 300°C.

Na seção M1 (Figura 4.44), é evidente a influência da presença dos elementos metálicos internos. Aos 30 minutos, a frente de carbonização se aproxima do centro da seção, concentrando-se principalmente ao redor dos conectores metálicos. Aos 45 minutos, essa carbonização se intensifica, formando regiões de calor ao redor de todos os conectores. Aos 60 minutos, a carbonização se torna dominante em praticamente toda a altura da peça, evidenciando uma transferência de calor concentrada nas regiões de contato com o aço. Esse comportamento mostra que a presença de elementos metálicos internos acelera a degradação térmica da madeira ao seu redor.

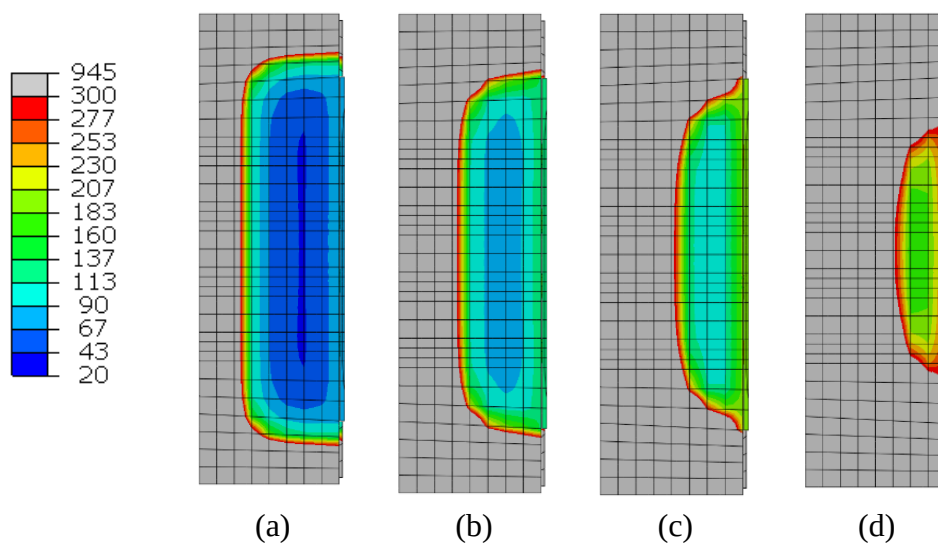
Figura 4.44 – Carbonização da madeira na seção M1 em: (a) 30 minutos; (b) 45 minutos; (c) 60 minutos



Fonte: Autor (2025)

Na seção M2 (Figura 4.45), observa-se um comportamento ligeiramente diferente. Até os 45 minutos, a carbonização é relativamente superficial, com maior penetração nos cantos da viga. A partir dos 60 minutos, verifica-se um aumento da profundidade da frente de carbonização, especialmente nas faces superior e inferior da madeira. A presença da placa metálica promove maior condução de calor em determinadas regiões da seção transversal.

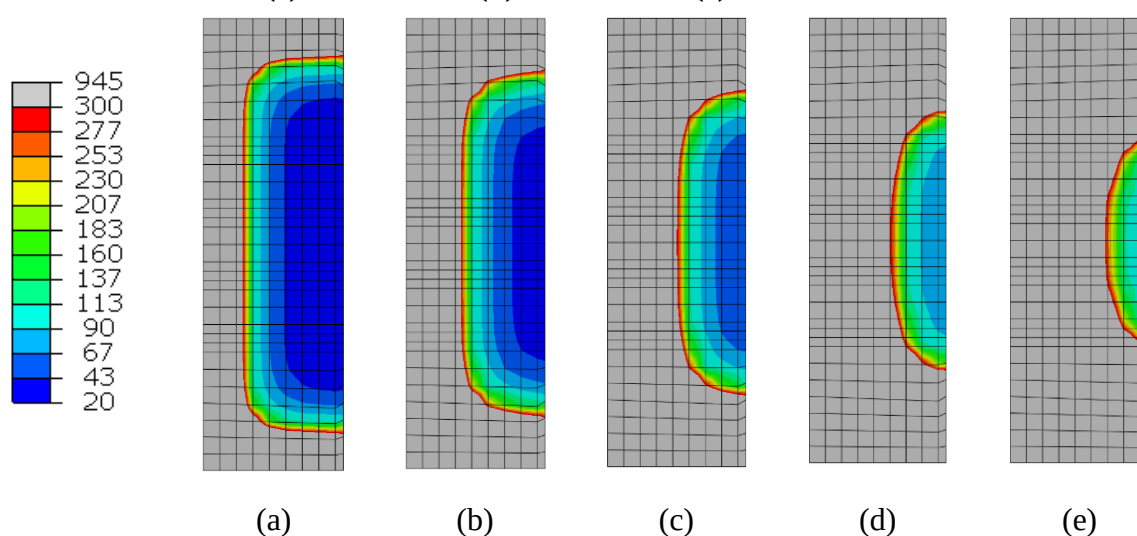
Figura 4.45 – Carbonização da madeira na seção M2 em: (a) 30 minutos; (b) 45 minutos; (c) 60 minutos; (d) 75 minutos



Fonte: Autor (2025)

Para a seção M3 (Figura 4.46) observa-se um avanço da carbonização mais simétrico e regular. Aos 45 minutos, a frente de carbonização ainda é limitada às camadas externas. Contudo, aos 75 e 90 minutos, percebe-se uma penetração mais uniforme do calor, com contornos praticamente paralelos às superfícies da madeira. Isso sugere que a M3 é menos influenciada por concentrações de calor associadas a elementos metálicos, o que favorece uma distribuição térmica mais homogênea ao longo da seção.

Figura 4.46 – Carbonização da madeira na seção M3 em: (a) 30 minutos; (b) 45 minutos; (c) 60 minutos; (d) 75 minutos; (e) 90 minutos



Fonte: Autor (2025)

De modo geral, os resultados obtidos demonstram que a progressão da carbonização está diretamente relacionada à geometria da ligação, ao tempo de exposição ao fogo e à presença de conectores metálicos. A seção M1, com forte influência do aço embutido, apresenta o avanço mais acentuado e localizado da carbonização, enquanto a seção M3, mais distante dos elementos metálicos, preserva maior uniformidade térmica. Esses dados reforçam a importância de considerar os efeitos da condução térmica dos componentes metálicos no dimensionamento de ligações mistas em estruturas de madeira submetidas a altas temperaturas.

As Figura 4.44 (b), Figura 4.45 (b) e Figura 4.46 (b) servem de base para os dados do método numérico apresentados na Tabela 4.9, onde são mostradas as espessuras carbonizadas e seções transversais residuais para as três seções em 45 minutos de exposição ao fogo, além do percentual de redução da seção em relação ao momento de inércia.

Ressalta-se que o modelo teórico simplificado baseado na ABNT NBR 7190-1:2022, por apresentar taxa de carbonização constante, é incapaz de representar a diferença de espessura carbonizada no sentido da altura e da largura. Portanto, para todas as seções analisadas, os valores teóricos da espessura carbonizada, são constantes e assumem 31,5 mm tanto nas faces laterais quanto nas faces inferior e superior. Os valores numéricos obtidos a partir do modelo térmico apresentaram leve variação entre as seções e demonstraram maior espessura de carbonização nas faces inferior e superior quando comparadas às laterais, o que está coerente com o comportamento esperado, conforme observado anteriormente em Martins (2016) e em Audebert *et al.* (2013).

Tabela 4.9 – Espessura carbonizada e seção transversal residual em 45 minutos de exposição

Seção	Método	Espessura Carbonizada (mm)		Seção Residual (mm)		Redução em relação ao momento de inércia (%)
		Faces Laterais	Face Inf/Sup	b	h	
M1	Seção original	-	-	160,0	260,0	-
	Numérico (EN 1995)	31,60	35,30	96,8	183,4	77,23
M2	Seção original	-	-	160,0	260,0	-
	Numérico (EN 1995)	30,64	36,43	98,7	181,1	77,62
M3	Seção original	-	-	160,0	260,0	-
	Numérico (EN 1995)	31,60	34,00	96,8	186,0	76,24
Todas	Teórico (NBR 7190)	31,50	31,50	97,0	191,0	77,22

Fonte: Autor (2025)

A redução percentual do momento de inércia, calculada com base nas seções residuais, apresenta valores similares para os dois métodos, sendo de 77,22% para todas as seções seguindo o método de cálculo teórico. De acordo com o método numérico, as seções na ligação, M1 e M2, apresentaram redução de 77,23% e 77,62%, respectivamente, ficando próximas ao valor teórico do método simplificado. Contudo, para a seção M3, o modelo numérico indicou uma redução levemente inferior (76,24%), o que pode estar relacionado à menor espessura de carbonização verificada numericamente nas faces superior e inferior, garantindo uma seção transversal residual mais íntegra nesta região.

De modo geral, os resultados obtidos indicam que o modelo numérico desenvolvido é coerente com o método teórico simplificado, apresentando boas aproximações tanto na estimativa da espessura carbonizada, quanto na avaliação da seção remanescente. No entanto, o modelo numérico permite uma análise mais detalhada e localizada do processo de carbonização, revelando diferenças sutis que não são capturadas pelas equações teóricas, especialmente em regiões próximas aos elementos metálicos e nas zonas de acúmulo de calor. Esses resultados reforçam a importância do uso de simulações numéricas no estudo do desempenho ao fogo de ligações madeira-aço, especialmente quando se busca compreender o comportamento térmico de geometrias complexas ou não padronizadas.

4.3.3 Principais considerações

A modelagem numérica baseada na ligação proposta por Palma (2016) permitiu avaliar com maior profundidade os efeitos da interação térmica entre a madeira e os elementos metálicos em situação de incêndio. Os resultados evidenciaram que a presença de peças metálicas, como a chapa de aço e os pinos, exerce influência significativa sobre a distribuição de temperatura nas regiões internas da ligação. A elevada condutividade térmica do aço promove a condução de calor para o interior da madeira, antecipando o aumento da temperatura em zonas que, em condições homogêneas, tenderiam a permanecer protegidas por mais tempo.

Esse efeito foi claramente observado nas seções M1 e M2, que apresentaram avanço acentuado da carbonização em função da proximidade com os elementos metálicos, confirmando o impacto do aço no desempenho térmico da madeira ao redor da ligação. Tal comportamento contrasta com a seção M3, mais afastada dos conectores e da chapa de aço, onde foi possível observar uma distribuição de temperatura mais uniforme e menor profundidade de carbonização.

A análise comparativa com os valores normativos da EN 1995-1-2:2004 indicou boa representação da taxa de carbonização nas regiões compostas exclusivamente por madeira. Nas seções com interferência dos elementos metálicos, os valores calculados pela norma subestimaram a propagação real da carbonização, o que destaca a limitação dos métodos prescritivos frente à complexidade das ligações mistas. Isso reforça a importância da simulação numérica como ferramenta para prever o comportamento térmico de geometrias não

padronizadas, permitindo identificar regiões críticas que não seriam detectadas por abordagens simplificadas.

De forma geral, os resultados obtidos demonstram que a progressão da carbonização está diretamente relacionada à geometria da ligação, ao tempo de exposição ao fogo e à presença de elementos metálicos. A influência da condutividade térmica do aço nos processos de transferência de calor não pode ser negligenciada, uma vez que compromete a integridade da madeira em regiões internas da ligação, afetando sua estabilidade global. Assim, para o dimensionamento seguro de conexões madeira-aço em situação de incêndio, é fundamental considerar a condução térmica dos componentes metálicos e sua interação com os elementos de madeira.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nesta pesquisa evidenciaram que as propriedades térmicas da madeira exercem papel determinante nas análises numéricas em situação de incêndio. A condutividade térmica e o calor específico mostraram-se parâmetros fundamentais para a representação da evolução da temperatura, sendo necessário realizar ajustes específicos para cada modelo a fim de alcançar maior precisão. Tal constatação está alinhada com a ressalva da própria norma EN 1995-1-2:2004, que indica a necessidade de calibração desses valores.

Verificou-se que a taxa de carbonização constitui um dos principais parâmetros para a determinação da seção transversal residual da madeira exposta ao fogo. Contudo, a ABNT NBR 7190-1:2022 ainda adota valores oriundos da norma europeia, sem considerar as particularidades das madeiras brasileiras, além de assumir taxas constantes e uniformes para todas as faces. As análises numéricas realizadas captaram de forma mais realista o avanço da carbonização, representando o arredondamento dos cantos e as diferenças de comportamento entre faces e regiões próximas a conectores metálicos.

A comparação entre métodos demonstrou que, para espécies coníferas semelhantes às utilizadas nos ensaios que embasaram a EN 1995-1-2:2004, os resultados teóricos simplificados se aproximam dos experimentais, mas tendem a subestimar valores em relação às simulações numéricas. Já para espécies brasileiras, os ensaios experimentais indicaram maiores taxas de carbonização, seguidos de perto pelos modelos numéricos ajustados, enquanto o método teórico apresentou valores inferiores, evidenciando limitações para aplicação direta às espécies nacionais.

Outro aspecto relevante identificado foi a influência das conexões metálicas no comportamento da estrutura. As análises mostraram que a presença e o tipo de conector alteram significativamente a transferência de calor, afetando tanto a elevação da temperatura local quanto a integridade da ligação. Parafusos, por apresentarem maior área exposta, aqueceram mais rapidamente e aceleraram a propagação do calor para o interior da madeira, enquanto pinos se beneficiaram da maior proteção conferida pelo embutimento.

De modo geral, a pesquisa reforça a importância da caracterização de propriedades térmicas específicas para madeiras nacionais, da determinação mais precisa da taxa de carbonização em diferentes condições e da consideração das conexões metálicas nos modelos

de dimensionamento. Esses fatores se mostram essenciais para garantir maior segurança e eficiência no projeto de estruturas de madeira em situação de incêndio.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para a complementação das investigações realizadas no presente estudo, sugere-se o desenvolvimento de trabalhos futuros com as seguintes abordagens:

- Realizar ensaios experimentais para determinação das propriedades térmicas (condutividade e calor específico) de espécies de madeira brasileiras, visando propor curvas específicas;
- Investigar a taxa de carbonização em diferentes tipologias estruturais e condições de exposição, considerando a variabilidade entre faces e profundidades;
- Avaliar, por meio de experimentos e simulações numéricas, o comportamento de diferentes tipologias de ligações metálicas em estruturas de madeira submetidas ao fogo;
- Desenvolver modelos numéricos acoplados (térmico-estruturais) capazes de representar simultaneamente os efeitos da degradação térmica e mecânica da madeira e do aço;
- Propor ajustes às prescrições normativas brasileiras, de modo a contemplar as particularidades das espécies nacionais e diferentes configurações de ligações metálicas.

REFERÊNCIAS

AFLALO, Marcelo. **Estruturas em madeira: forma e método**. 2020. 156f. Tese (Doutorado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

ALMEIDA, Saulo José de Castro. **Análise do comportamento a temperaturas elevadas de elementos de aço formados a frio comprimidos considerando restrição ao alongamento térmico**. 2012. Tese (Doutorado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

ALAM, Marc. **Performance of timber-to-steel bolted connections exposed to fire**. 2023. 197f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil/Engenharia de Segurança Contra Incêndio) – Universidade de Carleton, Ottawa, 2023. Disponível em: < <https://doi.org/10.22215/etd/2023-15795>>. Acesso em: 26 abr. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5628**: Componentes construtivos estruturais – Determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190-1**: Projeto de estruturas de madeira – Parte 1: Critérios de dimensionamento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14323**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14432**: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

AUDEBERT, Maxime; DHIMA, Dhionis; TAAZOUNT, Mustapha; BOUCHAÏR, AbdelHamid. Thermo-mechanical behaviour of timber-to-timber connections exposed to fire. **Fire Safety Journal**, v. 56, p. 52-64, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.01.007>. Acesso em: 31 out. 2023.

AYME, Nicolas. **Rapport du comportement au feu d'assemblages bois**: Assemblages bois-métal en double cisaillement. SR21- 03/121 - NA/PB, 2003.

BAENA, Juliano Silveira. **Comparação dos critérios de dimensionamento de ligações por pinos metálicos (parafusos) em estruturas de madeira**. 2015. 113f. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

BARREIRA, Luísa Maria da Silva. **Estudo numérico do comportamento térmico e mecânico de estruturas em madeira**. 2008. 88f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal, 2008. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10198/2086>. Acesso em: 26 abr. 2024.

BARROSO, Lidiane Bittencourt; FERREIRA, Leandro Silveira; LIMA, Rogério Cattelan Antocheves. Proteção passiva contra incêndio em edificações. **Revista de Ciência e Inovação do IF Farroupilha**, p. 71-82, 2019. Disponível em: <https://core.ac.uk/display/335018874?utm_source=pdf&utm_medium=banner&utm_campaign=pdf-decoration-v1>. Acesso em: 22 abr. 2024.

BUCHANAN, Andrew Hamilton. Fire performance of timber construction. **Progress in Structural Engineering and Materials**, v. 2, n. 3, p. 278-289, 2000. Disponível em: <[https://doi.org/10.1002/1528-2716\(200007/09\)2:3%3C278::AID-PSE33%3E3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/1528-2716(200007/09)2:3%3C278::AID-PSE33%3E3.0.CO;2-P)>. Acesso em: 26 abr. 2024.

BUCHANAN, Andrew Hamilton; ABU, Anthony Kwabena. **Structural design for fire safety**. 2 ed. John Wiley and Sons: West Sussex, 2017. ISBN: 978-0-470-97289-2.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **CSA O86**. Engineering design in wood, Mississauga: CSA Group, 2016.

CALIL JÚNIOR, Carlito; BARALDI, Lívio Túlio; STAMATO, Guilherme Corrêa; FERREIRA, Núbia dos Santos Saad. **Estruturas de madeira**. Notas de aula. Departamento de Engenharia de Estruturas da Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1998.

CARVALHO, Walter; CANILHA, Larissa; FERRAZ, André; MILAGRES, Adriane Maria Ferreira. Uma visão sobre a estrutura, composição e biodegradação da madeira. **Química Nova**, v. 32, n. 8, p. 2191-2195, 2009. DOI: 10.1590/S0100-40422009000800033. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/qn/a/g9LMKTVzkCkFWHj5NJ9XGwv/>>. Acesso em: 04 abr. 2024.

COSTA, Gabriel Nagafugi de Souza. **Análise térmica de lajes em madeira com e sem proteção**. 2017. 100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal, 2008. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10198/14591>>. Acesso em: 28 abr. 2024.

ERCHINGER, Carsten Daniel. **Zum verhalten von mehrschnittigen stahl-holz-stabdübelverbindungen im brandfall**. 2009. 274f. Tese (Doutorado em Ciências) – ETH Zürich, Suíça, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005774542>>. Acesso em: 26 abr. 2024.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. (2004). **EN 1993-1-2**. Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design. Brussels, Belgium, 2005.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. (2004). **EN 1995-1-2**. Design of timber structures – Part 1-2: General – Structural fire design. Brussels, Belgium, 2004.

FERNANDES, Felipe Pablo Damasceno. Análise do comportamento em temperatura ambiente e em situação de incêndio de vigas mistas de madeira e concreto sem e com reforço com fibras de vidro. 2022. 197f. Tese (Doutorado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

FERNANDES, Felipe Pablo Damasceno; MUNAIAR NETO, Jorge. Análise numérica termoestrutural de vigas de madeira em situação de incêndio. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, João Pessoa, jul. 2022. ISSN 2447-9187. Disponível em: <<https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/6785>>. Acesso em: 03 mai. 2023. DOI:<http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id6785>.

FIGUEIROA, Manuel Jesús Manriquez; MORAES, Poliana Dias de. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 157–174, 2009. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/9547>. Acesso em: 16 fev. 2024.

FLEISCHER, Hannes; FORNATHER, Jochen; BERGMEINSTER, Konrad; LUGGIN, Wilhelm. **Versuche an Holz-Stahlblech Verbindungen mit Stabdübeln: Großbrandversuchsreihe 1 – GBV 1**. Relatório de testes, v. 9, Viena, 2002.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (2025). **ISO 834-1**: Fire resistance tests – Elements of building construction – Part 1: General requirements. International organization for standardization, Geneva.

JANG, S.; KANG, W. Changes in gas permeability and pore structure of wood under heat-treating temperature conditions. **Journal of Wood Science**, v. 65, n. 61, p. 1–9, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1186/s10086-019-1839-1>.

KODUR, Venkatesh; DWAIKAT, Mahmud; FIKE, Rustin. (2010). High-Temperature Properties of Steel for Fire Resistance Modeling of Structures. **Journal of Materials in Civil Engineering**. 22. 423-434. 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000041.

LAPLANCHE, Karine. **Etude du comportement au feu des assemblages de structures bois: approche expérimentale et modélisation**. 2006. 140f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Ecole Doctorale des Sciences Pour L’Ingénieur de Clermont-Ferrand – Université Blaise Pascal, França, 2006.

MACHADO, Fernando Miguel Gonçalves. **Avaliação da capacidade resistente de ligações aço madeira em corte simples quando submetidas ao fogo**. 2023. 70f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal, 2024. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10400.22/25021>>. Acesso em: 26 abr. 2024.

MARTINS, Gisele Cristina Antunes. **Análise numérica e experimental de vigas de madeira laminada colada em situação de incêndio**. 2016. 177f. Tese (Doutorado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016. DOI:10.11606/T.18.2016.tde-11102016-111511. Acesso em: 26 mai. 2023.

MARTINS, Gisele Cristina Antunes; FERNANDES, Felipe Pablo Damasceno; ROCHA, Fabio Martin; NETO, Jorge Munaiar. (2025). Incêndios em estruturas de madeira: uma análise comparativa entre normativas e modelagem numérica. **Caderno Pedagógico**, 22(9), e17924. DOI: <https://doi.org/10.54033/cadpedv22n9-081>. Acesso em: 07 jul. 2025.

MIKOLLA, Esko. Charring of wood based materials. Fire Safety Science – **Proceedings** of the third international symposium, p. 547-556, 1991. DOI:10.3801/IAFSS.FSS.3-547. Disponível em: <<https://publications.iafss.org/publications/fss/3/547>>. Acesso em: 26 abr. 2024.

MOLINA, Julio Cesar; CALIL JUNIOR, Carlito; KIMURA, Érica Fernanda Aiko; PINTO, Edna Moura; REGOBELLO, Ronaldo. Análise numérica do comportamento de elementos de madeira em situação de incêndio. **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 2, p. 162-170, 2012. DOI: <https://doi.org/10.4322/floram.2012.019>.

MORAES, Poliana Dias de. **Influence de la température sur les assemblages bois**. 2003. Tese (Doutorado em Ciências da Madeira) – Université Henri Poincaré, Nancy I, França, 2003. Disponível em: <https://theses.fr/2003NAN10157>. Acesso em: 29 abr. 2024.

MORESCHI, J. C. **Biodegradação e preservação da madeira**: preservativos da madeira. Notas de aula. Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da UTFPR. 2013.

NJANKOUO, Jacques Michel; DOTREPPE, Jean-Claude; FRANSSEN, Jean-Marc. Experimental Study of the Charring Rate of Tropical Hardwoods. **Fire and Materials**, v. 28, n. 1, p. 15-24, 2004. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/fam.831>>. Acesso em: 26 abr. 2024. DOI: 10.1002/fam.831.

NOVAK, Thiago. **Análise da eficiência na utilização das medidas de proteção contra incêndios, ativa ou de combate, por docentes em uma instituição de ensino público fundamental**. 2017. 14 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017. Disponível em: <<https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/23397>>. Acesso em: 19 abr. 2024.

OLIVEIRA, Ana Lúcia Crespo. **Taxa de carbonização de madeiras de espécies folhosas e características mecânicas do angelim-vermelho em altas temperaturas**. 2019. 248 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/50331>>.

OLIVEIRA, Apolo Barros de; VIANEZ, Bazilio Frasco. Avaliação do carvão vegetal como retardante de fogo. 2016. **Anais** do V Congresso de Iniciação do INPA – CONIC. Manaus, 18 a 22 de julho de 2016. Disponível em: <<https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/37240>>. Acesso em: 02 mai. 2024.

OLIVEIRA, Ilmara Elias Pires. **A importância da proteção passiva no planejamento dos projetos arquitetônicos comerciais e industriais**. 2008. 63f. Monografia (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho) – Universidade de Taubaté, Taubaté, São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://repositorio.unitau.br/jspui/handle/20.500.11874/4282>>. Acesso em: 22 abr. 2024.

ONO, Rosaria. Parâmetros para garantia da qualidade do projeto de segurança contra incêndio em edifícios altos. **Ambiente Construído**, [S. l.], v. 7, n. 1, p. 97–113, 2007. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/3731>. Acesso em: 19 abr. 2024.

PACHECO, Alexandre. **Apostila de Ligações em madeira**. 2015. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/282972467/Ligacoes-Em-Madeira>>.

PALMA, Pedro. **Fire behaviour of timber connections**. 2016. 111f. Tese (Doutorado em Ciências) – ETH Zürich, Suíça, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010836621>>.

PALMA, Pedro; FRANGI, Andrea; HUGI, Erich; CACHIM, Paulo; CRUZ, Helena. Ensaios de resistência ao fogo de ligações viga-pilar em madeira. *In: JORNADAS PORTUGUESAS DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS*, 5., 2014, Lisboa. **Anais [...]** Lisboa: LNEC, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.lnec.pt/handle/123456789/1006843>>. Acesso em: 12 jun. 2023.

PALMA, Pedro; FRANGI, Andrea; HUGI, Erich; CACHIM, Paulo B.; CRUZ, Helena. Fire resistance tests on steel-to-timber dowelled connections reinforced with self drilling screws. *In: 2nd Ibero-Latin-American Congress on Fire Safety Engineering (CILASCI)*, Coimbra, Portugal, 29 maio–1 jun. 2013. [S.l.: s.n.], 2013. Disponível em: <<https://repositorio.lnec.pt/jspui/handle/123456789/1006899>>.

PINTO, Edna Moura. **Determinação de um modelo para a taxa de carbonização transversal a grã para a madeira de E. citriodora e E. grandis**. 2005. 119f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. DOI:10.11606/T.88.2005.tde-31052006-163139.

RIEGEL, Izabel; MOURA, Angela B. D.; MORISSO, Fernando Dal Pont; MELLO, Fabiano de Souza. Análise termogravimétrica da pirólise da acácia-negra (*Acacia mearnsii* de Wild.) cultivada no Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Árvore**, v. 32, n. 3, p. 533-543, maio 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622008000300014>. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rarv/a/r7RTKXsgH5BwFCQ9V9Kwycm/?lang=pt#>>. Acesso em: 16 abr. 2024.

SANTOS, I. S.; OLIVEIRA, T. J. P.; COSTA, M. A.; NASCIMENTO, A. M.; ANDRADE, M. R. M. Physical and thermal properties of eucalyptus wood charcoal. **CERNE**, v. 26, n. 1, p. 72–80, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/01047760202026012728>

SILVA, Valdir Pignatta; SEITO, Alexandre Itiu; GILL, Alfonso Antonio; PANNONI, Fabio Domingos; ONO, Rosaria; SILVA, Silvio Bento; DEL CARLO, Ualfrido. **A segurança contra incêndio no Brasil**. Projeto editora: São Paulo, 2008.

VALLE, Ângela do. **Rigidez de ligações com parafusos em estruturas de madeira laminada colada**. 1999. 193f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

VIDAL, Maurício Felzemburgh. **Proteção passiva contra incêndios em hospitais: análise e aplicação**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia, Faculdade de Arquitetura, Salvador, 2016.