



AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE RESISTENTE DE LIGAÇÕES AÇO MADEIRA EM CORTE SIMPLES QUANDO SUBMETIDAS AO FOGO

FERNANDO MIGUEL GONÇALVES MACHADO

julho de 2023

AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE RESISTENTE DE LIGAÇÕES AÇO MADEIRA EM CORTE SIMPLES QUANDO SUBMETIDAS AO FOGO

Fernando Miguel Gonçalves Machado

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE RESISTENTE DE LIGAÇÕES AÇO MADEIRA EM CORTE SIMPLES QUANDO SUBMETIDAS AO FOGO

Fernando Miguel Gonçalves Machado

1181258

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Elza Maria Morais Fonseca.

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha orientadora, Professora Doutora Elza Fonseca, pela sua inestimável dedicação e disponibilidade. A sua presença e contributo constante, bem como o seu comprometimento em contribuir com recomendações altamente relevantes foram de suma importância para a concretização desta dissertação. Reconheço plenamente o valor da sua orientação, que não apenas enriqueceu o conteúdo do trabalho, mas também aprimorou minha própria compreensão do tema.

página propositadamente em branco

RESUMO

A utilização da madeira como material de construção em estruturas e edifícios representa, nos dias de hoje, um aumento significativo. Esse crescente aumento deve-se, entre outros aspectos, à preocupação ambiental (alterações climáticas) e ao facto deste material apresentar um comportamento seguro e previsível aquando da ocorrência de um incêndio.

Com a presente dissertação, sobre ligações de madeira e aço em corte simples e submetidas ao fogo, foi possível um melhor entendimento acerca do seu comportamento térmico e termomecânico, para diferentes tipos de configurações (aço-madeira e madeira-madeira), utilizando cavilhas em aço como elementos de ligação.

Inicialmente, efetuou-se uma revisão bibliográfica dos temas subjacentes à análise termomecânica de três tipos de ligações aço-madeira com cavilhas metálicas, particularmente: ligações inteiramente em madeira (MM), e ligações com madeira e uma chapa de aço fina (MAf) ou uma chapa de aço espessa (MAe). Foram abordadas também as propriedades mecânicas e térmicas da madeira e do aço; a análise do processo de carbonização na madeira e a sua velocidade; a resistência das ligações à aplicação de cargas; uma abordagem ao processo de transferência de calor aquando de um incêndio; as curvas nominais de incêndio e a análise ao impacto que a utilização da madeira impõe em termos de sustentabilidade. Após essa revisão bibliográfica, concluiu-se a inexistência de estudos na quantificação da resistência da madeira ao fogo, comparativamente a outros materiais.

No que diz respeito ao desenvolvimento do tema de dissertação, desenvolveu-se uma análise numérica termomecânica para diferentes tipos de ligações madeira-madeira e aço-madeira com cavilhas em aço, submetidas à tração em corte simples e expostas à ação do fogo. Consideraram-se, ainda, três tipos de madeira com massa volúmica distinta. Através destas simulações, foi possível determinar o campo de tensões de origem térmica e mecânica, com base no método dos elementos finitos. Numa primeira fase, calculou-se o campo de temperaturas nas ligações, através de uma análise térmica em regime transiente. Com base no perfil de temperaturas calculado e na aplicação de uma carga de tração incremental, determinou-se a capacidade resistente da ligação. Nas diferentes análises, foram considerados os materiais com comportamento não linear dependentes da temperatura. Os resultados permitiram, ainda, analisar a influência da massa volúmica da madeira, quer na resistência térmica da ligação, como também na resistência mecânica da ligação.

PALAVRAS-CHAVE

Eurocódigos; Incêndio; Aço; Madeira; Comportamento termomecânico; Ligações em corte simples.

página propositadamente em branco

ABSTRACT

The use of wood as a construction material in structures and buildings represents, nowadays, a significant increase. This increase is due, among other aspects, to environmental concerns (climate change) and to the fact that this material presents a safe and predictable behavior in fire situation.

With the present dissertation, on wood-steel connections in single shear and submitted to fire, it was possible to better understand their thermal and thermomechanical behavior, for different types of configurations (steel-wood and wood-wood), using dowels in steel as the connecting elements.

First of all, a state of the art was carried out underlying the thermomechanical analysis of three types of steel-wood connections with metallic dowels, particularly: connections entirely in wood (MM) and connections with wood and a thin steel plate (MAf) or a thick steel plate (MAe). The mechanical and thermal properties of wood and steel were also discussed; the analysis of the char layer evolution in wood and its charring ratio; the resistance of connections to the application of loads; an approach to the heat transfer process during a fire, the nominal fire curves, and the analysis of the impact that the use of wood imposes in terms of sustainability. After this bibliographical review, it was concluded that there are no studies on the quantification of fire resistance of wood, compared to other materials.

With regard to the development of the dissertation subject, a numerical thermomechanical analysis was developed for different types of wood-wood and steel-wood connections with steel dowels, submitted to tensile in simple shear and exposed to the fire action. Three types of wood with different densities were also considered. Through these simulations, it was possible to determine the stress field of thermal and mechanical source, based on the finite element method. In a first step, the temperature field in the connections was calculated, through a transient thermal analysis. Based on the calculated temperature profile and the application of an incremental tensile load, the strength capacity of the connection was determined. In the different analyses, materials with temperature-dependent nonlinear behavior were considered. The results also allowed analyzing the influence of wood density, both on the thermal resistance of the connection, as well as on the mechanical resistance of the connection.

KEYWORDS

Eurocodes; Fire; Steel; Wood; Thermomechanical behavior; Connections in single shear.

página propositadamente em branco

ÍNDICE

ABSTRACT	III
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABELAS	IX
LISTAS DE ABREVIATURAS, UNIDADES E SÍMBOLOS	XI
INTRODUÇÃO	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Metodologia	1
1.4. Estrutura da dissertação.....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Ligações Aço-Madeira e Madeira-Madeira	3
2.2. Materiais.....	7
2.2.1. Madeira	7
2.2.1.1 Propriedades mecânicas da <i>Glulam</i>	9
2.2.1.2 Propriedades térmicas da <i>Glulam</i>	10
2.2.2. Aço	13
2.2.2.1 Propriedades mecânicas do aço.....	13
2.2.2.2 Propriedades térmicas do aço.....	13
2.3 Transferência de calor.....	16
2.3.1 Condução.....	16
2.3.2 Convecção	17
2.3.3 Radiação	17
2.3.4 Curvas de incêndio	18
2.4 Carbonização.....	19
2.5 Comportamento mecânico das ligações.....	22
2.7 Sustentabilidade.....	25
3. Dimensionamento das ligações aço-madeira e madeira-madeira em corte simples.....	27
3.1. Dimensionamento à temperatura ambiente	27
3.2. Dimensionamento a altas temperaturas.....	31
4. Validação da metodologia utilizada	33
4.1. Validação térmica	33
4.2. Validação termomecânica	35
5. Modelos avançados por elementos finitos.....	37
5.1. Análise térmica.....	40
5.2. Análise termomecânica.....	43
6. Discussão de resultados.....	59

6.1. Temperaturas nodais nas ligações	59
6.2. Temperatura ao longo do comprimento da cavilha.....	62
6.3. Campos de temperaturas das ligações.....	63
6.4. Carbonização	64
6.5. Resistência mecânica das ligações ao fogo	68
7. Conclusão	73
7.1. Conclusões finais	73
7.2. Limitações e trabalhos futuros.....	74
Referências bibliográficas	63
Apêndice A	65
Apêndice B	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-Painéis de CLT [23]	8
Figura 2-Conductividade térmica da madeira em função da temperatura	11
Figura 3-Calor específico da madeira em função da temperatura	11
Figura 4-Massa volúmica dos três tipos de Glulam em função da temperatura	12
Figura 5-Módulo de elasticidade dos três tipos de Glulam utilizados em função da temperatura. 12	
Figura 6-Curvas tensão-deformação para as classes de madeira em estudo, dependentes da temperatura	13
Figura 7-Calor específico do aço em função da temperatura	14
Figura 8-Conductividade térmica do aço em função da temperatura.....	14
Figura 9-Deformação térmica do aço em função da temperatura	15
Figura 10-Fator de redução do módulo de elasticidade e da resistência em função da temperatura	15
Figura 11-Curvas tensão-deformação do aço, dependentes da temperatura.....	16
Figura 12-Curvas de incêndio	19
Figura 13-Evolução da profundidade de carbonização, d, em função do tempo (adaptado de [9])[9]	21
Figura 14- Modos de rotura em ligações madeira-madeira em corte simples [65][65]	24
Figura 15-Modos de rotura em ligações aço-madeira em corte simples [65][65].....	24
Figura 16-Modos de rotura em ligações em madeira: a) Rotura dúctil; b) c) d) e) Rotura frágil [66]	25
Figura 17-Ligação aço-madeira MM.....	27
Figura 18-Ligação madeira-madeira MAf e MAe	27
Figura 19-Número de cavilhas, função da carga aplicada, massa volúmica e diâmetro das cavilhas, para cada ligação.....	30
Figura 20-Representação das condições fronteira, malha de elementos finitos e pontos para medição da evolução da temperatura do modelo de validação	34
Figura 21-Comparação da evolução da temperatura nos pontos em análise, entre o modelo numérico desenvolvido e o modelo de referência	34
Figura 22-Representação do modelo termomecânico na ligação de validação	35
Figura 23-Comparação da carga resistente do modelo numérico e do modelo de referência em função do tempo de exposição ao fogo.....	36
Figura 24-Geometria das ligações em estudo: a) MM; b) MAf; c) MAe	38
Figura 25-Malha de elementos finitos das ligações em estudo.....	39
Figura 26-Fluxograma das etapas consideradas na simulação numérica	40
Figura 27-Representação das condições de fronteira térmicas nas ligações	41
Figura 28-Planos de corte para discussão de resultados	42
Figura 29-Pontos nodais para discussão de resultados	42
Figura 30-Modelo termomecânico e condições de fronteira nas ligações.....	43
Figura 31-Temperatura ao longo do tempo nos pontos considerados ao centro da ligação MM ..	59
Figura 32-Temperatura ao longo do tempo nos pontos considerados da ligação MAf: a) junta à chapa de aço; b) no centro da placa de madeira.....	60

Figura 33-Temperatura ao longo do tempo nos pontos considerados da ligação MAe: a) junta à chapa de aço; b) no centro da placa de madeira.....	61
Figura 34-Temperatura ao longo da cavila para 900s e 1800s, para a ligação MM	62
Figura 35-Temperatura ao longo da cavila para 900s e 1800s, para a ligação MAf	62
Figura 36-Temperatura ao longo da cavila para 900s e 1800s, para a ligação MAe	63
Figura 37-Campos de temperatura da ligação MM após 1800s	63
Figura 38-Campos de temperatura da ligação MAf após 1800s	64
Figura 39-Campos de temperatura da ligação MAe após 1800s	64
Figura 40-Carbonização na ligação MM após 900s.....	65
Figura 41-Carbonização na ligação MAf após 900s.....	65
Figura 42-Carbonização na ligação MAe após 900s.....	65
Figura 43-Velocidade de carbonização média para as ligações em estudo.....	66
Figura 44-Efeito da carbonização nas ligações em estudo, com a remoção do aço.....	67
Figura 45-Carga resistente da ligação MM em função do tempo de exposição ao fogo.....	68
Figura 46-Carga resistente da ligação MAf em função do tempo de exposição ao fogo.....	68
Figura 47-Carga resistente da ligação MAe em função do tempo de exposição ao fogo.....	69
Figura 48-Campo de temperaturas [°C] e tensão equivalente de Von Mises [MPa] na madeira GL32h da ligação MM a 720s	70
Figura 49-Campo de temperaturas [°C] e tensão equivalente de Von Mises [MPa] no aço da ligação MM a 720s	70
Figura 50-Campo de temperaturas [°C] e tensão equivalente de Von Mises [MPa] na madeira GL32h da ligação MAf a 320s	71
Figura 51-Campo de temperaturas [°C] e tensão equivalente de Von Mises [MPa] no aço da ligação MAf a 320s	71
Figura 52-Campo de temperaturas [°C] e tensão equivalente de Von Mises [MPa] na madeira GL32h da ligação MAe a 490s	72
Figura 53-Campo de temperaturas [°C] e tensão equivalente de Von Mises [MPa] no aço da ligação MAe a 490s	72

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1-Propriedades mecânicas à temperatura ambiente de três tipos de Glulam	9
Tabela 2-Propriedades térmicas da madeira	10
Tabela 3-Valores nominais das propriedades mecânicas do aço S275.....	13
Tabela 4-Propriedades térmicas do aço.....	14
Tabela 5-Distância dos espaçamentos entre os ligadores	29
Tabela 6- Carga resistente das ligações para diferentes massas volúmicas em estudo [kN].....	44

página propositadamente em branco

LISTAS DE ABREVIATURAS, UNIDADES E SÍMBOLOS

Lista de Abreviaturas

CLT	Madeira Lamelada Cruzada
CEN	Comité Europeu de Normalização
CO ₂	Dióxido de carbono
DF	<i>Douglas Fir</i>
EC1-1-2	Eurocódigo 1 parte 1-2
EC3-1-1	Eurocódigo 3 parte 1-1
EC3-1-2	Eurocódigo 3 parte 1-2
EC5-1-1	Eurocódigo 5 parte 1-1
EC5-1-2	Eurocódigo 5 parte 1-2
EN	<i>European Standard</i>
Gluman	Madeira Lamelada Colada
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MM	Ligação madeira-madeira
MAf	Ligação madeira-aço fino
MAe	Ligação madeira-aço espesso
NP	Norma portuguesa
P.Porto	Instituto Politécnico do Porto
SYP	<i>Spruce Yellow Pine</i>
SPF	<i>Spruce Pine Fir</i>

Lista de Unidades

°C	Graus celsius
g	Gramas
h	Hora
J	Joule
K	Kelvin
m	Metro
min	Minuto
mm	Milímetro
N	Newton
Pa	Pascal
s	Segundo
W	Watt

Lista de Símbolos

a_1	Distância do ligador mais próximo na horizontal
a_2	Distância do ligador mais próximo na vertical
$a_{3,t}$	Distância do ligador ao bordo na horizontal
$a_{4,c}$	Distância do ligador ao bordo na vertical
C_p	Calor específico
d	Diâmetro do ligador
E	Módulo de elasticidade
$E_{d,fi}$	Resultado das ações de projeto em situação de fogo
$F_{ax,Rk}$	Resistência ao arranque característica ao ligador
F_d	Carga aplicada à ligação
$F_{d,R}$	Carga resistente de projeto por ligador
$f_{d,fi}$	Resistência de projeto ao fogo
$f_{h,i,k}$	Resistência ao esmagamento característico
$f_{t,0,k}$	Resistência à tração paralela à fibra
f_u	Tensão de rotura do aço
$f_{u,k}$	Tensão de rotura característica do aço
$F_{v,R,k}$	Capacidade de carga característica por plano de corte e por ligador
f_y	Tensão de cedência do aço
$F_{v,Rd}$	Capacidade de carga por ligador e por plano de corte
h	Coefficiente de convecção
k	Coefficiente de condutividade térmica
k_{ar}	Coefficiente de condutividade térmica para o ar
k_{fi}	Coefficiente característico do material
k_{mod}	Fator de correção para a madeira
$k_{mod,fi}$	Fator de modificação para o fogo
l	Profundidade no aço
$M_{y,Rk}$	Momento de cedência plástico característico do ligador
N	Número total de ligadores
q''_{cond}	Fluxo de calor por condução
q''_{conv}	Fluxo de calor por convecção
q''_{rad}	Fluxo de calor por radiação
t	Tempo
t_i	Espessura dos elementos de madeira
T_{ar}	Temperatura do ar
α	Coefficiente de dilatação térmica
β	Rácio de resistência ao esmagamento
ε	Emissividade
θ	Temperatura

θ_g	Temperatura dos gases no compartimento do incêndio
θ_s	Temperatura à superfície
θ_{sur}	Temperatura do meio envolvente
θ_{∞}	Temperatura do fluido
η_{fi}	Fator de redução de carga de projeto de exposição ao fogo
ν	Coeficiente de Poisson
ρ_a	Massa volúmica do aço
$\rho_{g,k}$	Massa volúmica característica da madeira lamelada colada
γ_M	Fator parcial de segurança da madeira
$\gamma_{M,fi}$	Fator de segurança parcial relativo à madeira exposta ao fogo
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
$\sigma_{t,0,d}$	Tensão à tração nas fibras de madeira
Δl	Deformação térmica

página propositadamente em branco

INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

Na construção de edifícios modernos, de maiores dimensões, está a ser utilizada, cada vez mais, a madeira lamelada como elemento estrutural. Deste modo, é necessário conhecimento e ferramentas de projeto para avaliar a capacidade estrutural de elementos de madeira em situações de incêndio. Os edifícios de madeira são mais leves que os equivalentes em aço, apresentando vantagens significativas para os projetos de construção residencial urbana [1].

Perante uma situação de fogo, a estrutura em madeira deverá ser capaz de garantir a evacuação de todas as pessoas existentes, salvaguardando a segurança das mesmas. Para assegurar essa condição de segurança é necessária uma análise particular às partes mais frágeis das estruturas, ou seja, às diferentes ligações existentes. Com base nos Eurocódigos, é possível uma análise da resistência das ligações perante cargas, tanto em condições normais de temperatura como em caso de temperaturas elevadas.

1.2. Objetivos

O presente trabalho possui como objetivo principal, analisar o comportamento de ligações em aço-madeira perante situações de incêndio, tendo por base a regulamentação europeia para o projeto, bem como a utilização de modelos de cálculo analíticos e numéricos para a análise térmica e mecânica da ligação. Os materiais constituintes da ligação são não lineares e, em conjunto com as condições de carga térmica e mecânica, a que as ligações possam estar sujeitas, traduz-se na análise de um problema complexo. As ligações em estudo não são protegidas, submetidas a carregamento axial, traduzindo-se em esforços de corte simples, e em simultâneo a carregamento térmico pela influência da ação do fogo.

1.3. Metodologia

Relativamente à metodologia adotada para se alcançar os objetivos propostos foi a seguinte:

- Leitura, análise e compreensão dos Eurocódigos inerentes ao dimensionamento das ligações, não só à temperatura ambiente, mas, também, submetidas a situações de altas temperaturas pela ação do fogo;
- Pesquisa bibliográfica das propriedades dos materiais constituintes das ligações, abordadas à temperatura ambiente e a altas temperaturas;
- Pesquisa bibliográfica de estudos e testes realizados por investigadores, com vista a uma melhor compreensão do tema e dos avanços que foram conseguidos nos últimos anos;
- Estudo dos diferentes modos de transferência de calor úteis para a análise térmica no problema em estudo.
- Desenvolvimento de modelos numéricos para avaliação dos campos de temperaturas e da camada carbonizadas desenvolvidos nas ligações em estudo.

- Desenvolvimento de modelos numéricos para avaliação da capacidade resistente das ligações em estudo, quando submetidas a carregamento mecânico e térmico em simultâneo.

1.4. Estrutura da dissertação

Na presente dissertação foram abordados diferentes temas seguindo uma estrutura de apresentação, através da: introdução, revisão bibliográfica, dimensionamento das ligações aço-madeira e madeira-madeira em corte simples, validação da metodologia utilizada, modelos avançados por elementos finitos, discussão dos resultados e conclusão.

No presente capítulo foi exposta uma breve contextualização ao tema em estudo, precedido pelos objetivos e metodologias para o seu desenvolvimento.

No segundo capítulo, revisão bibliográfica, expuseram-se, cronologicamente, estudos e investigações científicas realizadas por autores ao longo dos últimos anos. Dividindo-se pelos subcapítulos, iniciou-se pelos diferentes tipos de ligações aço-madeira, sendo seguido pelas propriedades dos materiais, transferência de calor, carbonização, comportamento mecânico das ligações, em função das cargas aplicadas, e finalizando-se com o tema da sustentabilidade.

No terceiro capítulo, com base nas regras impostas pelo Eurocódigo 5, parte 1-1, foi realizado o dimensionamento das ligações aço-madeira e madeira-madeira em corte simples, verificando-se a máxima capacidade resistente da ligação.

No quarto capítulo, procedeu-se à validação prévia da metodologia numérica a utilizar-se no estudo das diferentes ligações em corte simples ao fogo, tendo por base a análise efetuada de uma ligação em corte duplo por outro autor.

No quinto capítulo, apresentam-se todas análises efetuadas aos modelos em estudo, bem como toda a metodologia de cálculo numérico envolvida.

No sexto capítulo, procedeu-se à discussão dos resultados obtidos em todas as ligações, relativamente aos resultados térmicos e termomecânicos.

Já no último capítulo, foi realizada uma análise crítica ao trabalho desenvolvido, referindo-se alguns aspetos relevantes e conclusões pertinentes que foram alcançadas, bem como algumas propostas de trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Ligações Aço-Madeira e Madeira-Madeira

As ligações em madeira são referenciadas em pesquisas de diferentes países. Inúmeros modelos analíticos e experimentais são desenvolvidos com vista a resolverem questões sobre este tipo de elementos. As ligações são consideradas como sendo a parte mais importante da estrutura em madeira, devido à sua capacidade de unir diferentes partes, transmitindo cargas e, portanto, necessitam de uma maior análise durante o projeto. No entanto, as ligações também são a parte mais fraca na estrutura, sendo que a sua durabilidade depende do seu dimensionamento [2].

Em 1990, Prior, *et al.* [3] referiram que o comportamento e desempenho das ligações em madeira eram limitadas, não existindo nenhum método para obter ou prever o comportamento das mesmas ao fogo, nem mesmo para calcular a sua capacidade de carga [4].

Em 1996, Noren J, *et al.* [5] testaram experimentalmente ligações em madeira pregadas, demonstrando que os pregos cederam nas longarinas centrais e laterais à temperatura normal. No entanto, numa situação de fogo, os modos de falha nas ligações com pregos alteraram devido à carbonização do membro de madeira [6].

Mais tarde, em 1999, Dhima D, *et al.* [7] realizaram testes em ligações de madeira e aço com parafusos, submetidos ao fogo.

Tanto em 2009 como em 2010, Lei Peng, *et al.* [4] [8] desenvolveram estudos, analisando a utilização de diferentes tipos de diâmetros e ligadores (pregos, cavilhas e parafusos) verificando assim, se o diâmetro seria um fator significativo na resistência da madeira ao fogo. Concluíram que o diâmetro efetivo dos pregos, cavilhas e parafusos, não é relevante. No entanto, com a utilização de parafusos de maior diâmetro, tanto a cabeça do parafuso, como o diâmetro de elementos associados (anilhas e porcas), em contacto com a face de madeira, contribuem para o aumento da transferência de calor para o interior da madeira, verificando que, para condições de temperatura normais, existe uma resistência de 20 minutos para as cavilhas e cerca de 15 minutos para pregos e parafusos. Deste modo, concluíram que é importante a proteção destes componentes. Lei Peng referiu, também, que quando a estrutura é sujeita ao fogo, as ligações, muitas vezes sem nenhum tipo de proteção, aquecem rapidamente, conduzindo a uma perda de rigidez e resistência significativas, transferindo calor para dentro da madeira, causando a carbonização célere da madeira, devido à grande condutividade térmica do metal [4].

Já em 2011, M. Audebert, *et al.* [9] referiram que nas estruturas constituídas maioritariamente por madeira, as ligações entre os diferentes elementos são as zonas mais frágeis ao nível da resistência da estrutura. Em situações de incêndio e em condições normais, as ligações garantem a capacidade de carga e o comportamento mecânico da estrutura. Devido à sua complexa geometria e variedade de materiais, o comportamento das ligações é difícil de prever [9].

Em 2012, M. Kalise, *et al.* [10] realizaram um estudo numérico, com base no método de elementos finitos em ligações de corte duplo com cavilhas, para a análise da carga máxima aplicada, até atingir a rotura. O modelo desenvolvido para o projeto de ligações com cavilhas, permitiu a simulação da falha em componentes tridimensionais (3D), permitindo efetuar uma previsão realista do seu comportamento, em função da aplicação de uma carga [10].

Também em 2012, Bo-Han Xu, *et al.* [11] referiram que existia uma limitação ao nível tridimensional (isto é, distribuição não uniforme em toda a espessura dos membros) com ligações longas, ligações com cavilhas a membros grossos de madeira e com cavilhas delgadas, apesar de nas duas últimas décadas terem sido realizados inúmeros modelos de elementos finitos bidimensionais (2D). Consideraram necessário desenvolver um método de elementos finitos 3D, para simular o comportamento do embutimento na madeira, com ligações de cavilhas, podendo-se prever a capacidade de suporte de carga, obter o campo de tensões e prever o comportamento de embutimento nas aplicações sem depender de extensivos testes empíricos. Nesse estudo, foi testado o modelo de madeira em compressão, tração e corte, utilizando o critério de falha de Hill modificado, alcançando uma boa correlação entre os resultados experimentais e a simulação por elementos finitos [11].

Ainda em 2012, M. Taazount, *et al.* [12] desenvolveram um modelo numérico para analisar o comportamento termomecânico de ligações com cavilhas e parafusos de porca, em ligações madeira-madeira, submetidas ao fogo e a cargas de tração paralelas à direção do grão. Para a validação do modelo 3D, utilizaram duas séries de resultados experimentais de testes realizados. O desempenho termomecânico das ligações foi determinado usando dois tipos diferentes de malhas de elementos finitos e de procedimentos de cálculo. O modelo térmico previa o cálculo dos campos de temperatura dentro dos componentes de ligação. Essa validação foi obtida por comparação com as temperaturas experimentais medidas em diferentes locais dentro das ligações. Já o modelo mecânico foi validado utilizando as curvas de carga-deslocamento das ligações em condições padrão. O modelo termomecânico foi validado considerando as curvas incrementais no tempo e determinada a classificação da resistência ao fogo das ligações. Concluíram uma boa relação entre os tempos de resistência ao fogo simulados e os experimentais [12].

Após dois anos, em 2014, Joachim Schmid, *et al.* [13] analisaram um total de 153 testes de resistência ao fogo (117 ligações sujeitas à flexão, 6 sujeitas à compressão e 30 sujeitas à tração) respeitando o método de secção transversal reduzido. Este método, segundo Schmid [13], foi originalmente desenvolvido em vigas de vão único, expostas a carregamentos de flexão, sendo introduzido no EC5-1-2 [14] para uma ampla variedade de elementos de madeira, incluindo colunas sob compressão e tração. A análise bibliográfica da aplicação desse método demonstrou que a maioria das referências eram de muito pouca qualidade, ou estavam incompletas para validar o modelo, e que os resultados com conteúdo de informação adequados continham um significativo desvio do método de secção transversal reduzido e revelaram que pode conduzir a um projeto não conservador. Para elementos em tração, os resultados do método foram adequados, tendo sido observados desvios significativos em elementos sujeitos à compressão e nos elementos à flexão resultados bastantes diversos. Deste modo, recomendaram a necessidade de existir uma revisão na abordagem no EC5-1-2 [14], para incluir os resultados de cálculos e testes adequados [13].

Também em 2014, D. Dhima, *et al.* [15] desenvolveram testes em ligações em flexão, sujeitas a cargas cíclicas, referindo que a folga existente entre os ligadores e a madeira teria pouca influência na resistência ao fogo das ligações [15].

Já em 2019, um consórcio, formado com parceiros de seis países da Europa através de um projeto de pesquisa conjunto e financiado por um programa do Noroeste Europeu, desenvolveu produtos

de madeira verdes e sem adesivos, usando, concomitantemente, sistemas de ligações como cavilhas de madeira comprimidas, com o objetivo de substituir os tradicionais adesivos, uma vez que são produtos com grandes quantidades de produtos químicos [16].

Também no ano de 2019, EL-Houjeyri, *et al.* [16], desenvolveram uma investigação experimental de engenharia num produto de madeira sem a utilização de adesivos. Os resultados da pesquisa demonstram a viabilidade do uso de cavilhas de madeira comprimida como elemento de junta, ligando laminados, elementos de madeira e substitutos de adesivos e ligadores metálicos, revelando uma clara potencialidade da cavilha de madeira comprimida termomecanicamente como ligador, garantindo a capacidade de carga [16]. A ideia de utilizar cavilhas de madeira na ligação de elementos estruturais não era nova. As cavilhas de madeira foram utilizadas com sucesso há muitos anos, partindo da ligação de elementos em estruturas de madeira em casas tradicionais. O uso de cavilhas de madeira comprimidas, garantindo a capacidade de carga, segundo EL-Houjeyri [16], era muito limitado e continuava a ser necessário um maior conhecimento do comportamento mecânico e do desempenho das ligações com cavilhas de madeira à compressão. Observaram que as cavilhas em madeira comprimida, contrariamente às cavilhas em metal, não provocavam a fragmentação dos membros de madeira, devido ao baixo rácio entre a rigidez da madeira das cavilhas e os membros em madeira, em comparação às juntas feitas com ligadores metálicos [16].

Já em 2021, A. Biró, *et al* [17] analisaram o comportamento das ligações com cavilhas em corte duplo, verificando o seu desempenho ao longo do tempo, perante uma situação de fogo (utilizando ligações do tipo madeira-aço com cavilhas e parafusos com porca), utilizando o programa OZone V2.0. As propriedades dos materiais foram consideradas com base no EC5-1-2 [14], desenvolvendo um modelo de elementos finitos com o programa ANSYS® [17]. Nesse mesmo estudo, A. Biró [17] referiu que o tamanho dos ligadores influencia o desempenho da ligação, significativamente. À temperatura ambiente, um ligador maior é favorável, porém, em caso de incêndio, um maior ligador irá provocar uma maior transferência de calor para o interior da madeira, aumentando a velocidade de carbonização. Este efeito é mais relevante no caso de secções transversais menores. Já a espessura do elemento de madeira, à temperatura ambiente, é negligenciável com ligadores de 10mm de diâmetro, observando uma diferença significativa quando comparados com modelos que utilizam ligadores de 16mm de diâmetro [17].

Também em 2021, E. Fonseca [18] desenvolveu uma tabela com inúmeras combinações de variáveis num projeto de ligações (diâmetro das cavilhas, carga aplicada, dimensões e propriedades dos materiais), à temperatura ambiente, permitindo um projeto seguro para ligações do tipo aço-madeira. Observou que, com diâmetros de cavilhas mais pequenos e para maiores cargas aplicadas, o número de cavilhas aumenta e que a massa volúmica da madeira não afeta significativamente o número de cavilhas necessárias [18].

Ainda em 2021, J.M. Cabrero, *et al.* [19] desenvolveram um modelo numérico, simulando o comportamento de ligações aço-madeira submetidas a carregamentos. Neste estudo, analisaram a rigidez rotacional e a distribuição de cargas entre as cavilhas, considerando o efeito do atrito entre os elementos de madeira, uma vez que possuem grande influência na rotação verificada. Os resultados foram validados com ensaios experimentais, tendo-se verificado uma concordância entre ambos. No entanto, em alguns casos, o modelo sobrestimava os valores da rigidez rotacional. Apesar de se considerar as ligações em madeira como sendo totalmente rígidas, a

pesquisa refere a necessidade de uma avaliação adequada relativamente à rigidez da ligação para que haja uma avaliação adequada dos requisitos da estrutura (estabilidade e facilidade de manutenção) [19].

Mais recentemente, em 2022, J. Luo, *et al.* [6] efetuaram alguns testes em ligações com parafusos entre vigas e colunas submetidas à flexão e ao corte, à temperatura ambiente e expostas ao fogo, desenvolvendo um modelo numérico 3D e validando os resultados com ensaios experimentais. A comparação dos resultados experimentais rotação-tempo com os obtidos pelo modelo termomecânico, revelou uma tendência concordante. Conforme este estudo, os modelos numéricos e experimentais podem melhorar o desempenho de ligações em madeira lamelada colada (*Gluman*) e podem ser utilizados na calibração e na abordagem do projeto em viga-coluna com ligação aparafusada sujeita à ação do fogo [6]. Estes autores referiram também que, considerando os requisitos arquitetónicos e de resistência, as ligações de madeira com chapa de aço ranhurada são frequentemente utilizadas em estruturas de postes e vigas *Gluman*. Por outro lado, quando a chapa de aço é central na ligação, a mesma fica protegida pelo membro lateral de madeira, quando exposta ao fogo, acabando por ter um melhor desempenho, comparativamente com ligações em aço-madeira-aço cujas placas de aço são laterais [6].

Ainda em 2022, E. Fonseca, *et al.* [2] analisaram o comportamento de três tipos de ligações em madeira, submetidas a corte duplo com cavilhas metálicas, utilizando as equações simplificadas do EC5-1-2 [14]. Obtiveram um total de oitenta e uma ligações, permitindo a determinação do número de cavilhas necessárias para a carga aplicada e verificar o efeito dos parâmetros das cavilhas juntamente com as características da madeira. Em todas, o número de cavilhas necessárias aumenta aquando do aumento da carga aplicada, da diminuição do diâmetro das cavilhas e da diminuição da massa volúmica da madeira. Também referiram que capacidade de carga característica por plano de corte e por cavilha também diminui com os parâmetros considerados anteriormente [2].

A produção de ligações requer o uso de diferentes regras com vista a garantir a segurança e a estabilidade estrutural. A resistência e a rigidez das ligações são critérios importantes a serem considerados para a manutenção de uma estrutura. Dependendo da aplicação, as ligações são garantidas utilizando parafusos, cavilhas e placas de aço, sendo mais prevalentes em estruturas maciças, uma vez que podem transportar cargas pesadas [2]. Deste modo, refere-se três tipos de ligações:

- Ligações de carpintaria, que envolvem elementos de madeira submetidos a cargas de compressão axial. Essas forças compressivas internas mantêm as superfícies em contacto próximo, com entalhes nos membros ligados [2]. Estas ligações não estão incluídas no EC5-1-2 [14], mas os regulamentos nacionais podem ser aplicados.
- Ligações coladas, sendo regularmente utilizadas em construções de madeira para unir novos elementos e reforçar elementos existentes. Existem vários tipos de ligações coladas, como articulações estruturais e hastes de aço coladas. Este tipo de ligação fornece maior resistência e melhor aparência estética em comparação com as conexões do tipo cavilha devido à inclusão de hastes de aço dentro da madeira [2].
- Ligações mecânicas, que são divididas em ligações do tipo cavilha e ligações do tipo rolamento. Ligações do tipo cavilha, como parafusos de porca e auto roscante, cavilhas e pregos, transmitem tensões de rolamentos e cargas axiais paralelas ao eixo da ligação. As

placas de ligação em aço são um caso particular de ligação do tipo cavilha, uma vez que combinam as ações de carregamento lateral das cavilhas e as propriedades de resistência das placas em metal [2].

2.2. Materiais

Para uma abordagem ao tema em questão, e para um melhor entendimento dos resultados posteriores, torna-se fundamental um conhecimento dos materiais e das suas propriedades mecânicas e térmicas a serem utilizados, mais concretamente da madeira e do aço.

2.2.1. Madeira

Os componentes de madeira existentes em estruturas são os elementos mais modernos e esteticamente mais utilizados por arquitetos e *designers*. Esta forte utilização deve-se a questões estéticas e de sustentabilidade, amplamente discutidas atualmente. Deste modo, é importante um nível de conhecimento acerca do comportamento da madeira em condições normais, mas, acima de tudo, do seu comportamento em situações de fogo, devendo sempre ser garantida a condição de assegurar a evacuação de todas as pessoas dentro de um edifício, em condições de incêndio [9]. No entanto, a utilização de madeira maciça em edifícios com muitos andares não é recomendada, devido à sua resistência ao fogo [1]. Atualmente, os materiais de engenharia em madeira possuem uma enorme potencialidade de mercado, devido ao aumento das construções modernas em madeira e de uma renovação nos últimos anos [16].

A queima da madeira dá-se de forma controlada, sendo que a maior imprevisibilidade se situa noutros componentes, tais como os pisos de um edifício, as vigas, os pilares, ou até mesmo as ligações existentes [9].

A madeira é classificada através de dois termos botânicos diferentes. Os termos “*softwood*” e “*hardwood*”, indicam a base estrutural e o tipo celular da humidade presente na árvore. A categoria “*softwood*” constitui a maioria das espécies coníferas (como é, por exemplo, o caso do pinheiro) e possuem geralmente texturas finas. Por outro lado, a categoria da “*hardwood*” (como é o caso dos eucaliptos e dos carvalhos) possui folhas grossas e a textura varia entre fina e grossa. Dos diferentes tipos de madeira podem destacar-se a “*hardwood*”, a “*softwood*” e a *Gluman* [20]. Há, no entanto, tratamentos que podem ser utilizados na madeira com vista a melhorar a sua resistência mecânica. A densificação é um desses tratamentos hidrotérmicos, particularmente para as madeiras de baixa massa volúmica, como é o caso da madeira obtida em árvores de crescimento rápido e de pequeno diâmetro, em florestas superpovoadas [21].

Em 2008, A. Cloutier, *et al.* [22] referiram que a densificação da madeira era um processo que estava a ser referido em diferentes pesquisas. O processo consiste na redução da porosidade, levando a um aumento da massa volúmica, aumentando as propriedades mecânicas. O processo consiste na injeção de resina, ou por compressão termomecânica, ou higro-termomecânica [16], [22].

Atendendo aos requisitos e às exigências mais recentes para a construção, surgiram no mercado novos produtos de madeira, tais como madeira compensada e a madeira lamelada [23], sendo que, entre os produtos de madeira lamelada, distinguem-se os produtos lamelados colados

(*Gluman*), onde sucessivas lamelações de madeira são orientadas na mesma direção do grão, e os produtos lamelados cruzados (CLT), onde as placas de madeira lamelada são dispostas na transversal alternadamente, destinando-se à utilização em lajes de piso e paredes onde é necessário suportar cargas em diferentes direções [1]. Deste modo, refere-se três tipos de madeiras utilizados atualmente:

- A madeira compensada é um material lamelado fabricado de finas camadas de folheado que são coladas com camadas adjacentes com o seu grão rodados até 90° entre si [23].
- Já a madeira lamelada cruzada (CLT) é uma das mais recentes inovações, espalhando-se pela Europa e pelo mundo, utilizada numa ampla gama de edifícios residenciais de um e de vários andares, edifícios de escritórios, entre outros [24]. É constituída por placas que são coladas lado a lado, numa única camada, e depois coladas a outra camada de tábuas dispostas transversalmente umas às outras num ângulo de 90°, com as camadas adjacentes [23] [25], tal como está ilustrado na Figura 1.



Figura 1-Painéis de CLT [23]

Na CLT, a espessura da cola possui uma influência bastante reduzida no seu comportamento térmico, contribuindo para a similaridade da CLT com a madeira maciça [26]. A espessura de uma simples camada está compreendida entre os 20 mm e os 50 mm, sendo que os painéis inteiros possuem espessuras compreendidas entre os 60 mm até aos 500 mm [27]. Por sua vez, a largura e o comprimento do painel é tipicamente 4.8 m e 20 m, respetivamente. Devido à configuração das camadas, a CLT possui propriedades mecânicas e físicas uniformes, bem como pode ser utilizado não apenas como painéis de suporte (paredes, pisos e telhados) mas, também, para divisórias e componentes estruturais lineares em edifícios [28]. Já quando a CLT é utilizada como elemento linearmente estrutural, apresenta resistência promissora contra o corte no plano e tensão perpendicular ao grão [23] [29]. Relativamente à produção de CLT, esta aumentou de 25000 m³ em 1996 para 340x10³ m³ em 2010. Já em 2014, a produção anual global foi de 600x10³ m³ e a expectativa era de que se alcançasse os 1x10⁶ m³ em 2016 [21].

- Por último, a *Gluman*, é um tipo de produto de madeira utilizado em construções de engenharia, composta por camadas unidas com adesivo estrutural duradouro e resistente à humidade [21], alinhadas paralelamente à direção das fibras [30]. A *Gluman* é um material atrativo devido às suas propriedades mecânicas, que dependem da rigidez e da resistência, sendo um material processado de forma rigorosa e com controlo de defeitos durante a produção [31]. A Áustria registava a maior produção de vigas lameladas coladas na Europa, em 2014, produzindo um valor de aproximadamente 1.5x10⁶ m³. Em 2016, nos

Estados Unidos da América e no Canadá a produção foi cerca de $395 \times 10^3 \text{ m}^3$ e $35 \times 10^3 \text{ m}^3$, respetivamente [16].

2.2.1.1 Propriedades mecânicas da *Glulam*

Sendo a madeira um material anisotrópico e ortotrópico, possui diferentes propriedades mecânicas para as diferentes orientações, sendo também afetadas pelo teor de humidade. No entanto, considerando a sua ortotropia, numa determinada direção as propriedades são constantes. As tensões de tração e compressão são diferentes, na mesma direção, ou nas direções paralelas e perpendiculares ao grão [11]. Relativamente às direções, estas são perpendiculares entre si, dividindo-se na direção radial (direção normal ao plano), longitudinal (direção paralela às fibras) e tangencial (direção normal ao plano formado pelas direções longitudinais e radiais) [32].

Em 2012, M. Kalise, *et al.* [10] realizaram uma modelação computacional de elementos em madeira para simular o seu comportamento mecânico. Todas as formulações dos materiais são definidas no ponto de integração para a direção radial, tangencial e longitudinal, sendo que essa orientação é justificada pela anisotropia da madeira. Deste modo, M. Kalise [10] subdividiu a modelação da madeira em três partes distintas: o comportamento elástico do material, a modelação da falha da madeira devido à carga de compressão e a modelação da falha frágil da madeira [10]. Tendo a madeira uma estrutura celular composta por lumens e paredes celulares, as células de madeira colapsam sob cargas compressivas. Na compressão paralela ao grão, a madeira apresenta amolecimento plástico. Na compressão perpendicular ao grão, verifica-se um comportamento dúctil, seguido de um endurecimento após o colapso das paredes celulares nos lumens e na madeira densificada [11].

Com base na norma BS EN 1194-1999 [33], pode estabelecer-se um sistema de classes de resistência, facilitando a comercialização da *Glulam* e possibilitando a combinação de várias matérias-primas, fabrico, qualidades e espécies. O sistema utilizado para referenciar uma madeira *Glulam* é através da configuração *GLxxx*. O último dígito desta referência indica se a *Glulam* é homogénea (“h”) ou combinada (“c”). A terceira e quarta posição da referência indica o valor da resistência à flexão. Na presente dissertação, as classes de madeira utilizadas foram a GL20h, GL24h e GL32h, sendo que a madeira utilizada nos modelos é do tipo bétula, que pertence ao grupo das *softwoods*, apresentando um coeficiente de Poisson (ν) de 0.4 e um teor de humidade de 12%. As propriedades mecânicas da *Glulam*, consideradas na presente dissertação, respeitando a norma EN 14080:2013 [34], estão representadas na Tabela 1.

Tabela 1-Propriedades mecânicas à temperatura ambiente de três tipos de *Glulam*

	Simbologia	GL20h	GL24h	GL32h
Resistência à tração paralela à fibra [MPa]	$f_{t,0,k}$	16,0	19,2	25,6
Módulo de elasticidade paralelo à fibra [MPa]	E	84000	11500	14200
Massa volúmica [kg/m ³]	ρ	370	420	480

Em 2012, E. Fonseca, *et al.* [35] analisaram o comportamento termomecânico em ligações com cavilhas, em duplo corte e submetidas ao fogo, utilizando o programa ANSYS®. Foram utilizados três tipos distintos de madeira, com diferentes massas volúmicas. Deste modo, determinaram a

resistência mecânica máxima na ligação, verificando-se a influência da massa volúmica da madeira na resistência mecânica da ligação exposta ao fogo. Concluíram que a capacidade de carga diminui com o tempo de exposição ao fogo e com a diminuição da massa volúmica da madeira. Também observaram que o decréscimo da capacidade de carga nos três tipos de madeira (GL20h, GL24h e GL32h) era maior para a madeira com menor massa volúmica, ou seja, após 300 segundos da exposição ao fogo, a madeira GL20h apresentou um decréscimo de 83% na capacidade de carga, a GL24h um decréscimo de 71% e a GL32h um decréscimo de 68% [35].

Já em 2019, EL-Houjeyri, *et al.* [16] realizaram um conjunto de testes, provocando alterações nas propriedades mecânica da madeira. Procederam à compressão de uma chapa de madeira para a fabricação das cavilhas, originando uma taxa de compressão de 68%. Após a realização de ensaios à flexão em 3 e 4 pontos observaram que, para além de uma melhoria significativa na capacidade de carga no centro das vigas sujeitas à flexão, também se verificava uma melhoria significativa no módulo de elasticidade, resistência mecânica e na massa volúmica, existindo um aumento da massa volúmica em cerca de 2.6 vezes, um aumento do módulo de elasticidade em 1.68 vezes e um aumento de 2.16 vezes do valor do módulo de rutura [16]. Deste modo, é possível concluir que as propriedades mecânicas da madeira, nomeadamente a massa volúmica, podem ser modificadas, levando a melhorias na resistência da madeira exposta ao fogo e submetida a cargas [35].

2.2.1.2 Propriedades térmicas da *Glulam*

A madeira possui uma boa resistência sob condições de fogo. Na maioria dos incêndios verificados, o fogo ocorre em objetos e noutros materiais presentes no edifício [12].

Em 2021, Okuni, *et al.* [26] desenvolveram um modelo numérico das propriedades estruturais térmicas da *Glulam*. Recorreram a algumas espécies distintas de madeira, tais como *Douglas Fir* (DF), *Spruce Yellow Pine* (SYP) e *Spruce Pine Fir* (SPF). Utilizaram o programa ANSYS®, verificando que as tensões máximas nos três tipos de espécies simuladas reduziram com o aumento da temperatura. SYP apresentou o maior nível de tensão, seguido pela DF e pela SPF. Deste modo, concluíram que diferentes espécies possuem diferentes propriedades térmicas e estruturais [26]. No que diz respeito ao coeficiente de expansão térmica (α), bem como a emissividade (ϵ) da madeira utilizada estão expostos na Tabela 2.

Tabela 2-Propriedades térmicas da madeira

	Simbologia	Valor
Coeficiente de expansão térmica [1/K]	α	4×10^{-6}
Emissividade [-]	ϵ	0,8

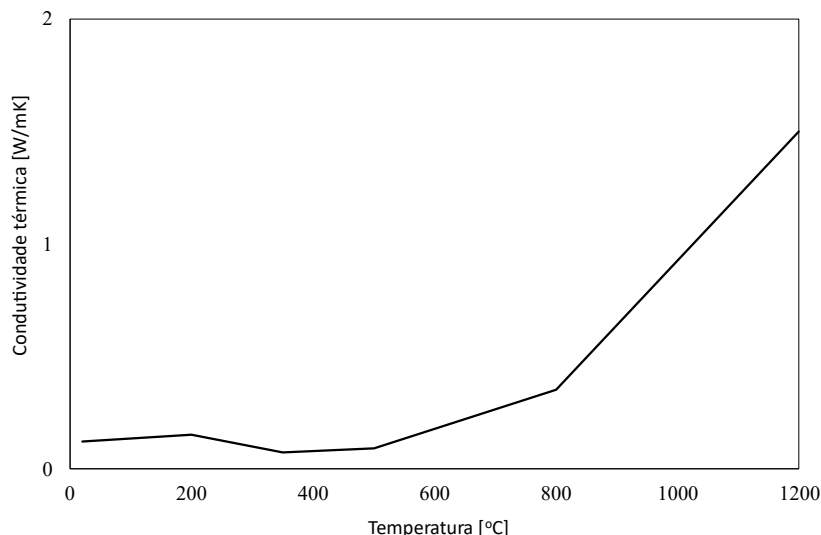


Figura 2-Condutividade térmica da madeira em função da temperatura

Com base no EC5-1-2 [14], verifica-se que uma das propriedades térmicas é a condutividade térmica (k), sofrendo alterações a partir de temperaturas próximas dos 500°C, tal como ilustrado na Figura 2, devido à influência das fissuras e da retração do material, aquando da carbonização.

Na Figura 3, verifica-se que o calor específico (C_p) possui um valor de pico aos 100°C, representando o valor necessário para evaporar a água presente na madeira [8] [36].

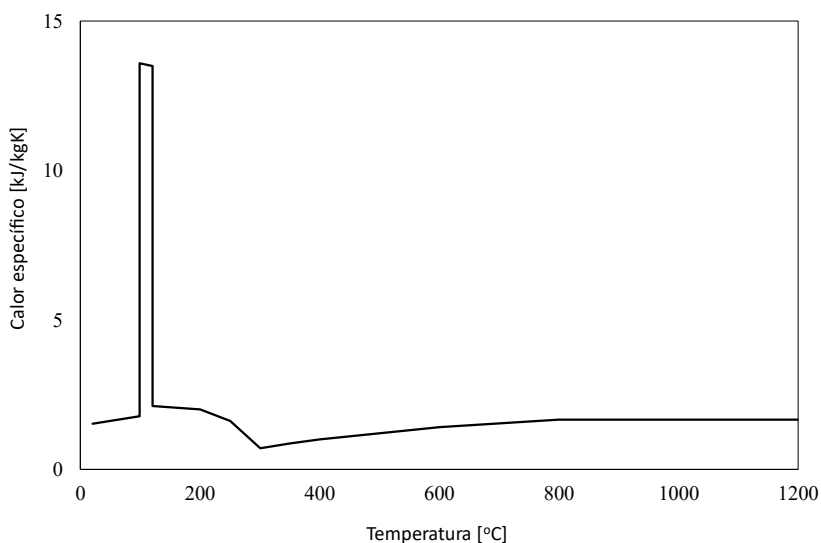


Figura 3-Calor específico da madeira em função da temperatura

Devido à evaporação da água, próximo dos 100°C, a massa volúmica (ρ) reduz próximo desse valor, uma vez que o teor de água existente na madeira (12%, segundo o EC5-1-2 [14]) verifica-se até ao ponto de ebulição da água. A massa volúmica, sofre um decréscimo aquando do aumento da temperatura. Este facto pode ser observado na Figura 4, verificando-se uma diminuição da massa volúmica para os três tipos de *Glulam*.

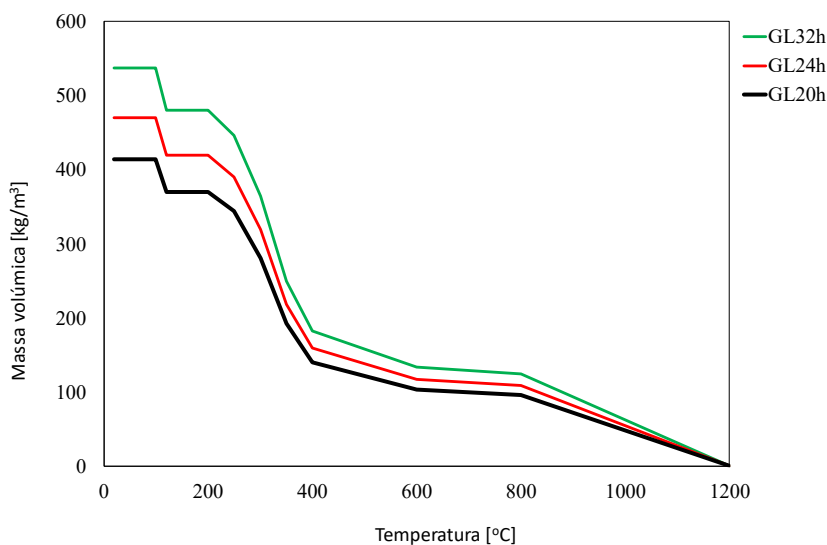


Figura 4-Massa volúmica dos três tipos da Glulam em função da temperatura

Relativamente ao módulo de elasticidade da madeira, submetida ao fogo e à tração, observa-se na Figura 5 o seu decréscimo aquando do aumento da temperatura, também para três tipos de *Glulam*.

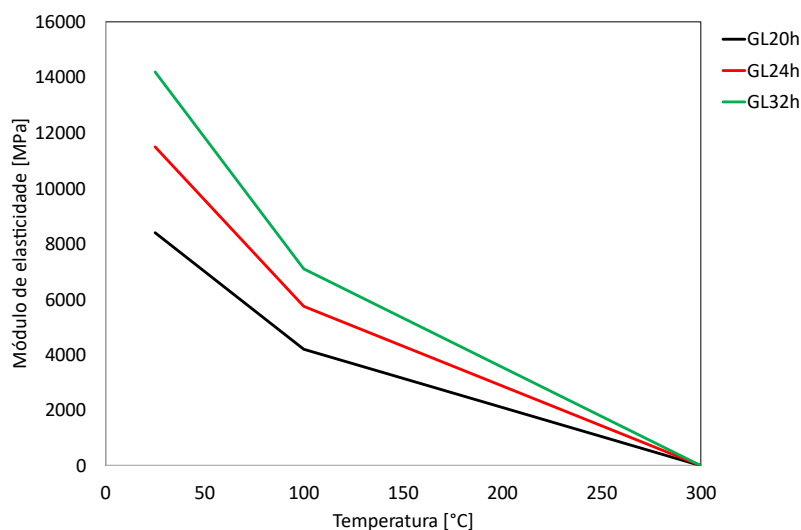


Figura 5-Módulo de elasticidade dos três tipos de *Glulam* utilizados em função da temperatura

Na Figura 6 podem observar-se as curvas tensão-deformação, em função da temperatura, para os três tipos de *Glulam*.

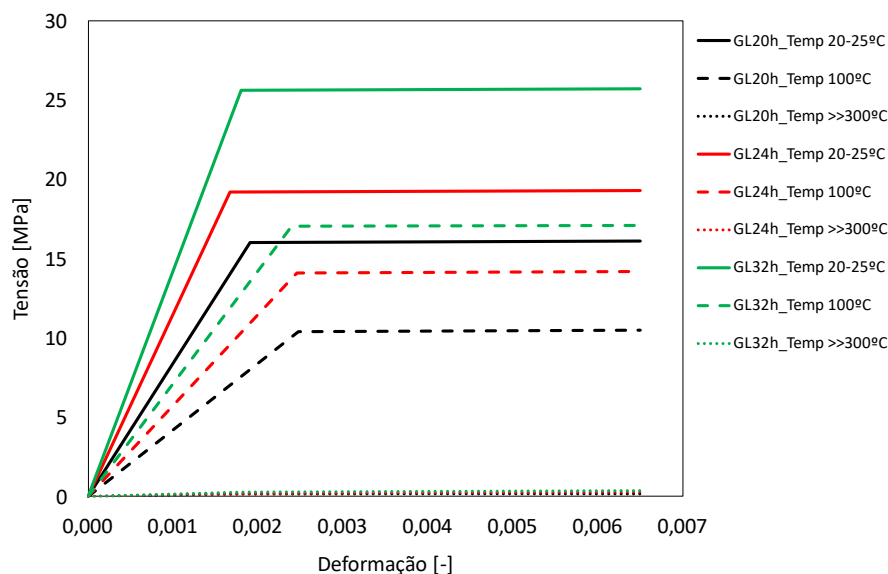


Figura 6-Curvas tensão-deformação para as classes de madeira em estudo, dependentes da temperatura

2.2.2. Aço

O aço é um material amplamente estudado na engenharia mecânica devido às suas excelentes propriedades, sendo um material bastante versátil. Possui um grande intervalo de propriedades mecânicas, como por exemplo as tensões de compressão e tração, a sua dureza e a capacidade de ser deformado plasticamente [37].

2.2.2.1 Propriedades mecânicas do aço

As propriedades mecânicas do aço podem ser analisadas na Tabela 3, para elementos com uma espessura inferior a 40mm, tendo por base o EC3-1-1 [38], que segue a norma EN 10025-2 [39]. Contrariamente à madeira, a massa volúmica permanece constante para uma evolução da temperatura [40].

Tabela 3-Valores nominais das propriedades mecânicas do aço S275

	Simbologia	Aço S275
Tensão de cedência [MPa]	f_y	275,0
Tensão de rotura [MPa]	f_u	430,0
Tensão de rotura característica [MPa]	$f_{u,k}$	400,0
Módulo de elasticidade [GPa]	E	210,0
Massa volúmica [kg/m ³]	ρ_a	7850,0
Coeficiente de Poisson [-]	ν	0,3

2.2.2.2 Propriedades térmicas do aço

Na Tabela 4 apresenta-se o coeficiente de expansão térmica (α) e a emissividade (ϵ) do aço utilizado no estudo, tendo por base o EC3-1-2 [42].

Tabela 4-Propriedades térmicas do aço

	Simbologia	Valor
Coeficiente de expansão térmica [1/K]	α	12×10^{-6}
Emissividade [-]	ϵ	0,7

O calor específico do aço (C_p) varia com o aumento da temperatura. Partindo de um conjunto de equações, dentro de intervalos de temperatura definidos [41], presentes no EC3-1-2 [42], foi possível verificar essa variação aquando do aumento da temperatura, conforme a Figura 7.

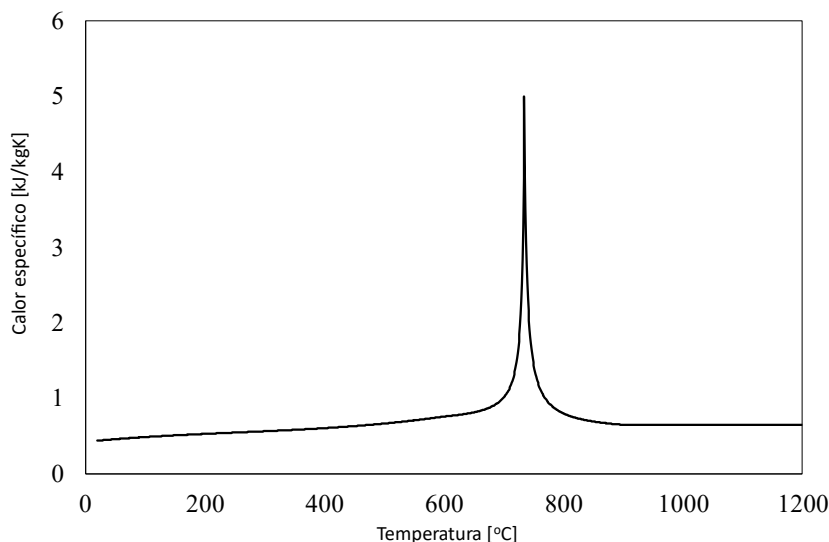


Figura 7-Calor específico do aço em função da temperatura

A condutividade térmica no aço (k) também é obtida por um conjunto de expressões do EC3-1-2 [42], originando o gráfico da Figura 8. A condutividade térmica, consiste na maior ou menor capacidade que o aço possui em transmitir calor. Tal como se verifica, a condutividade térmica do aço é bastante elevada. Porém, à medida que a temperatura vai aumentando, este valor vai diminuindo proporcionalmente, até estabilizar nos 800°C, mantendo-se constante.

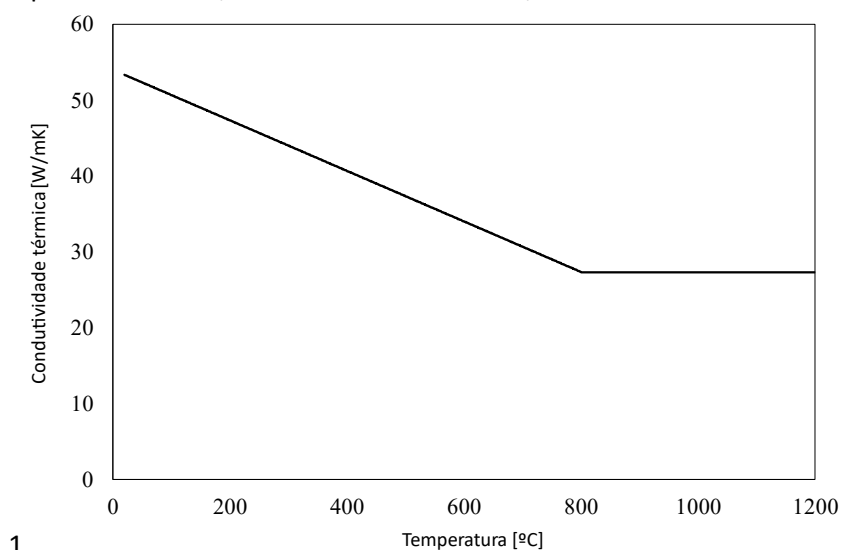


Figura 8-Condutividade térmica do aço em função da temperatura

Com base nos dados presentes no EC3-1-2 [42], pode analisar-se a deformação térmica no aço (Δ/l), aquando do aumento da temperatura, tal como ilustrado na Figura 9.

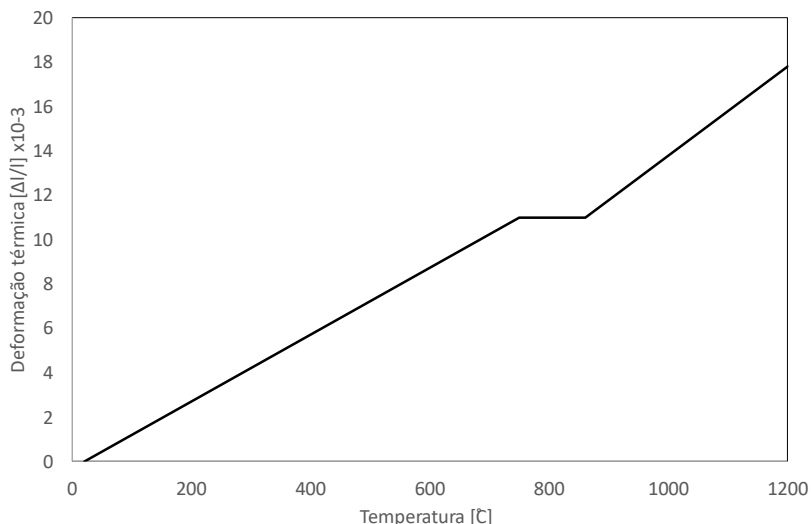


Figura 9-Deformação térmica do aço em função da temperatura

Para modelos de cálculo mais simples, o EC3-1-2 [42], permite que se utilize a equação (1) para a deformação térmica [43].

$$\frac{\Delta l}{l} = \alpha(\theta - 20) \quad (1)$$

Para uma análise termomecânica do aço, é necessário considerar a evolução das propriedades mecânicas, em função da temperatura. Para este tipo de análises, o EC5-1-2 [14] refere a utilização de um fator de redução das propriedades mecânicas para a madeira e o EC3-1-2 [42] para o aço [9].

Relativamente ao módulo de elasticidade do aço, o EC3-1-2 [44], apresenta o decréscimo do mesmo, em função do aumento da temperatura, tal como ilustrado na Figura 10.

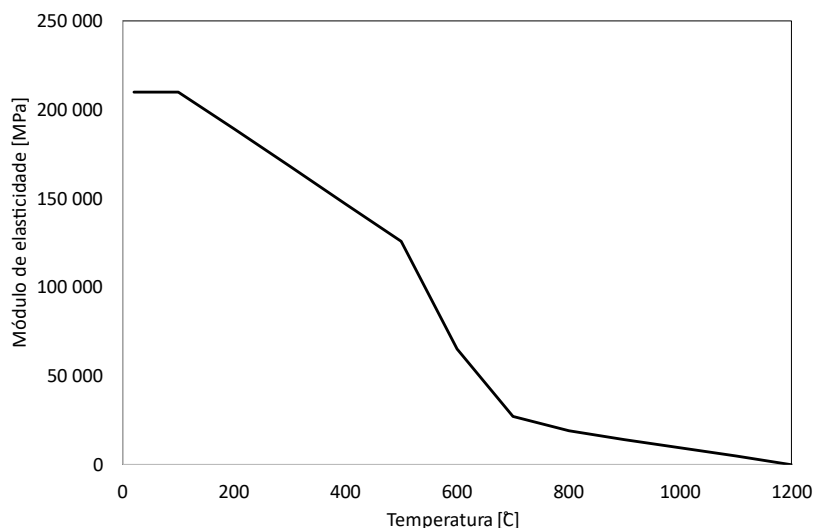


Figura 10-Fator de redução do módulo de elasticidade e da resistência em função da temperatura

No que diz respeito às curvas tensão-deformação, e para várias gamas de temperaturas, as mesmas podem ser observadas na Figura 11, tendo por base o EC3-1-2 [44].

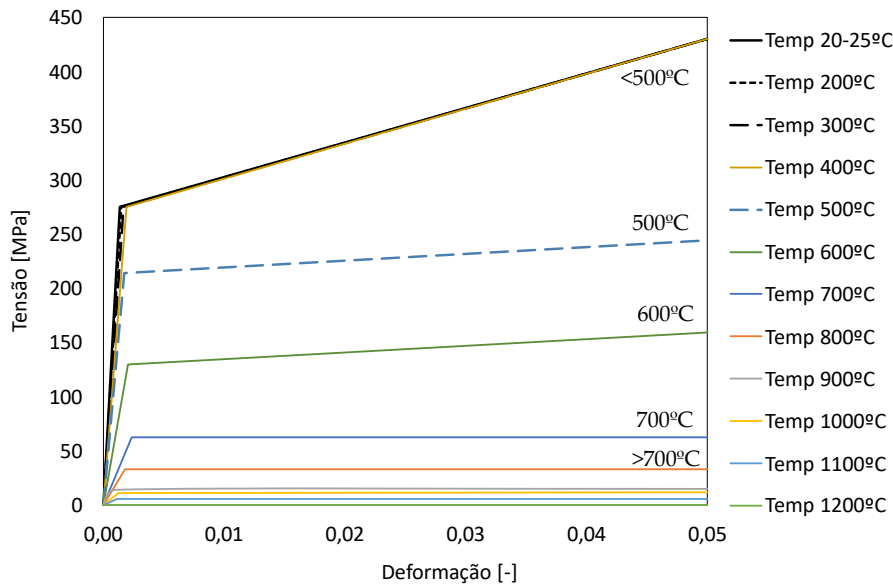


Figura 11-Curvas tensão-deformação do aço, dependentes da temperatura

2.3 Transferência de calor

Sendo a transferência de calor a ciência que estuda as trocas de energia entre dois sistemas, ou entre um sistema e o meio envolvente, devido à diferença de temperaturas [45], é necessário conhecer-se os mecanismos de transferência de calor envolvidos num incêndio: condução, convecção e radiação.

2.3.1 Condução

A condução é um modo de transferência de calor a nível molecular, através de um sólido ou fluido [45], ocorrendo devido à existência de uma diferença de temperaturas no meio, ou seja, das moléculas que possuem maior energia cinética (maior temperatura) para as moléculas com menor energia cinética (menor temperatura). Verifica-se a colisão atômica, sem que exista qualquer transferência de massa [45] [46], uniformizando a temperatura [47].

No caso de condições estacionárias, a transferência de calor por condução é diretamente proporcional ao gradiente da temperatura em dois pontos.

Em 1822, Jean Fourier, *et al.* [48] propõem a lei fundamental da transmissão de calor, referindo que o fluxo de calor, q''_{cond} , que atravessa uma determinada área, é proporcional ao produto da área pelo gradiente térmico [47] e à condutividade térmica do material, k . Esta lei é representada pela equação (2), onde o sinal negativo indica que o sentido do fluxo de calor é oposto ao gradiente da temperatura.

$$q''_{cond} = -k \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (2)$$

Já na equação básica de um regime transiente, equação (3), a condutividade térmica é constante, considerando o sólido como um elemento 3D infinitesimal, onde também depende do calor específico, c_p , do tempo, t , e da massa volúmica, ρ [47].

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \rho c_p \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3)$$

Para cálculos onde é necessário considerar a condutividade térmica do ar, k_{ar} , Janssens [49] [50], desenvolveu a equação (4), onde T_{ar} , representa a temperatura do ar.

$$k_{ar} = 0.024 + 7.05 * 10^{-5} * T_{ar} - 1.59 * 10^{-8} * T_{ar}^2 \quad (4)$$

2.3.2 Convecção

Na transferência de calor por convecção, existe a troca de calor entre um fluido em movimento e um sólido, quando possuem temperaturas distintas [47]. Podem observar-se dois tipos de convecção: natural e forçada. Quando o ar está em contacto com a superfície aquecida, a temperatura do ar aumenta, bem como o seu volume específico. Porém, a massa específica diminui, resultando na movimentação vertical ascendente do ar, criando-se um ciclo. Quando o movimento do fluido é imposto por algum equipamento, como um ventilador, bomba, ou explosões, designa-se de convecção forçada [45] [48] [51]. A equação (5) permite calcular a transferência de calor por convecção, onde o fluxo de calor, q''_{conv} , depende do coeficiente de transferência de calor por convecção, h , e da diferença entre a temperatura da superfície, θ_s , e da temperatura do fluido, θ_{∞} .

$$q''_{conv} = h(\theta_s - \theta_{\infty}) \quad (5)$$

Esta transferência de calor é dos fatores mais relevantes num incêndio, uma vez que é responsável pelo transporte de gases quentes, pela movimentação ascendente do fumo e também pela propagação das chamas [52].

2.3.3 Radiação

Contrariamente às outras transferências de calor abordadas, a radiação consiste num mecanismo de transferência de calor particular, pelo facto de não necessitar de matéria para se propagar, consistindo na troca de energia calorífica através de ondas eletromagnéticas [53]. Pode surgir em simultâneo com a condução e a convecção [45], sendo que em qualquer superfície com temperatura superior a zero absoluto, é possível emitir radiação, dependendo das características da superfície [48]. O corpo negro representa uma idealização física de um corpo (superfície), absorvendo toda a radiação eletromagnética e sendo um irradiador ideal. Qualquer superfície, como por exemplo uma superfície metálica polida, não absorve nem emite a mesma quantidade de energia que um corpo negro, no entanto, são denominados por corpos cinzentos. Assim sendo, surge o conceito de emissividade, representando a maior ou a menor capacidade de uma superfície cinzenta emitir ou absorver radiação como uma superfície negra ideal [53].

O fluxo da troca de calor por radiação, q''_{rad} , é obtido através da equação (6), onde a emissividade, ε , toma valores entre 0 (quando o corpo não emite energia e só reflete) e 1 (quando se trata de um corpo negro em que só absorve energia), a constante de Stefan-Boltzmann, σ , igual a $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$, função da temperatura da superfície, θ_s e da temperatura do meio envolvente, θ_{sur} .

$$q''_{rad} = \varepsilon\sigma(\theta_s^4 - \theta_{sur}^4) \quad (6)$$

Ainda relativamente à emissividade, a mesma possui um valor de 0,8 para o aço, segundo o EC3-1-2 [42] e de 0,7 para a madeira, tendo por base o EC5-1-2 [14].

2.3.4 Curvas de incêndio

A ação de incêndio pode ser tratada através de modelos designados por curvas nominais de temperatura-tempo, não dependendo de parâmetros físicos [54]. Deste modo, o EC1-1-2 [55] apresenta equações a utilizar, para a caracterização da ação do fogo, com vista à análise térmica de elementos estruturais.

Conforme descrito no EC1-1-2 [55], a análise do comportamento ao fogo, quando o mesmo é registado no exterior de uma estrutura. Sendo esta a zona que representa a parte resistente da estrutura sujeita ao fogo [54], deve utilizar-se a curva nominal de elementos exteriores. A temperatura dos gases quentes, de acordo com a curva nominal de elementos exteriores é obtida pela equação (7).

Nessa equação θ_g é a temperatura dos gases no compartimento do incêndio [°C]; t , é o tempo decorrido do incêndio [min].

$$\theta_g = 660 * (1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}) + 20 \quad (7)$$

A curva nominal de incêndio padrão ISO 834 apresenta temperaturas bastante superiores às naturais em caso de incêndio, nomeadamente no exterior da ligação e nos elementos de aço (devido à alta condutividade térmica) [17]. Esta curva é generalizada e utilizada nos diferentes modelos de ensaios, sendo descrita pela equação (8) conforme o EC1-1-2 [55].

$$\theta_g = 20 + 345 * \log_{10}(8t + 1) \quad (8)$$

A curva de incêndio de hidrocarbonetos é principalmente utilizada em projetos de armazéns industriais, quando o combustível principal do incêndio é o petróleo, gás natural, solventes plásticos, entre outros, ou aquando de projetos de túneis [56]. A curva é obtida com recurso ao EC1-1-2 [55], através da equação (9). Comparando com a curva de incêndio para elementos exteriores, a curva de hidrocarbonetos possui uma evolução da temperatura muito acentuada, necessitando de cerca de 8 minutos para atingir os 1000 °C.

$$\theta_g = 1080 * (1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20 \quad (9)$$

As três curvas de incêndio referidas estão ilustradas na Figura 12.

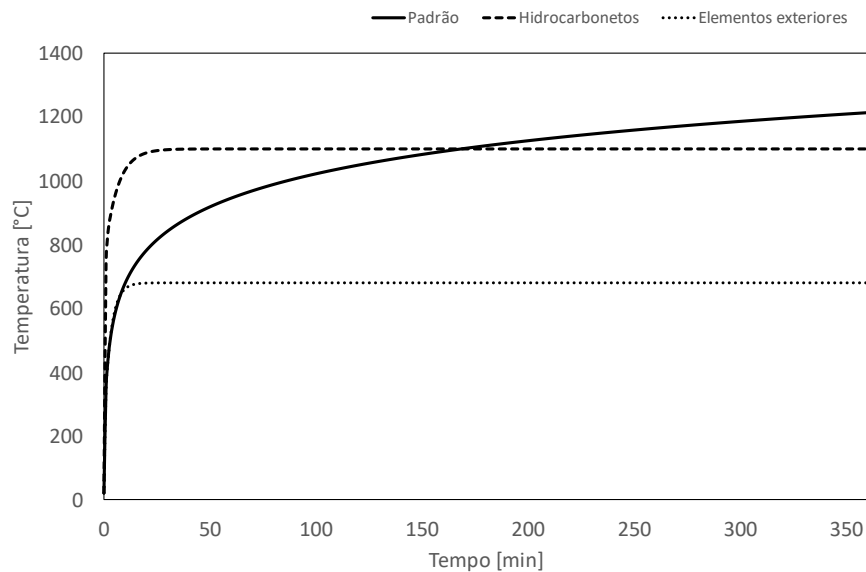


Figura 12-Curvas de incêndio

2.4 Carbonização

A segurança de uma estrutura em madeira depende da sua carbonização, uma vez que é a parte da madeira não carbonizada que suporta as cargas existentes [57]. A madeira possui uma boa resistência ao fogo, devido ao isolamento fornecido pela camada de carvão que se forma durante a exposição ao fogo, protegendo o seu núcleo de mais aquecimento, tornando previsível a taxa de carbonização.

Sendo a madeira combustível, os projetistas de edifícios devem garantir condições para que a madeira alcance a autoextinção [1], onde as condições não estão bem definidas, com taxas críticas de perda de massa entre os 2,5 g/m²s e os 5,0 g/m²s [58]. Para a avaliação dos riscos na utilização da madeira como material de construção, existem um conjunto de parâmetros fundamentais: a pirólise, a ignição, a combustão e a extinção.

- A pirólise consiste no processo pelo qual os materiais se decompõem aquando expostos ao calor, verificando-se mudanças químicas e físicas [58]. Ocorre no início do processo de carbonização, verificando-se a libertação de voláteis [53]. A pirólise distingue-se da combustão, uma vez que se refere à decomposição térmica de uma substância, é endotérmica e pode ocorrer sem a existência de um oxidante. Na maioria dos casos relevantes para a construção em madeira, a pirólise ocorre sobre uma zona relativamente estreita perpendicular à face exposta do material. A madeira regista três estágios principais de pirólise, devido à sua condutividade térmica e massa volúmica reduzidas e ao calor específico relativamente alto: desidratação (processo de pirólise muito lenta, abaixo dos 200°C), início da pirólise (até aos 300°C) e pirólise rápida (acima de 300°C) [58]. A pirólise da madeira produz carvão, possuindo propriedades de resistência mecânica desprezáveis. No entanto, possui uma baixa condutividade térmica, fornecendo o isolamento da madeira no seu interior. Abaixo da camada carbonizada, existe uma zona de madeira aquecida, também com propriedades mecânicas reduzidas, sendo esta zona tipicamente designada de zona termicamente afetada [1].

- Já a ignição é definida pelo menor fluxo de calor ou pela menor temperatura superficial crítica para a qual ocorre a mesma. O valor desse fluxo está compreendido entre os 10 e 13 kW/m². Existe uma maior dispersão de valores relativamente à temperatura crítica, no entanto, em cada caso, a ignição ocorre sob temperaturas abaixo daquelas verificadas em incêndios (entre 900°C e 1100°C). As propriedades da ignição variam em função da configuração do teste realizado, da temperatura ambiente e do modo de transferência de calor. A temperatura de autoignição pode variar em mais de 150°C no mesmo material [58].
- Após a ignição, a madeira irá apresentar a combustão. Este processo envolve a mistura de gases da pirólise com o meio ambiente. O calor da combustão na madeira está compreendido entre 15-20 MJ/kg, sendo que 50% a 75% é libertado por chama e o restante por combustão lenta. Após a ignição, a maior parte do oxigénio existente será consumido pela chama, portanto, a decomposição térmica ocorrerá num ambiente alterado [58].
- A extinção é uma consideração importante quando são utilizados produtos de madeira dentro de um compartimento. Qualquer madeira irá adicionar maior intensidade na combustão, sendo relevante entender em que condições existe a extinção, no entanto, é um processo de difícil previsão. Para que se verifique a extinção, o fluxo de massa de gases inflamáveis deve decrescer abaixo de um valor crítico [58].

Relativamente à taxa de carbonização, esta diminui lentamente ao longo do tempo de exposição ao fogo [4] [57]. Isto deve-se à evolução do efeito que a parte carbonizada possui na superfície da madeira [9], impedindo o avanço do fogo, pelo que o restante material não sofre alterações nas suas propriedades mecânicas, podendo exercer as suas funções estruturais [52].

Em 2010, Lei Peng, *et al.* [4] analisaram as taxas de carbonização para diferentes tipologias. Analisaram um conjunto de testes de outros investigadores, acerca da taxa de carbonização dos elementos em estudo, modificando a tipologia (madeira-madeira e aço-madeira) e alternando o elemento de ligação (entre parafusos e cavilhas). Observaram que a ligação aço-madeira possuía uma taxa de carbonização superior à ligação madeira-madeira (devido à existência de uma chapa de aço, com elevada condutividade térmica, entre as chapas de madeira), e também que a utilização de cavilhas em detrimento de parafusos, diminui a taxa de carbonização. Deste modo, a taxa média de carbonização na ligação madeira-madeira e na ligação aço-madeira era de 0.7 e 0.8 mm/min, respetivamente [4].

Um ano depois, em 2011, M. Audebert, *et al.* [9] desenvolveram um modelo numérico com vista a analisarem o comportamento termomecânico de uma ligação aço-madeira exposta ao fogo. Comprovaram que as taxas de carbonização também variam consoante a face que está a ser analisada. A média das taxas de carbonização analisadas para as faces laterais situavam-se nos 0.71 mm/min, enquanto para as faces do topo situavam-se nos 0.88 mm/min [9]. Ainda nesse estudo, e analisando a Figura 13, é visível o aumento acentuado da profundidade de carbonização, d , nos primeiros 10 minutos de exposição ao fogo, que impõe a taxa de carbonização superior na fase inicial do processo, tal como foi referido, em 2010, por Lei Peng [4].

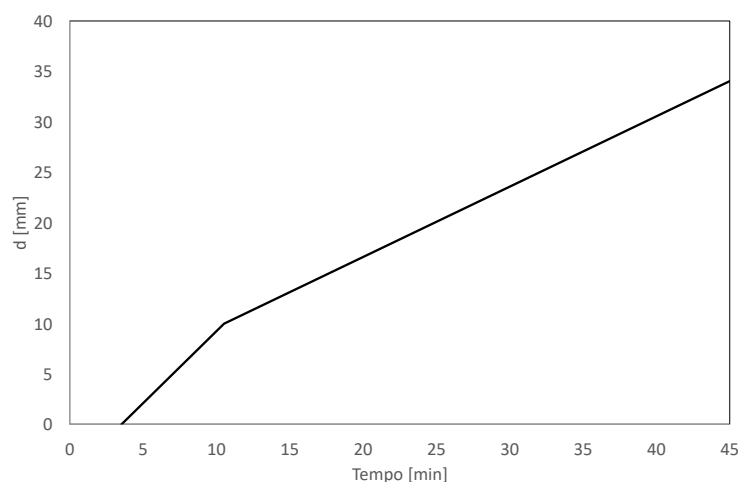


Figura 13-Evolução da profundidade de carbonização, d , em função do tempo (adaptado de [9])

Com base no EC5-1-2 [14], verifica-se que a profundidade de carbonização representa a distância entre a superfície externa do elemento original e a posição da linha de carbonização, isométrica a 300°C [18]. De acordo com o EC5-1-2 [14], a taxa da carbonização é 0,65 mm/min, não contabilizando o efeito dos arredondamentos de cantos, e 0,7 mm/min, contabilizando o efeito dos arredondamentos, para as “softwoods” com uma massa volúmica superior a 290 kg/m³ (onde está inserida a *Glulam*). Para determinar a profundidade de carbonização são realizadas medições unidimensionais, através de uma escala, ou através de imagens para uma posterior avaliação [13].

Mais tarde, em 2013, M. Taazount, *et al.* [12] referiram que os baixos valores da taxa de carbonização, com a progressão do incêndio, devem-se a uma ausência de oxigénio no meio envolvente [12].

Já em 2018, I. Bartlett, *et al.* [58] desenvolveram uma análise à literatura sobre resistência ao fogo, referindo que a taxa de carbonização varia com as propriedades do material, em particular com a massa volúmica e o teor de humidade, provocando uma variabilidade máxima de 18% [58].

Em 2021, E. Fonseca, *et al.* [18] analisaram a taxa média de carbonização em ligações aço-madeira, não protegidas, verificando que a taxa de carbonização aumenta com a progressão do fogo, no entanto, diminui com o aumento do diâmetro da cavilha e também com o aumento da massa volúmica da madeira, independentemente do efeito do arredondamento de cantos [18]. O arredondamento dos cantos ocorre devido à não uniformidade e ao aumento de gradientes de carbonização próximo dos cantos, quando a *Glulam* é exposta a três ou quatro lados ao fogo [1].

A secção do núcleo de madeira pode permanecer a baixas temperaturas, dependendo da exposição ao fogo e do tamanho do elemento. A taxa de carbonização e a espessura da camada de carvão formado são fatores relevantes para a segurança do edifício, uma vez que determinam a secção transversal de suporte da carga residual, devido às condições críticas extremas [20].

Por outro lado, a espessura dos elementos de madeira representa o parâmetro que mais determina o comportamento ao fogo na ligação. Por exemplo, para uma ligação estritamente idêntica, 20 mm de aumento de espessura nos membros de madeira, significa um aumento da resistência ao fogo entre 30% a 70%, dependendo da carga que esteja a ser aplicada [50] [59].

2.5 Comportamento mecânico das ligações

A intensidade das cargas aplicadas é um aspeto relevante para as ligações. Para condições de segurança, em situações de fogo, a redução da carga provoca um aumento da resistência das ligações [4], [8]. As ligações são responsáveis pelo desempenho mecânico das estruturas à temperatura ambiente ou submetidas ao fogo [6], sendo que não devem falhar durante o incêndio, até que se verifique o arrefecimento da estrutura [1].

Em 1921, S. Ingberg, *et al.* [60] realizaram um conjunto de testes experimentais em colunas de madeira maciça, submetidas ao fogo. Demonstraram que as colunas quando tinham uma carga 10% acima, desempenhavam a sua função de suporte durante mais tempo do que colunas de aço desprotegidas, quando submetidas ao fogo, perante condições de nível de carga semelhantes.

Já em 2010, M Audebert, *et al.* [59] referiram que para ligações com diâmetros de ligadores idênticos e iguais espessuras de madeira, testadas com uma carga relativamente ao grão a 45°, apresentavam uma duração de resistência ao fogo inferior aquelas ligações com um ângulo de 90°. Concluíram que a resistência das ligações era menor à medida que reduziam o referido ângulo, até ao valor de 0° [50].

Um ano depois, em 2011, M. Audebert, *et al.* [9] referiram que a evolução do módulo de elasticidade da madeira é o mesmo, tanto para a tração como para a compressão. Deste modo, a evolução do fator de compressão é utilizada, uma vez que a madeira é principalmente carregada à compressão dentro da ligação. De igual modo, a redução do fator do módulo de elasticidade na direção paralela ao grão é utilizada para a redução do módulo de elasticidade na direção perpendicular ao grão [9].

Em 2012, Elza Fonseca, *et al.* [20] analisaram o comportamento termomecânico de vigas de madeira simplesmente apoiadas, submetidas ao fogo e a cargas mecânicas. Identificaram diferentes equações analíticas que permitem calcular o nível de tensão, com base na seção reduzida do elemento [20].

Também em 2012, M. Kalise, *et al.* [10] referiram que existe uma relação proporcional entre a carga aplicada e o diâmetro da cavilha utilizado. Se o diâmetro for constante, a carga máxima verificada aumentará conforme o aumento da espessura do componente de madeira. Caso contrário, a influência da espessura é praticamente desprezável. Comparando a última carga verificada à tração e à compressão, verificaram que o valor à compressão é superior ao que se observa na tração (com um ângulo das fibras na direção da aplicação da força de 90°). Estabeleceram simulações para todo o tipo ligações em madeiras utilizando cavilhas, variando o tipo de carga (compressão ou tração), o ângulo das fibras da madeira (dos elementos exteriores e do meio), bem como o diâmetro das cavilhas, quando se verificava a carga máxima. Os resultados revelaram um domínio praticamente total da falha frágil em todas as ligações sujeitas à tração, com exceção de um caso. Também salientaram que todas as combinações, em que o ângulo das fibras em relação à carga era de 90°, sujeitos a tração, sofriam falha perpendicularmente à fibra, onde estes tipos de falhas são caracterizados por roturas perpendiculares à direção do carregamento [10]. A madeira apresenta uma rutura frágil devido ao carregamento de tensões perpendiculares às fibras ou de corte na direção das fibras. Este comportamento é caracterizado por rachaduras e amolecimento rápido. O comportamento de amolecimento pode ser considerado utilizando elementos coesivos (elementos de interface). Esse tipo de elementos

definem uma superfície de falha discreta e permitem a definição de uma relação normal de abertura de fissuras por tração e corte [10].

Ainda em 2012, Bo-Han Xu, *et al.* [11] realizaram testes com amostras carregadas na direção paralela ao grão, verificando que a falha ocorreu prematuramente pela divisão paralela ao grão. A ruptura frágil está relacionada com as tensões de tração perpendiculares ao grão e com as tensões de corte [11]. Também verificaram que, sob cargas perpendiculares ao grão, a principal falha é o esmagamento das fibras de madeira [11].

Já em 2019, Z. Li, *et al.* [61] referiram que, embora as direções das cargas aplicadas serem distintas nas ligações em madeira em pesquisas anteriores, poucas se focaram nas ligações viga-coluna pela combinação de carregamentos [61].

Também em 2019, F. Wiesner, *et al.* [1] analisaram dados disponíveis para projetar a resistência ao fogo de elementos em madeira maciça lamelada sujeitos à compressão, apresentando e comparando dados históricos de testes de resistência ao fogo, com os métodos de cálculo de projeto disponíveis. Demonstraram que os métodos disponíveis são capazes de fazerem previsões razoáveis com um erro médio de 22% relativamente à resistência ao fogo em colunas de *Glulam* expostas a incêndios normais. No entanto, para os métodos disponíveis para a CLT, os resultados apresentam um erro médio de 46%, referindo a necessidade de se efetuar pesquisas adicionais em elementos à compressão [1].

Várias investigações têm sido realizadas com vista a determinar o comportamento mecânico nas ligações submetidas à rotação. Em 2015, T. Mori, *et al.* [62] analisaram o desempenho em ligações viga-coluna, referindo que a resistência total do momento e a rigidez da ligação aumentaram com a profundidade da ligação, enquanto a ductilidade diminuiu [62].

Também em 2015, K. Bader, *et al.* [63] analisaram o comportamento de cavilhas individuais numa ligação submetida à flexão. As ligações foram reforçadas com vista a atingirem um comportamento dúctil. Deste modo, testaram as ligações aço-madeira utilizando nove cavilhas em aço de diferentes diâmetros, dispostas de forma circular e quadrangular. Verificaram que a capacidade do momento e a rigidez rotacional foi maior para a disposição quadrangular. Classificaram dois tipos de deformação na cavilha: deformação por esmagamento, definido como deformação individual relativa das cavilhas na placa de aço em relação à sua posição inicial; e deformação por flexão, considerada como deformação relativa da extremidade das cavilhas em relação à chapa de aço. No caso das cavilhas de 12 mm de diâmetro, a deformação por flexão foi maior que a deformação por esmagamento, enquanto a mesma foi menor no caso das cavilhas com 20 mm de diâmetro. As cavilhas carregadas paralelamente ao grão, apresentaram maiores deformações de flexão do que as cavilhas carregadas perpendicularmente ao grão. Concluíram que o carregamento das cavilhas individuais na ligação, depende da sua localização [63].

Já em 2018, N. Dourado, *et al.* [64] verificaram a influência do espaçamento entre as cavilhas na rigidez inicial e na capacidade de carga do momento, na ligação formada por dois elementos de madeira e uma chapa espessa de metal, fixada com quatro cavilhas de aço [64].

Em ligações solicitadas, a última carga de resistência verificada depende das características da falha. A falha com comportamento dúctil é justificada pela plasticidade dos elementos de madeira sob pressão, contrariamente à falha com comportamento frágil, iniciada com a fissuração da

madeira à tração e ao corte. O tipo de falha depende da geometria e das condições a que a ligação estará sujeita, bem como ao carregamento imposto [10].

No que diz respeito ao tempo de resistência ao fogo, este pode sofrer um aumento entre 10 e 20 minutos no caso de se verificar uma redução na carga aplicada entre 30% a 10%, para ligações submetidas à tração paralela ao grão. Nos casos de cargas aplicadas com um ângulo relativamente ao grão da madeira, o tempo de resistência pode levar a um aumento significativo (até 29 minutos, em média). Para ligações submetidas à flexão, verifica-se um aumento de cerca de 27 minutos [50].

Com base no EC5-1-1 [65], os modos de rotura para ligações madeira-madeira (figura 12) e madeira-aço (figura 13) em corte simples, dependem das diferentes variáveis a considerar no projeto. Estas ligações de corte simples serão as de interesse para o presente estudo.

Na Figura 14, para a ligação madeira-madeira, podem observar-se os diferentes tipos de rotura: o esmagamento em cada placa (a, b), a flexão na cavilha (c), o modo combinado da flexão e esmagamento de cada placa (d, e) ou falha plástica da cavilha e esmagamento nas duas placas (f).

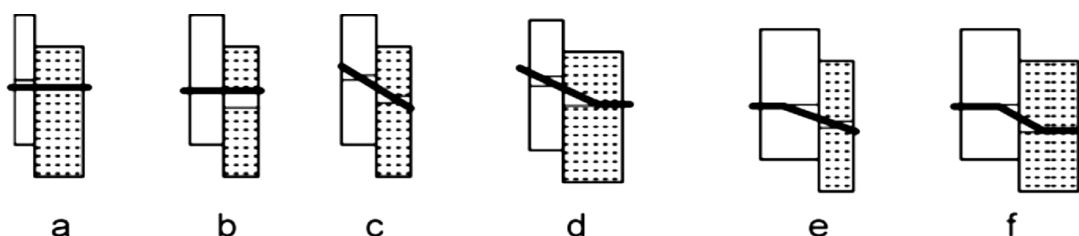


Figura 14- Modos de rotura em ligações madeira-madeira em corte simples [65][65]

Na Figura 15, para a ligação aço-madeira, observam-se também os respetivos tipos de rotura: flexão da cavilha (a), flexão da cavilha e esmagamento na placa de madeira (b, d), esmagamento da placa de madeira (c), o modo combinado na falha plástica da cavilha e esmagamento da placa de madeira (e).

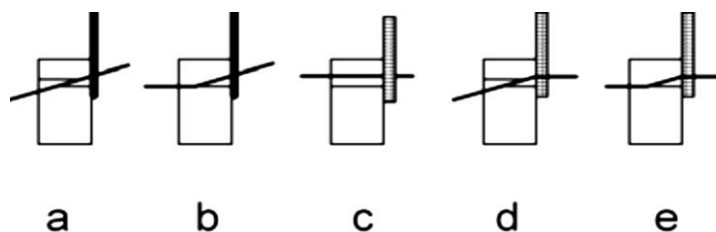


Figura 15- Modos de rotura em ligações aço-madeira em corte simples [65][65]

Mais recentemente, em 2021, J. Cabrero e M. Yurrita [66] analisaram os diferentes modos de rotura em ligações em madeira com cavilhas (Figura 16), referindo a importância da ocorrência de rotura dúctil, em vez da rotura frágil. Referiram também que as normas atuais para a previsão de um modo de rotura dúctil possuem métodos conservativos, [66].

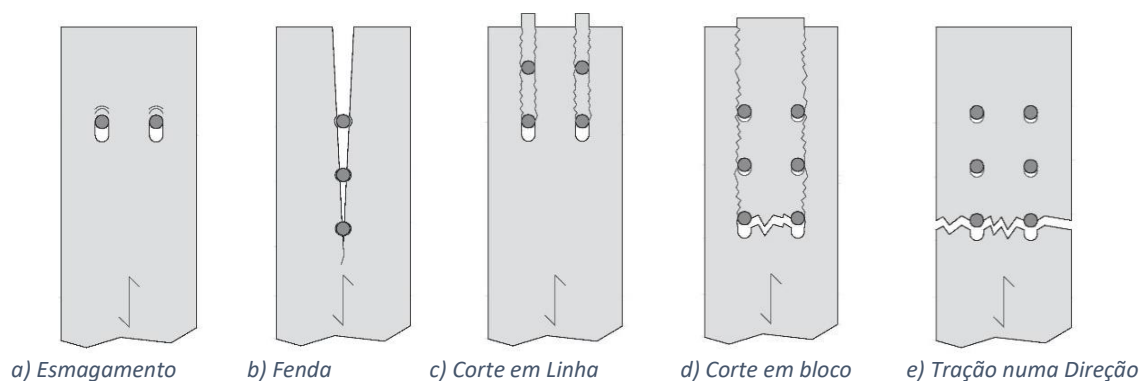


Figura 16-Modos de rotura em ligações em madeira: a) Rotura dúctil; b) c) d) e) Rotura frágil [66]

2.7 Sustentabilidade

Os aspetos ecológicos representam, cada vez mais, um papel significativo em questões arquitetónicas, levando a uma maior utilização da madeira nas últimas décadas [17].

Nos dias de hoje, a indústria das construções representa a indústria mais intensiva em recursos no mundo económico [23] [68]. O setor da construção é responsável por 40% da energia totalmente consumida e de emissões de carbono em muitos países desenvolvidos [23] [69]. Na Europa, as construções são responsáveis pelo consumo de 33% de matérias-primas, bem como pelo consumo de 50% da energia elétrica gerada [23] [70].

A madeira representa um dos materiais mais ecológicos existentes na construção e tem sido utilizada como material de construção básico há milhares de anos [68]. Como material de edifícios, a madeira possui um melhor desempenho em questões de poupança energética e emissões carbónicas do que outros materiais tradicionais presentes na construção, betão e aço. Apesar da energia e das emissões de carbono, durante as etapas operacionais na construção de edifícios, constituir a maioria da energia e emissões ao longo da vida útil do edifício, existe uma significativa emissão de carbono envolvendo o processo inicial de construção [71].

As estruturas de madeira representam um consumo de aproximadamente 80% a mais de energia durante a produção dos materiais ao longo dos diferentes estágios, quando comparadas com as de betão [72]. No entanto, a madeira pode armazenar cerca de 1,1 toneladas de CO_2/m^3 . Mesmo após a colheita da madeira, grande parte do carbono armazenado nos produtos de florestais pode não ser libertado durante décadas [73].

Em 2017, H. Guo, *et al.* [23] verificaram que, na fase de construção, as construções em *Glulam* resultam numa poupança energética de 46.5% em relação às construções de betão. Os painéis de *Glulam* armazenam mais CO_2 por eles próprios do que o emitido durante o processo de construção. Em média, a energia consumida nos edifícios em betão é 8.2 % a mais do que a dos edifícios em *Glulam*. As estimativas revelam que a energia total consumida nos edifícios residenciais em betão armado e em *Glulam* é aproximadamente 665.1 MJ/m^2 e 610.6 MJ/m^2 , por ano, respetivamente, durante a fase operacional. As emissões de CO_2 durante a fase operacional em edifícios residenciais em betão armado e em *Glulam* é 133.7 kg/m^2 e 122.1 kg/m^2 , por ano, respetivamente. Também verificaram que os edifícios em *Glulam* apresentam uma poupança energética de 9.9% e uma redução das emissões de carbono de 13.2% comparativamente aos edifícios em betão [23].

Mais recentemente, em 2021, J. Wang, *et al.* [21] verificaram que a madeira densificada apresenta grande potencial para ser utilizada como material sustentável. Referiram que, aumentando a utilização de madeira através da conservação, existirá uma redução do impacto carbónico e também irá promover uma gestão da floresta mais sustentável [21].

O custo das construções em *Glulam* afeta o desenvolvimento e a adoção deste material. Este é próximo ao de materiais de construção tradicionais, como o aço. Os custos de um edifício em *Glulam* de 26 metros de altura (8 andares) é de 31 dólares americanos por metro quadrado, sendo ligeiramente superior ao custo do mesmo edifício em betão [74].

3. DIMENSIONAMENTO DAS LIGAÇÕES AÇO-MADEIRA E MADEIRA-MADEIRA EM CORTE SIMPLES

As dimensões das ligações em estudo (aço-madeira e madeira-madeira) são calculadas com base nas equações simplificadas presentes no EC5-1-1 [65] à temperatura ambiente.

3.1. Dimensionamento à temperatura ambiente

As Figuras 17 e 18 representam os dois tipos de ligações em estudo, cujas dimensões representadas serão calculadas no presente capítulo. Relativamente à ligação madeira-madeira, apenas é realizado o estudo de um tipo de ligação (MM), sendo que para a ligação aço-madeira, é realizado o estudo de uma ligação com uma chapa fina de aço (MAf) e de uma ligação com uma chapa espessa de aço (MAe).

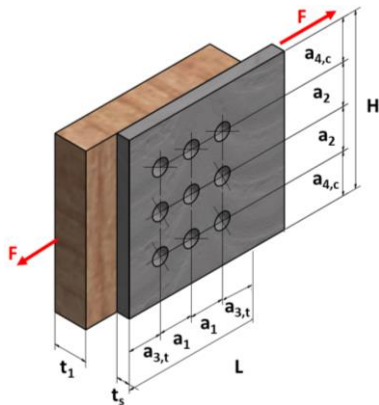


Figura 17-Ligação aço-madeira MAf e MAe

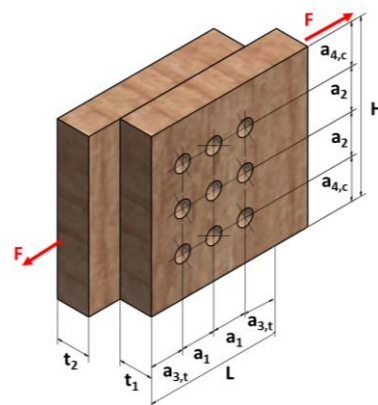


Figura 18-Ligação madeira-madeira MM

Com vista à análise dos estados limites últimos, o EC5-1-1 [65] define que para a tração na direção das fibras de madeira, a tensão à tração verificada ($\sigma_{t,0,d}$) não deverá ultrapassar a de resistência ($f_{t,0,k}$), tal como indicado na inequação (10).

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d} \quad (10)$$

Na equação (11), demonstra-se o cálculo da resistência à tração da ligação, considerando-se o valor característico de resistência à tração ao longo da fibra, $f_{t,0,k}$, da madeira e alguns fatores de segurança, apresentados no EC5-1-1 [65]. Estes fatores representam o fator de correção (k_{mod}), bem como o fator parcial de segurança para cada tipo de material (γ_M).

$$f_{t,0,d} = \frac{k_{mod} * f_{t,0,k}}{\gamma_M} \quad (11)$$

No presente caso de estudo e de acordo com o EC5-1-1 [65], para a madeira *Glulam*, γ_M é igual a 1,25. Relativamente ao k_{mod} foi considerado um valor igual a 0,6 uma vez que se considerou um carregamento de duração permanente e uma classe de serviço de 1.

O valor de cálculo da capacidade resistente, por plano de corte e por ligador, para ligações madeira-madeira, realizadas com ligadores tipo cavilha, deverá ser considerado o menor dos valores obtidos pelas expressões apresentadas no sistema de equações (12) [67].

$$F_{v,R,k} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} t_1 d \quad (a) \\ f_{h,2,k} t_2 d \quad (b) \\ \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (c) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (d) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_2 d}{2 + 2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (e) \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (f) \end{array} \right. \quad (12)$$

Nesta equação, $F_{v,R,k}$ é a capacidade de carga característica por plano de corte e por ligador; t_i , é a espessura dos elementos da madeira; $f_{h,i,k}$, é a resistência ao esmagamento característico; d , é o diâmetro do ligador; $M_{y,Rk}$, é o momento de cedência plástica característico do ligador; $F_{ax,Rk}$, é a resistência ao arranque característico do ligador. Todas estas expressões estão relacionadas com os diferentes casos ilustrados na Figura 14.

Relativamente ao rácio de resistência ao esmagamento (β), o mesmo é obtido através da relação entre a resistência de esmagamento do membro central ($f_{h,2,k}$) e dos membros laterais ($f_{h,1,k}$), tal como demonstrado na equação (13).

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} \quad (13)$$

Uma vez que na ligação madeira-madeira em estudo, ambos os membros são do mesmo material, β assume o valor de 1.

No que diz respeito às ligações aço-madeira, o valor da capacidade depende da espessura das placas metálicas. De acordo com o EC5-1-1 [65] as placas metálicas com uma espessura menor ou igual a $0,5d$ são classificadas como placas delgadas e placas metálicas com uma espessura maior ou igual a d são classificadas como placas espessas.

Deste modo, o valor de cálculo da capacidade de carga por plano de corte e por ligador, deverá ser considerado como o menor dos valores obtidos pelo sistema equacional (14), para placas delgadas, e pelo sistema equacional (15), para placas espessas, relacionadas com os diferentes casos ilustrados na Figura 15:

$$F_{v,R,k} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,4 f_{h,k} t_1 d \quad (a) \\ 1,15 \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (b) \end{array} \right. \quad (14)$$

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,k} t_1 d \quad (c) \\ f_{h,k} t_1 d \left[\sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,k} d t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (d) \\ 2,3 \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (e) \end{array} \right. \quad (15)$$

Em todas as ligações estudadas, considerou-se, tendo por base o EC5-1-1 [65], o valor de $F_{ax,Rk}$ igual a zero, uma vez que os elementos de ligações são cavilhas.

No que diz respeito à resistência ao esmagamento característico dos membros de madeira ($f_{h,0,k}$), pode-se ser obtida através da equação (16), onde depende do diâmetro das cavilhas (d) e da massa volúmica (ρ_{gk}).

$$f_{h,0,k} = 0.082(1 - 0.01d)\rho_{gk} \quad (16)$$

Relativamente ao momento característico de cedência de ligadores tipo cavilha ($M_{y,Rk}$), este é calculado tendo por base a tensão de rotura à tração característica do ligador ($f_{u,k}$) e o seu diâmetro (d), tal como apresentado na equação (17).

$$M_{y,Rk} = 0.3f_{u,k}d^{2.6} \quad (17)$$

O número total de cavilhas (N) é obtido com recurso ao valor da carga aplicada à ligação (F_d) e da capacidade de carga por ligador e por plano de corte ($F_{v,Rd}$), tal como apresentado na equação (18).

$$N = \frac{F_d}{F_{v,Rd}} \quad (18)$$

No que diz respeito ao posicionamento das cavilhas, o EC5-1-1 [65] define, para uma ligação com múltiplos ligadores, os espaçamentos mínimos entre as cavilhas, na direção perpendicular à madeira, bem como na direção das fibras na mesma. Com base na Figura 17 e Figura 18, verifica-se que a_1 e a_2 representam o espaçamento entre cavilhas mais próximas na horizontal e na vertical. Relativamente ao espaçamento entre bordos do membro na horizontal e vertical, é definido por a_3 e a_4 , respetivamente. Na Tabela 5 apresentam-se as equações consideradas no cálculo dos espaçamentos entre os ligadores existentes nas ligações.

Tabela 5-Distância dos espaçamentos entre os ligadores

Parâmetro	Ângulo	Distâncias
a_1	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(3+2+ \cos \alpha) d$
a_2	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3d$
$a_{3,t}$	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$\max(7d;80mm)$
$a_{4,c}$	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3d$

Para o cálculo das dimensões mencionadas, foram realizadas tabelas de projeto de dimensionamento à temperatura ambiente para cada tipo de ligação em estudo. Para tal foram consideradas diferentes variáveis, tais como a carga aplicada (10 kN, 15 kN e 20 kN), o diâmetro das cavilhas (6mm, 8mm e 10mm) e as classes de materiais da madeira (GL20h, GL24h e GL32h).

Estas tabelas encontram-se no apêndice A. Na Figura 19 é possível verificar os resultados obtidos para cada tipo de ligação, permitindo determinar o número de cavilhas a utilizar, em função da carga aplicada, da massa volúmica da madeira utilizada e do diâmetro das cavilhas.

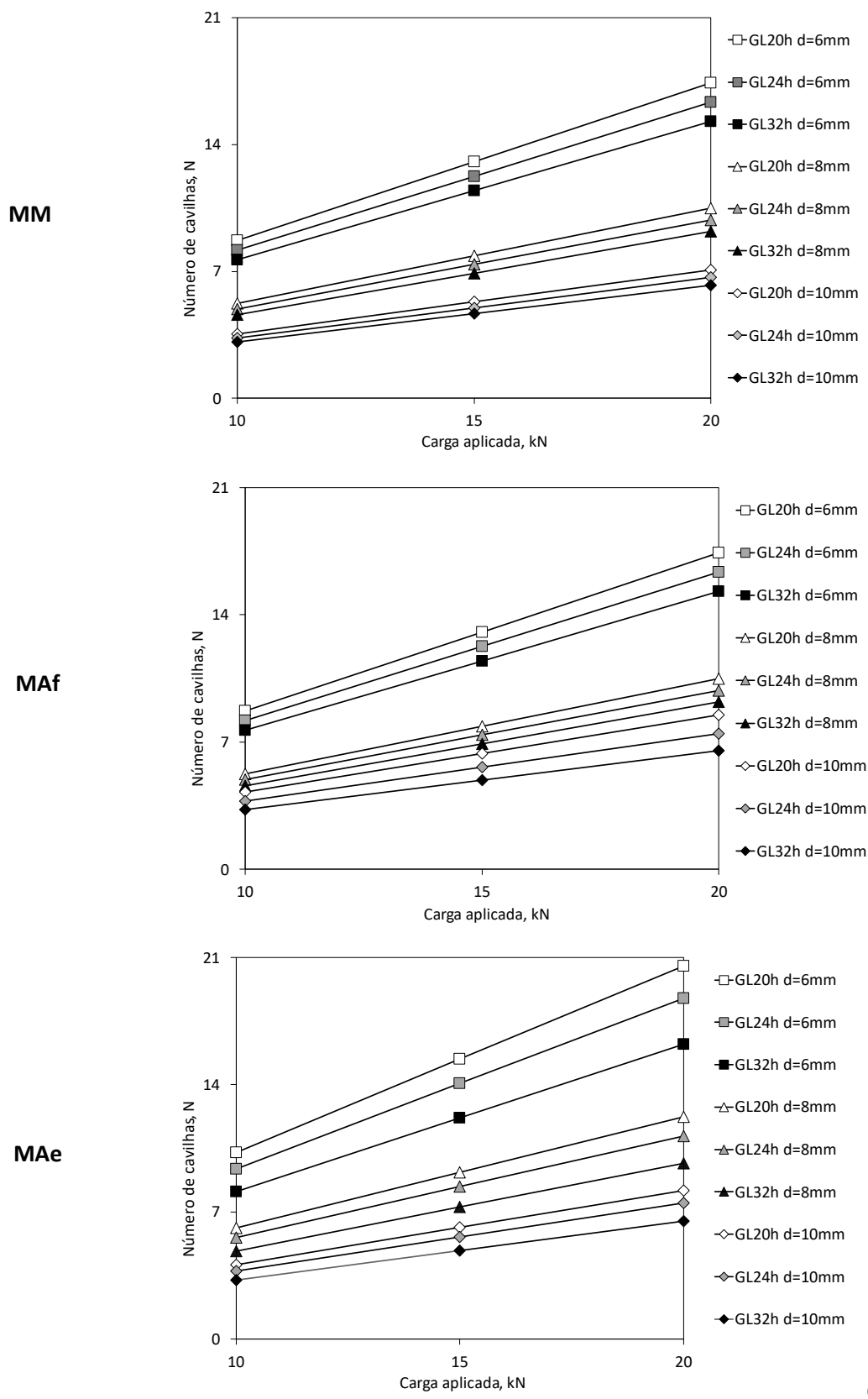


Figura 19-Número de cavilhas, função da carga aplicada, massa volúmica e diâmetro das cavilhas, para cada ligação

Com base no dimensionamento efetuado, observa-se que o número de cavilhas é função linear do aumento da carga de tração aplicada na ligação. O número de cavilhas aumenta com a carga aplicada. Nas ligações em que se utilizam madeiras com menor massa volúmica, o número de cavilhas é maior. Esta tendência aumenta quando o diâmetro da cavilha é menor, sendo que a proporcionalidade de aumento entre os tipos de madeira não se mantém constante. A utilização de cavilhas com maior diâmetro em madeiras de elevada massa volúmica, resulta na utilização de um menor número de ligadores no correto dimensionamento. Nas ligações de corte simples em estudo, as ligações MAe são as que necessitam de maior número de cavilhas.

3.2. Dimensionamento a altas temperaturas

No que diz respeito ao dimensionamento de ligações submetidas a altas temperaturas, o EC5-1-2 [14] considera uma ligação corretamente dimensionada ao fogo, quando a inequação (19) é verificada. Com vista ao cálculo dos parâmetros existentes na análise, o EC5-1-2 [14] apresenta um conjunto de equações para essa verificação (19), (20), (21) e (22).

$$\frac{E_{d,fi}}{A_S} \leq f_{d,fi} \quad (19)$$

$$E_{d,fi} = F_d \eta_{fi} \quad (20)$$

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (21)$$

$$f_{20} = k_{fi} f_{t,0,k} \quad (22)$$

Em que $E_{d,fi}$ é o resultado das ações de projeto em situação de fogo; η_{fi} , é o fator de redução de carga de projeto de exposição ao fogo; $k_{mod,fi}$, é o fator de modificação para o fogo (sendo este fator igual a 1, segundo o EC5-1-2 [14]); $f_{d,fi}$, é a resistência de projeto ao fogo; $\gamma_{M,fi}$, é o fator de segurança parcial relativo à madeira exposta ao fogo (sendo este fator igual a 1, segundo o EC5-1-2 [14]); $f_{t,0,k}$, é a resistência à tração na direção das fibras da madeira; k_{fi} , é um coeficiente característico do material (sendo igual a 1,15 para a madeira *Glulam*, segundo o EC5-1-2 [14]).

Apesar do facto de ter-se considerado o dimensionamento à temperatura ambiente para o presente estudo, procedeu-se à verificação do mesmo, para altas temperaturas, tendo-se verificado as condições impostas no EC5-1-2 [14]. No apêndice A apresenta-se uma exposição das verificações referidas.

página propositadamente em branco

4. VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA UTILIZADA

Este capítulo tem como principal objetivo a validação térmica e termomecânica da metodologia utilizada na presente dissertação. Nesse sentido, teve-se por base o estudo desenvolvido por A. Biró, *et al* [17], em 2021. O objetivo é comparar os resultados dos autores referidos, com os resultados obtidos através do modelo numérico, que será desenvolvido e utilizado na presente dissertação.

A. Biró, *et al* [17] analisaram o comportamento de uma ligação madeira-aço exposta ao fogo e submetida a corte duplo. Este estudo foi de principal relevo, devido ao facto de o tema ser recente e com poucos desenvolvimentos no seio da comunidade científica. O estudo incide numa análise mecânica à ligação, incluindo, também, o efeito da temperatura.

Para a comparação de resultados, inicialmente é realizada uma análise térmica, e, com base nesta, procede-se a uma análise termomecânica, para validação da metodologia utilizada.

Em ambas as análises, foram consideradas as propriedades não lineares da madeira e do aço conforme descrito nesta dissertação, sendo que a classe de madeira considerada foi a GL24h, devido à semelhança com a madeira utilizada pelo autor.

O modelo foi desenvolvido atendendo às dimensões apresentadas na referência por A. Biró, *et al* [17], sendo a malha de elementos finitos tridimensional com elementos sólidos. Foi considerado um tamanho de aresta para cada elemento finito de 10 mm, atendendo também à malha apresentada pelos autores.

4.1. Validação térmica

Relativamente à simulação térmica, foi utilizado o elemento finito SOLID 278 com 8 nós e um grau de liberdade por nó, correspondente ao cálculo da temperatura.

O caso em estudo representa uma situação de exposição ao fogo ISO 834 [55] na face inferior e posterior da ligação durante 1800s (30 min), sendo que as superfícies laterais se consideram adiabáticas, conforme se representa na Figura 20. A temperatura inicial no modelo foi de 20°C.

Relativamente ao valor do coeficiente de convecção aplicado, é igual a 25 W/m²K, para as superfícies expostas ao fogo. A emissividade é igual a 1.

De modo a comparar o modelo desenvolvido com o do autor, procedeu-se à análise da evolução da temperatura em 4 pontos distintos (k1, k2, k3 e k4).

As condições fronteiras impostas, a representação da malha de elementos finitos, bem como a identificação dos pontos em análise, podem ser observadas na Figura 20.

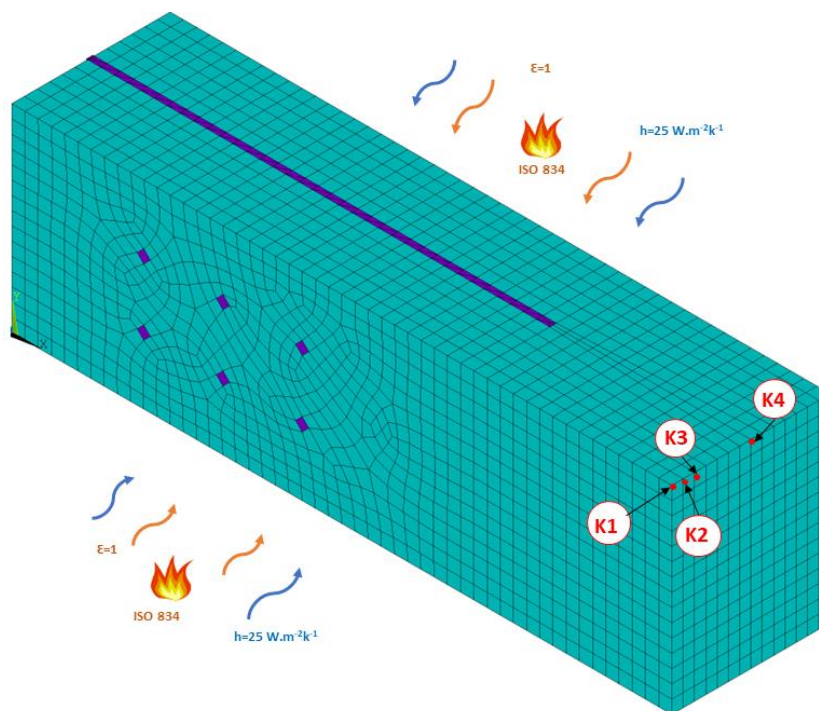


Figura 20-Representação das condições fronteira, malha de elementos finitos e pontos para medição da evolução da temperatura do modelo de validação

Posteriormente, considerou-se os valores obtidos para os 4 pontos distintos do modelo do autor, estabelecendo-se uma convergência de valores, tal como representado na Figura 21.

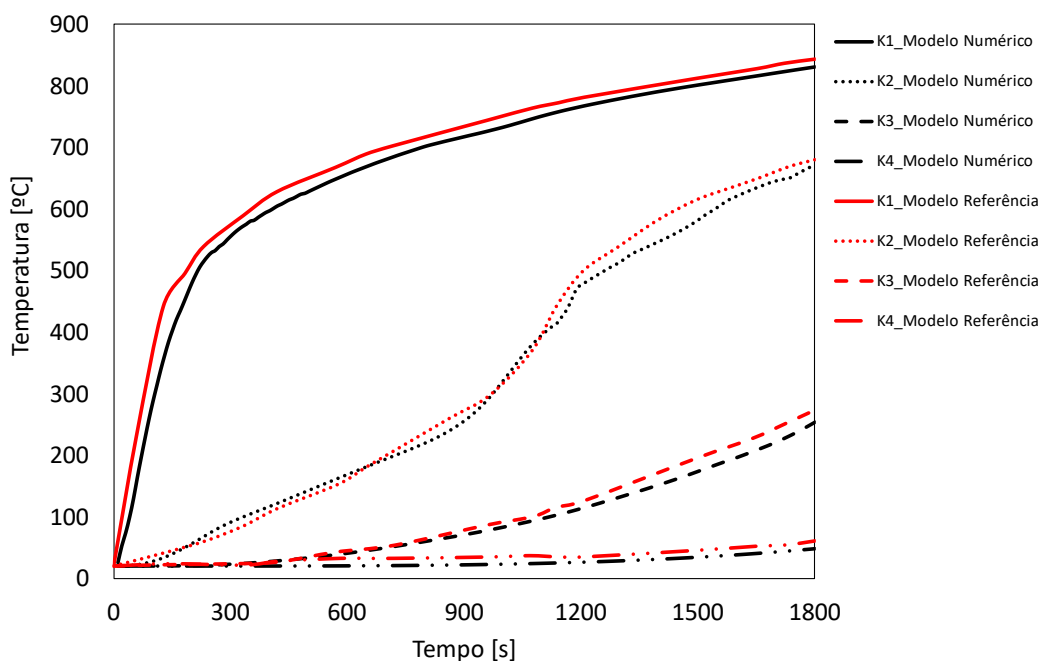


Figura 21-Comparação da evolução da temperatura nos pontos em análise, entre o modelo numérico desenvolvido e o modelo de referência

Pode-se verificar uma boa aproximação de resultados, apresentando ligeiras diferenças na evolução da temperatura no ponto k2. Este pequeno afastamento pode ser justificado com a pouca precisão apresentada pelo autor na localização dos pontos, nomeadamente do ponto k2.

No entanto, os resultados são similares, corroborando as metodologias adotadas nas análises térmicas no decorrer da presente dissertação.

4.2. Validação termomecânica

No que diz respeito à validação termomecânica, considerou-se os mesmos parâmetros e metodologia utilizada nas análises termomecânica da presente dissertação. Foi imposto um incremento de carga tendo por base a última carga registada na simulação do autor à temperatura ambiente, ou seja, 195 kN. O tempo incremental será de 0 até 100 segundos e a carga de 0 MPa até duas vezes o valor de carga pontual resistente considerada (195 kN). A carga é imposta em forma de pressão, na face livre da madeira, considerando a simetria da ligação, por intermédio da chapa de aço, tal como ilustrado na Figura 22.

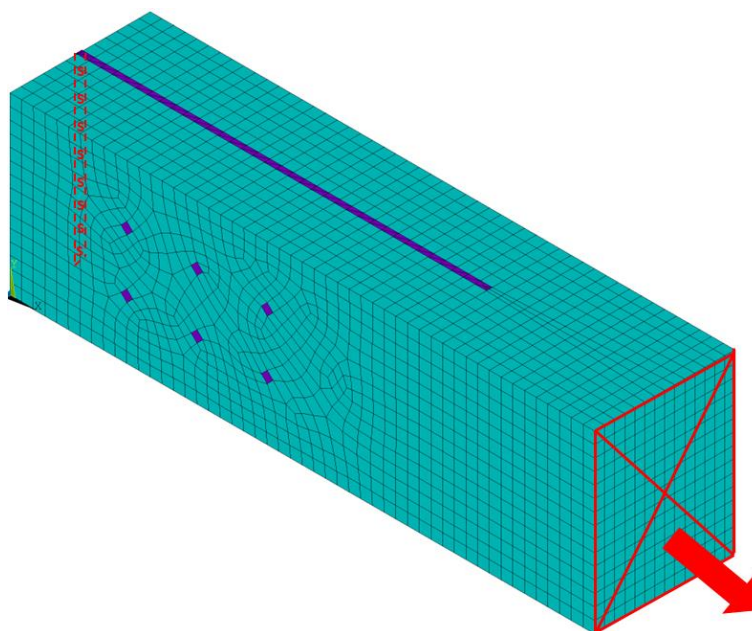


Figura 22-Representação do modelo termomecânico na ligação de validação

Tendo por base os instantes de tempo analisados pelo autor (0s, 600s e 1200s), procedeu-se à análise da carga resistente da ligação, convergindo com os valores apresentados pelo mesmo. Essa comparação pode ser analisada na Figura 23.

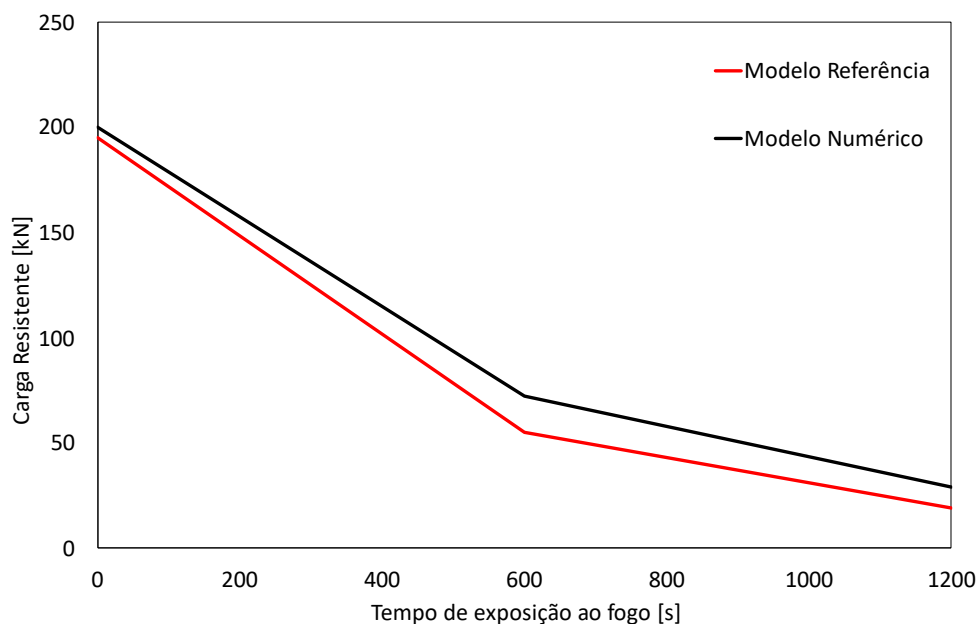


Figura 23-Comparação da carga resistente do modelo numérico e do modelo de referência em função do tempo de exposição ao fogo

Analisando a proximidade de valores, constata-se que o modelo numérico apresenta valores ligeiramente mais altos, podendo ser justificado pelo facto de a resistência mecânica da madeira considerada ser mais elevada do que a utilizada pelo autor. No entanto, o decréscimo proporcional da carga resistente em ambos os modelos, é próximo, pelo que permite concluir que se conseguiu uma boa aproximação, validando a metodologia adotada no estudo termomecânico em estudo.

Relativamente ao estudo dos autores, acerca das tensões verificadas na ligação, o mesmo, não se revela por si só inteiramente fidedigno. Isto deve-se ao facto de os autores apresentarem tensões máximas registadas na madeira que ultrapassam os 100 MPa, contrariando a resistência máxima para a madeira, apresentada pelo mesmo, de cerca de 21 MPa. Por este motivo, optou-se por não se comparar os resultados de tensões.

5. MODELOS AVANÇADOS POR ELEMENTOS FINITOS

Muitos problemas apresentam um nível de dificuldade significativa, tornando a resolução bastante complexa ou, em certos casos, impossível de ser obtida com recurso a métodos analíticos. O método de elementos finitos (MEF) apresenta-se como uma alternativa viável. Este método permite a resolução de um conjunto de problemas mais acessíveis com resultados exatos ou aproximados que, quando associados, constituem a solução global desejada [75].

O MEF é caracterizado pela discretização de um problema físico, em partes finitas de menores dimensões, designadas de elementos. Os elementos são de geometria simples, tais como cubos, tetraedros, por exemplo, e unidos entre si através de nós [76]. Por sua vez, cada nó tem um determinado número de graus de liberdade, relativo ao cálculo de temperaturas, deslocamentos, etc. [77].

Na presente dissertação, os modelos utilizados possuem as dimensões previamente calculadas à temperatura ambiente no capítulo 3, de acordo com o EC5-1-1 [65]. Considerou-se, entre as variáveis analisadas, a escolha das ligações com uma carga imposta de 20 kN e com cavilhas de 10 mm de diâmetro. Os desenhos de todas as ligações em estudo estão expostos na Figura 24.

Os modelos numéricos desenvolvidos para as ligações madeira-madeira e aço-madeira em estudo, foram realizados no ANSYS® *Mechanical* 2022 R2 (ANSYS®). Este programa é indicado para a realização de várias análises multifísicas, baseadas no MEF.

A análise desenvolvida teve por base um processo de simulação numérica. O ANSYS® utiliza o método Newton-Raphson para a resolução de problemas não-lineares incrementais e iterativos. Este método é recorrentemente utilizado, considerando um incremento de tempo (*time-step*), bem como uma tolerância absoluta. O critério de convergência utilizado é ainda baseado no cálculo do fluxo de calor para a análise térmica e dos deslocamentos para a análise estrutural.

O método de Newton-Raphson tem como principal objetivo calcular as raízes de uma função, escolhendo uma aproximação inicial para a mesma. Posteriormente é calculada a equação da reta tangente ao gráfico da função nesse ponto (por intermédio da derivada) intersecando com o eixo das abcissas, alcançando uma melhor aproximação da raiz. Este processo é repetido continuamente, criando-se um método iterativo, com vista a encontrar-se a raiz da função [78].

Para a análise realizada em regime transiente, foi imposto um *time-step* de 10s. Com vista a otimizar a convergência do modelo, foi considerada uma tolerância absoluta de 0,9 (para o cálculo do fluxo de calor), sendo que as restantes variáveis foram consideradas padrão do ANSYS®.

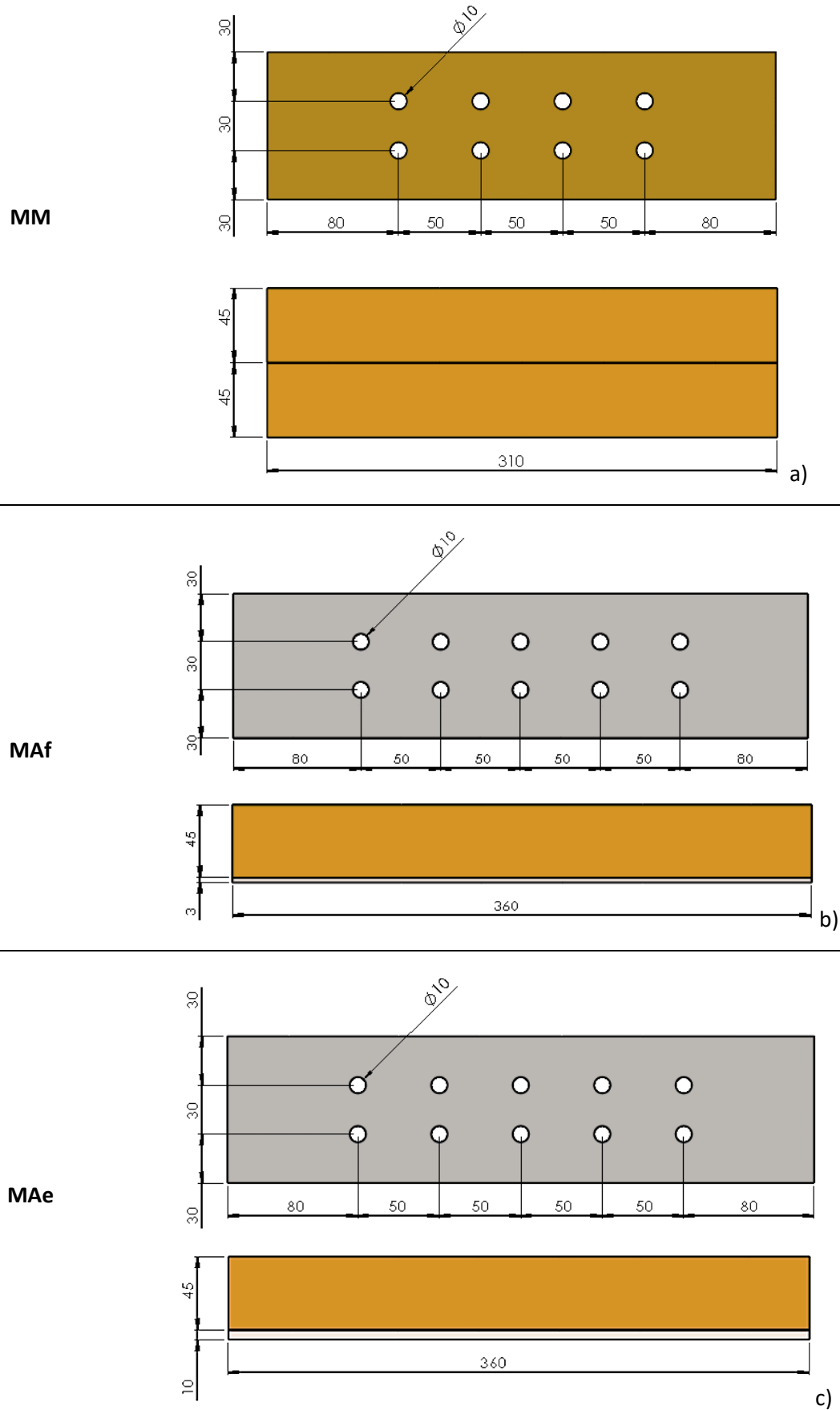


Figura 24-Geometria das ligações em estudo: a) MM; b) MAf; c) MAe

Inicialmente, selecionaram-se o tipo de elementos finitos disponíveis na biblioteca interna do ANSYS® para a análise térmica e termomecânica. Numa primeira fase, foi utilizado o MEF com o recurso ao algoritmo térmico e transiente não-linear. Nesta análise, os diferentes componentes do modelo foram considerados em contato perfeito. Numa fase posterior, o algoritmo utilizado foi estrutural, com imposição de carregamento mecânico e uma carga térmica constante, função da exposição ao fogo, considerando o atrito entre os componentes envolvidos na ligação.

Para facilitar o desenvolvimento dos modelos numéricos, e para cada tipo de ligação, foram gerados códigos na linguagem *Parametric Design Language* (APDL) do ANSYS®, tanto para a criação das geometrias, como para a introdução das propriedades mecânicas e térmicas dos materiais envolvidos, já indicadas no capítulo 2. Para o modelo numérico, foi atribuído à madeira o material com o identificador “1” e ao aço o identificador “2”. Com base nos modelos descritos, foram desenvolvidas análises térmicas e termomecânicas fazendo variar a classe de madeira entre GL20h, GL24h e GL32h.

Na Figura 25 estão representadas as malhas de elementos finitos utilizadas para o estudo. O tamanho fixo de aresta para cada elemento finito foi de 4 mm, função da divisão para o diâmetro da cavilha, permitindo assim uma malha equilibrada.

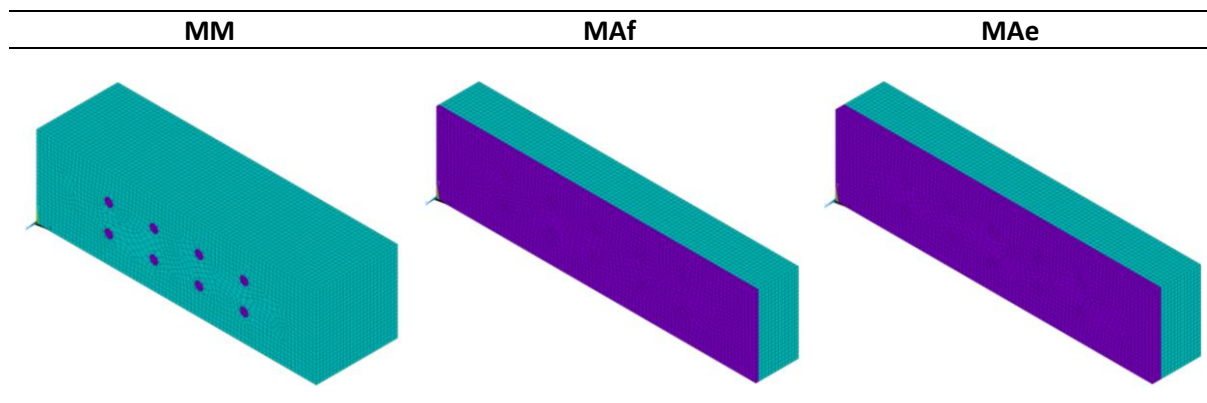


Figura 25-Malha de elementos finitos das ligações em estudo

O processo de simulação numérica divide-se assim em duas partes. Primeiro, analisou-se o comportamento da ligação submetida ao fogo. Posteriormente, procedeu-se a uma análise termomecânica, onde foi imposta uma carga de tração incremental na ligação, em conjunto com o campo de temperaturas para um instante de tempo correspondente à exposição do fogo. Importa referir a dissociação entre estas duas análises, isto é, a análise mecânica é afetada pelo campo de temperaturas, porém, a análise mecânica não afeta o cálculo de temperaturas previamente obtido.

Para a correta análise numérica, a malha inerente ao estudo térmico é igual à utilizada no estudo termomecânico, de modo a existir a mesma imposição nodal, tendo para isso sido escolhidos elementos finitos com o mesmo número de nós. De modo a uma melhor compreensão de ambas as análises desenvolvidas, apresenta-se o fluxograma das etapas, conforme a Figura 26.

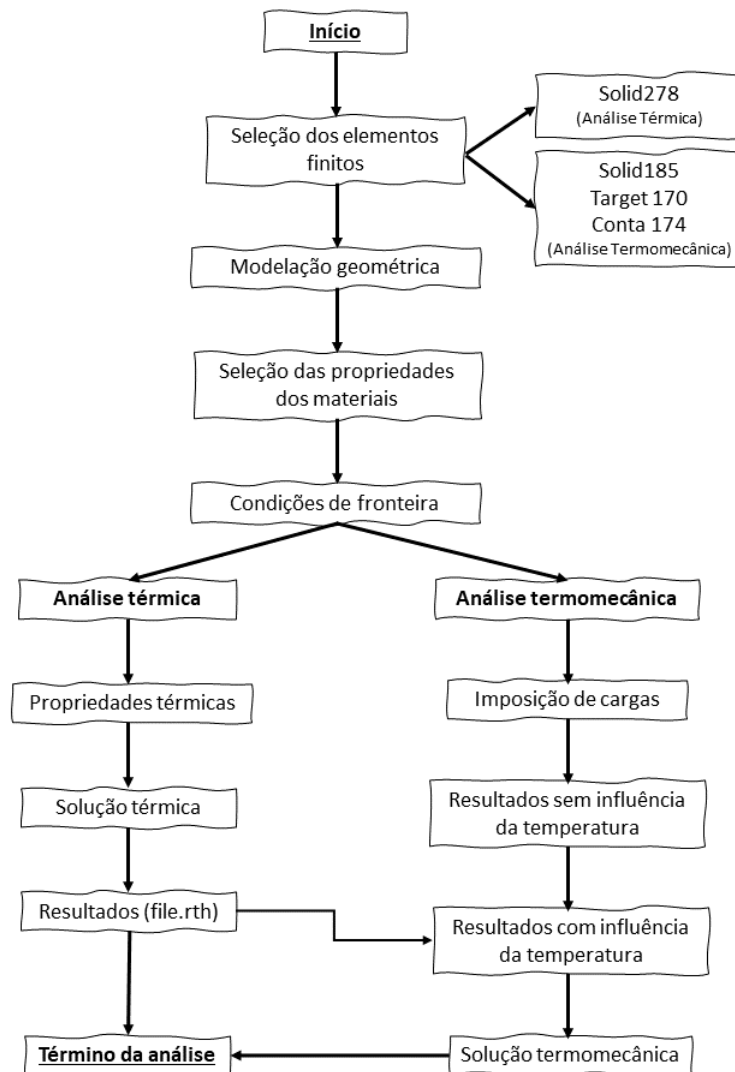


Figura 26-Fluxograma das etapas consideradas na simulação numérica

5.1. Análise térmica

A análise térmica transiente consiste na determinação das temperaturas nodais nos modelos em estudo, aplicando-se as condições de fronteira inerentes à ação do fogo (convecção e radiação). Os casos em estudo representam uma situação de exposição ao fogo nas partes anterior e posterior das ligações MM, MAf e MAe durante 1800s (30 min). A temperatura inicial nos modelos foi imposta como a temperatura ambiente de 20°C. Para a simulação térmica, foi utilizado o elemento finito 3D SOLID 278 com 8 nós e um grau de liberdade por nó, correspondente ao cálculo da temperatura.

A simulação da ação do fogo é imposta por intermédio da curva nominal de temperatura-tempo ISO 834 [55], exterior ao modelo nas superfícies frontais e posteriores, sendo que as superfícies laterais se consideram adiabáticas. Relativamente ao valor do coeficiente de convecção aplicado, é igual a 25 W/m²K, para as superfícies expostas ao fogo. A emissividade é igual a 1, tendo por base o EC1-1-2 [55]. As condições fronteiras impostas estão representadas na Figura 27.

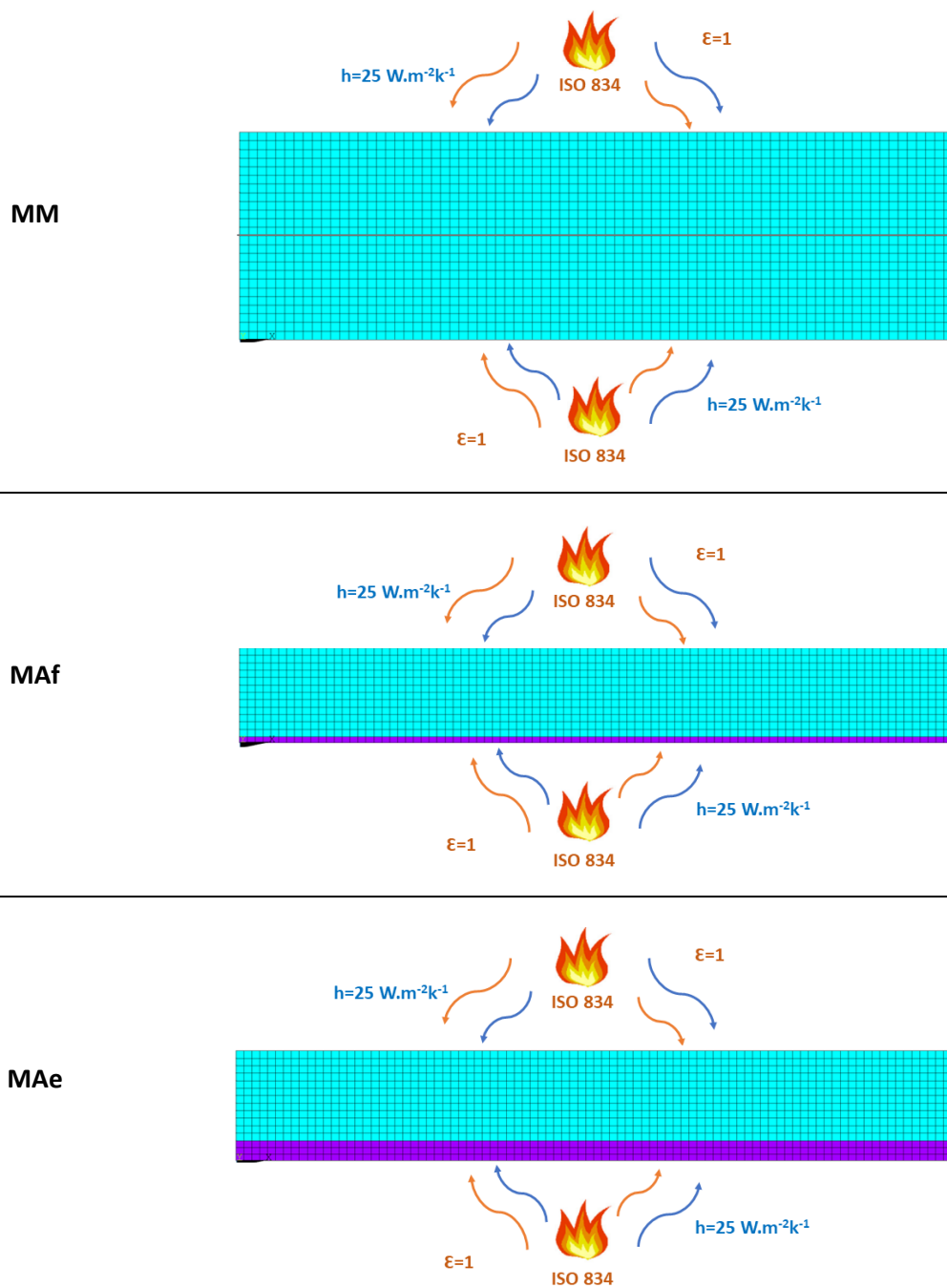


Figura 27-Representação das condições de fronteira térmicas nas ligações

Após desenvolvidos os diferentes modelos e a respetiva solução, para a fase de pós-processamento e a análise de resultados, selecionou-se em cada modelo um plano de corte ao longo das duas cavilhas, tal como apresentado na Figura 28. Nesse plano de corte, indicam-se alguns nós nos elementos em madeira, bem como todos os nós ao longo do comprimento da cavilha, de modo a analisar a evolução da temperatura. Os referidos pontos podem ser consultados na Figura 29.

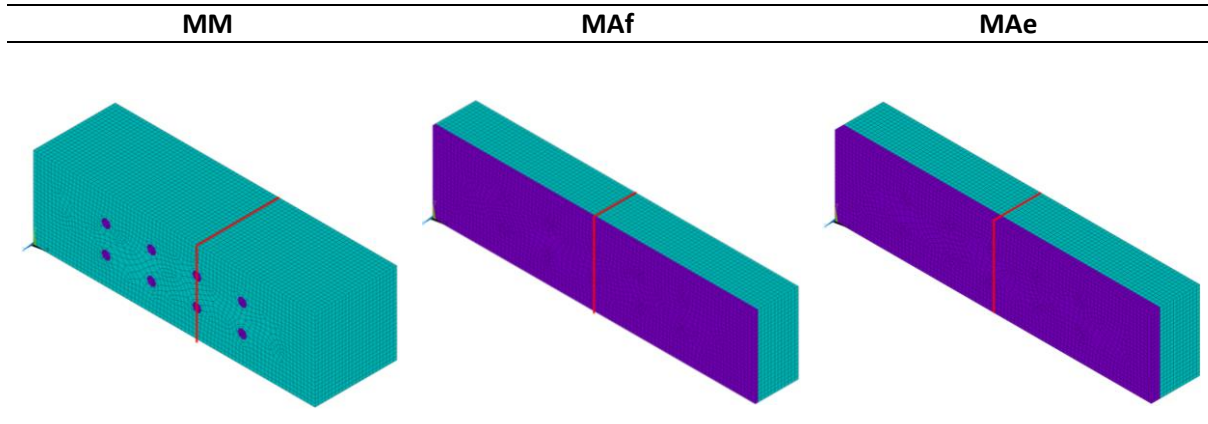


Figura 28-Planos de corte para discussão de resultados

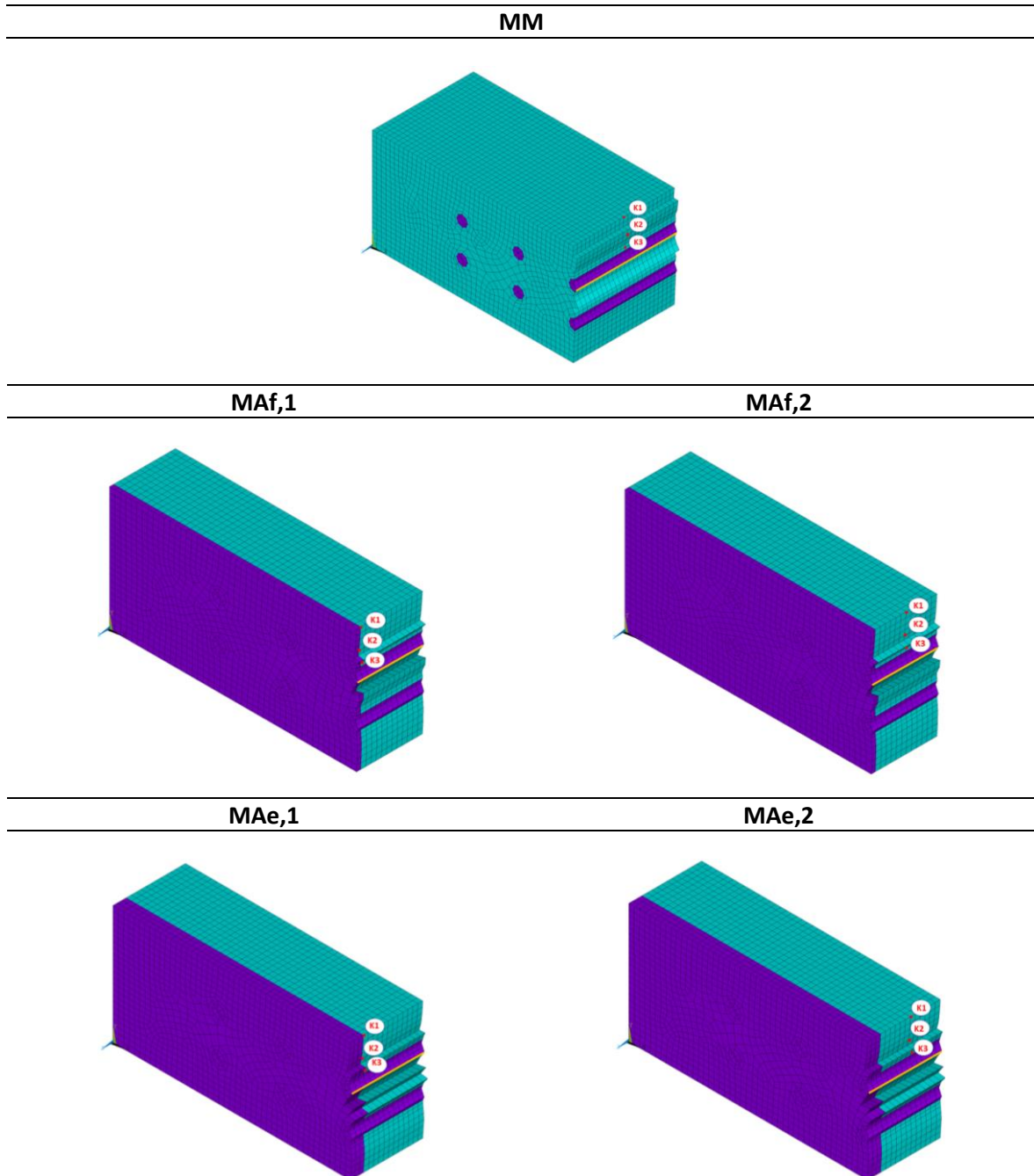


Figura 29-Pontos nodais para discussão de resultados

5.2. Análise termomecânica

A análise termomecânica possibilita a identificação da resistência máxima da ligação e, conseqüentemente, a carga máxima a que ligação resiste, não excedendo as condições de cedência do material.

Para o modelo termomecânico é considerado o elemento SOLID185 para a análise estrutural, que tem o mesmo número de nós, do elemento SOLID278 utilizado na análise térmica. O SOLID185 é composto por oito nós, que possuem três graus de liberdade cada um, representando as translações nas direções x, y e z.

O estudo realiza uma análise mecânica por intermédio das capacidades multifísicas do programa ANSYS®. Para tal, as cargas térmicas calculadas previamente no modelo de ligação são aplicadas em adição, para um tempo determinado tempo de exposição ao fogo, a partir da leitura do ficheiro de resultados com as temperaturas nodais (file.rth). É também imposta uma carga de tração linear incremental nas faces externas da ligação, como ilustrado na Figura 30.

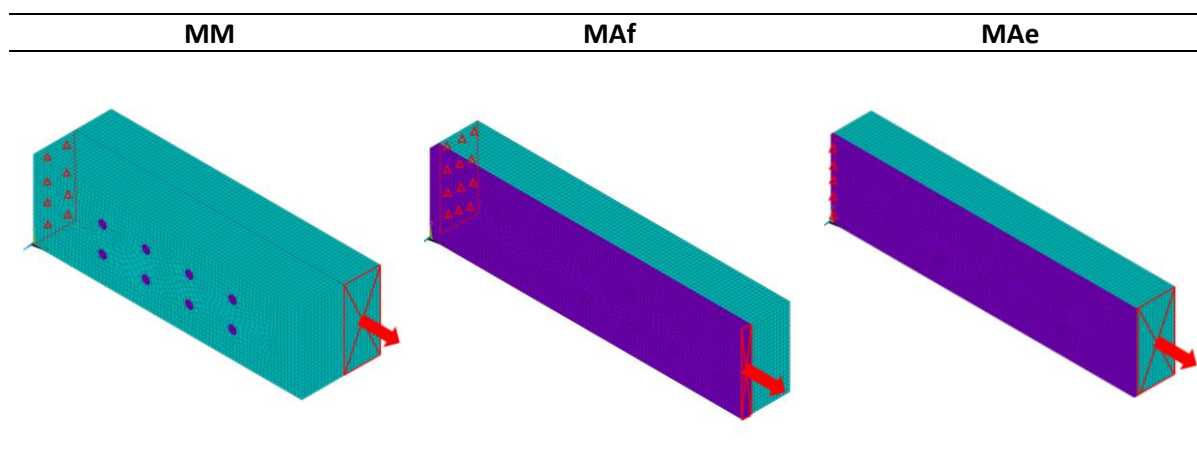


Figura 30-Modelo termomecânico e condições de fronteira nas ligações

O estudo utiliza o método implícito da ferramenta *Contact Wizard* do Software ANSYS® para introduzir o contacto entre elementos. Essa modelação é realizada através da introdução de elementos de contacto, o CONTA174 e o TARGET170. Esses elementos garantem uma modelação precisa e eficiente de contacto entre todas as partes do modelo, considerando as interações mútuas. A abordagem adotada possibilita uma análise detalhada e realista das respostas do sistema e diferentes condições de operação, contribuindo para o aprimoramento do projeto e da operação do sistema em estudo.

Para a modelação do contacto entre a madeira e o aço, é necessário a definição do coeficiente de atrito adequado. Neste estudo, o valor escolhido foi de 0.3 [35], considerando o valor limite estimado para uma superfície lisa da cavilha.

Relativamente à carga incremental aplicada, foi definido um tempo incremental entre 0 até 100 segundos, para uma carga entre 0, até duas vezes o valor de carga pontual resistente ($F_{d,R}$), tal como exposto na equação (23). Este valor de carga é distribuído pela área de aplicação na obtenção de uma pressão equivalente.

$$F_{d,R} = F_{v,Rd} N_t n_p \quad (23)$$

Onde $F_{d,R}$ é o produto da carga resistente de projeto por ligador, por plano de corte, $F_{v,Rd}$, pelo número total de ligadores, N_t , e de planos de corte da ligação, n_p . Neste caso é um só plano de corte. Todos os valores $F_{d,R}$ calculados, estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6-Carga resistente das ligações para diferentes massas volúmicas em estudo [kN]

	GL20h	GL24h	GL32h
MM	22.56	24.03	25.69
MAf	23.59	26.78	30.61
MAe	24.42	26.75	30.89

6. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo procede-se à análise dos resultados obtidos para cada uma das ligações abordadas (MM, MAf e MAe) com diferentes massas volúmicas da madeira (GL20h, GL24h e GL32h).

Relativamente à análise térmica, numa primeira fase, analisa-se a evolução da temperatura registada em 3 pontos distintos, localizados no centro da placa em madeira. Nos casos onde existe uma chapa de aço, também se analisa a evolução da temperatura em 3 pontos localizados na interface dos materiais. Posteriormente, é avaliada a evolução da temperatura ao longo do comprimento da cavilha, para um tempo decorrido de 900s (15 min) e 1800s (30 min). Seguidamente, são apresentados os campos de temperatura para os planos de corte considerados, para compreensão da distribuição da mesma, ao fim dos 1800s. Por último, são apresentadas as velocidades médias de carbonização nas ligações em estudo.

No que diz respeito à análise termomecânica, é avaliada a capacidade de carga resistente das ligações, com a influência da carga térmica e se, onde são consideradas as diferentes massas volúmicas da madeira. É, ainda, analisado o respetivo campo de tensões equivalentes e de temperaturas.

6.1. Temperaturas nodais nas ligações

A evolução da temperatura na ligação foi registada em diferentes pontos nodais. Para a ligação MM foram considerados os pontos K1, K2 e K3, situados no centro da ligação e, conseqüentemente, na interface entre ambas as placas (devido à sua simetria). Relativamente às ligações MAf e MAe, devido à sua assimetria, e com vista a uma melhor compreensão da variação das temperaturas registadas com o afastamento dos pontos da placa de aço, foram considerados dois pontos nodais distintos no registo: na interface entre a chapa de aço (MAf1 e MAe1) e de madeira, e no centro da placa em madeira (MAf2 e MAe2). Em todos os casos o ponto K1 encontra-se à superfície, K2 no interior e K3 posicionado na madeira, sendo o ponto nodal mais próximo da cavilha. Os resultados do campo de temperaturas nos pontos nodais referidos podem ser verificados nas Figuras 31, 32 e 33.

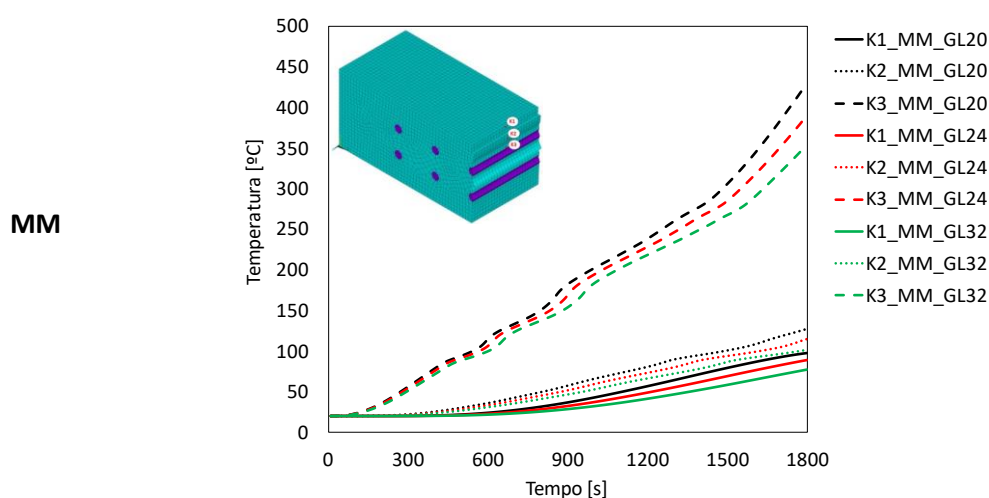


Figura 31-Temperatura ao longo do tempo nos pontos considerados ao centro da ligação MM

Na ligação MM constata-se que a massa volúmica considerada na madeira é um fator diferencial no que diz respeito à evolução da temperatura. Verifica-se que com a diminuição da massa volúmica da madeira, a evolução da temperatura regista-se de forma mais acentuada. Para esta ligação, as temperaturas globais atingidas no fim dos 1800s são globalmente baixas, verificando-se que só o ponto K3 (mais próximo da cavilha) ultrapassou a temperatura de 300°C, carbonizando a madeira nessa região, independentemente da massa volúmica considerada.

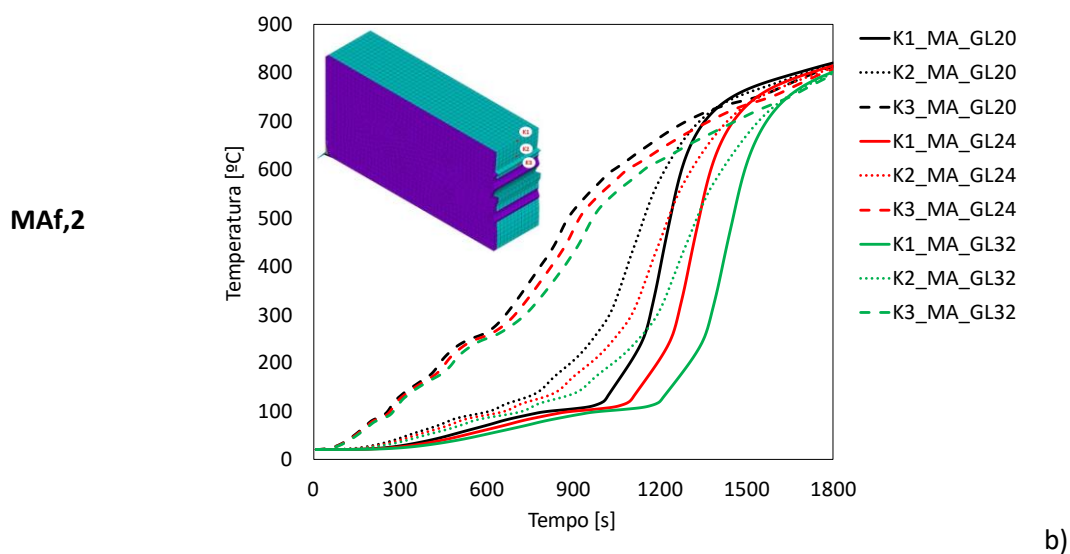
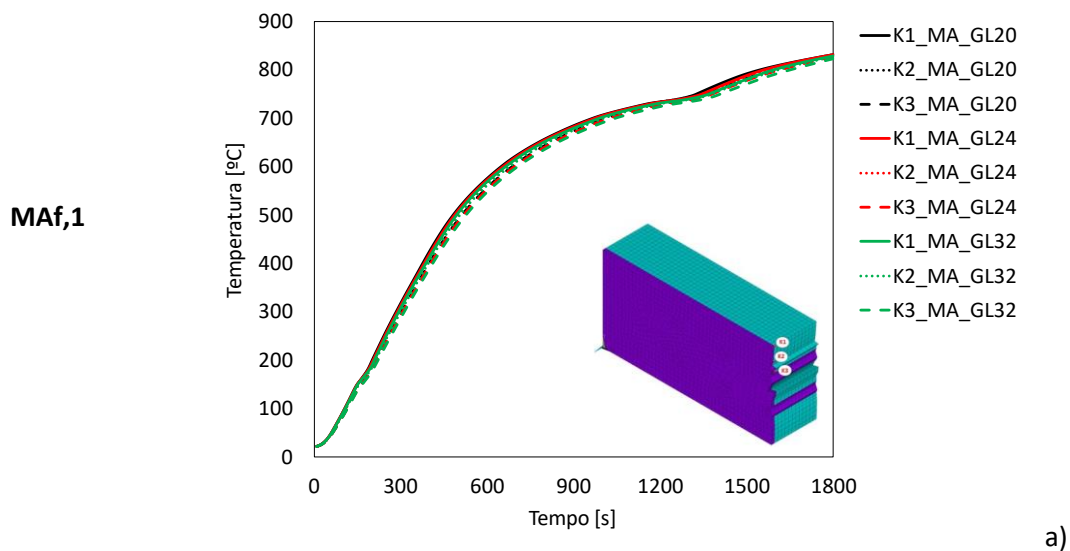


Figura 32-Temperatura ao longo do tempo nos pontos considerados da ligação MAf: a) junta à chapa de aço; b) no centro da placa de madeira

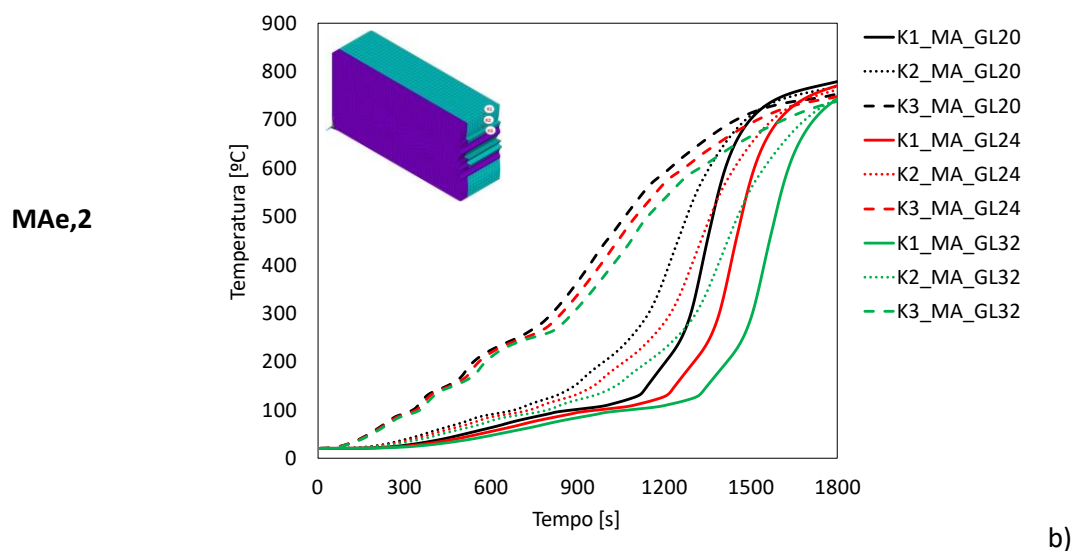
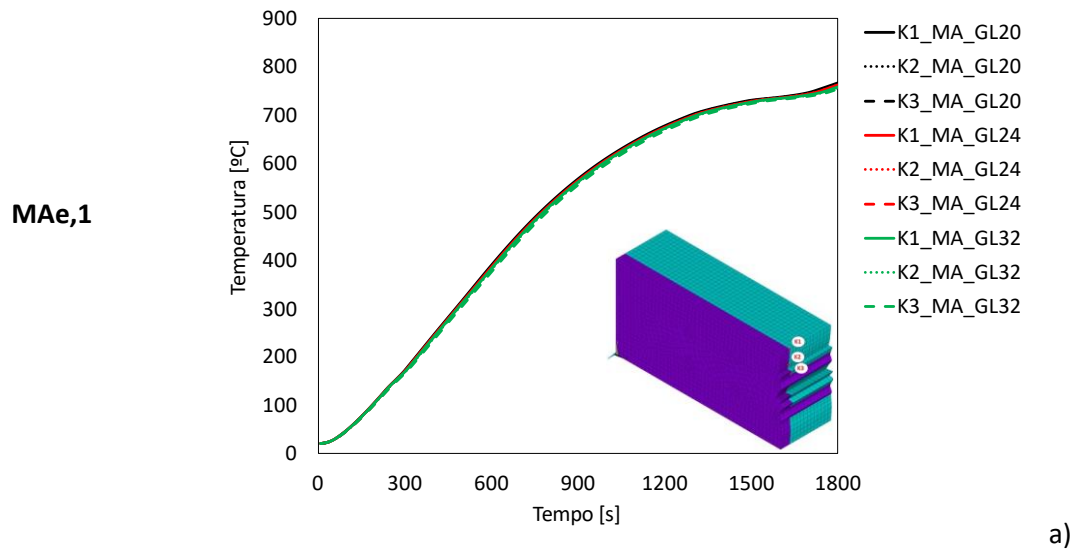


Figura 33-Temperatura ao longo do tempo nos pontos considerados da ligação MAe: a) junta à chapa de aço; b) no centro da placa de madeira

Nas ligações MAf,1e MAe,1 verifica-se que não há qualquer variação entre as temperaturas obtidas nos pontos, seja pela posição que ocupam ou pela alteração da massa volúmica da madeira. Isto deve-se à influência do aquecimento da chapa de aço, podendo-se estabelecer uma concordância com a curva ISO 834, quer pela forma da mesma, quer pelas temperaturas finais registadas, validando deste modo a metodologia utilizada no cálculo do campo de temperaturas nos modelos de ligações estudados. Comparativamente com a ligação MAf,1, a MAe,1 apresenta valores de temperatura um pouco menores, revelando o efeito de dissipação de calor providenciado pela chapa mais espessa de aço, comparativamente à chapa de menor espessura.

Relativamente às ligações MAf,2e e MAe,2 verifica-se um comportamento diferente ao analisado, aquando da localização dos pontos nodais junto à chapa de aço. Neste caso, é notória a influência quer da localização dos pontos (onde o ponto K3, mais próximo da cavilha, apresenta uma carbonização após 15 minutos), quer da massa volúmica das ligações, na evolução da temperatura ao longo do tempo.

Outro aspeto relevante é o facto de na ligação MAf,2 verificar-se a primeira zona de carbonização (no ponto K3) após 11 minutos, comparando com a ligação MAe,2 que regista a primeira zona de carbonização após 15 minutos, concluindo-se, que quanto mais espessa for a chapa de aço maior a dissipação de calor.

6.2. Temperatura ao longo do comprimento da cavilha

A temperatura ao longo do comprimento da cavilha na secção transversal, foi obtida para dois instantes de tempo: 900s e 1800s. A evolução da temperatura ao longo do comprimento da cavilha, para as 3 ligações em estudo, pode ser analisada nas Figuras 34, 35 e 36.

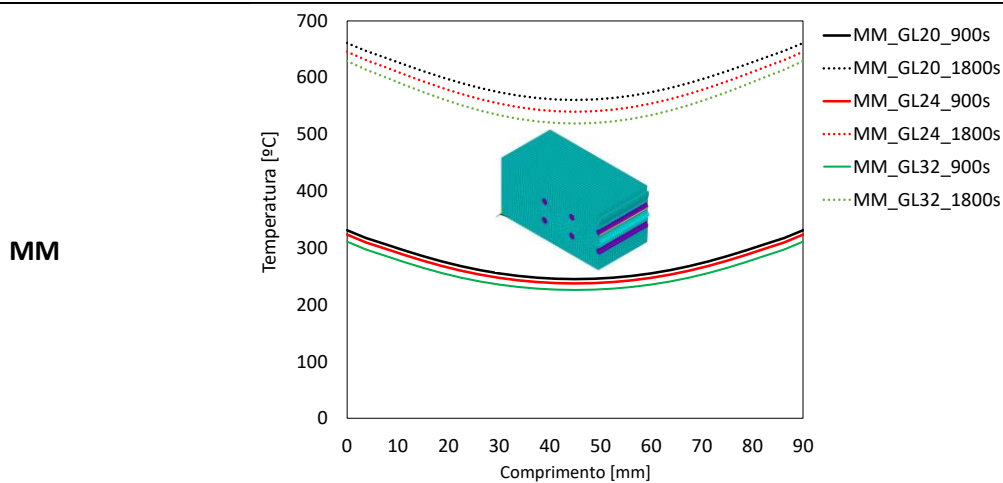


Figura 34-Temperatura ao longo da cavila para 900s e 1800s, para a ligação MM

Na ligação MM, os resultados mostram que a variação da temperatura não é muito significativa e que o intervalo de valores registados é o mais baixo das três ligações em estudo. A curva de temperaturas na ligação apresenta uma trajetória uniforme, com o efeito registado nos extremos da cavilha de forma diferenciada devido ao material.

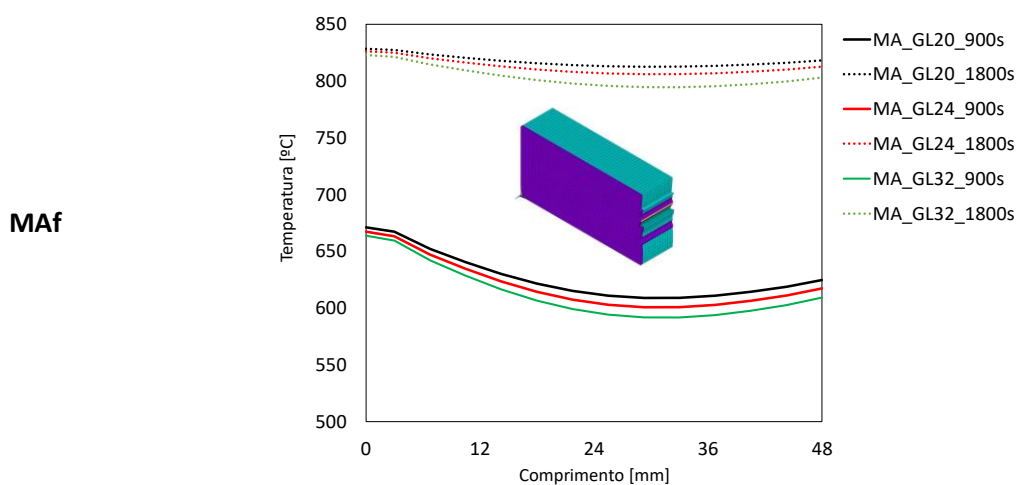


Figura 35-Temperatura ao longo da cavila para 900s e 1800s, para a ligação MAf

MAe

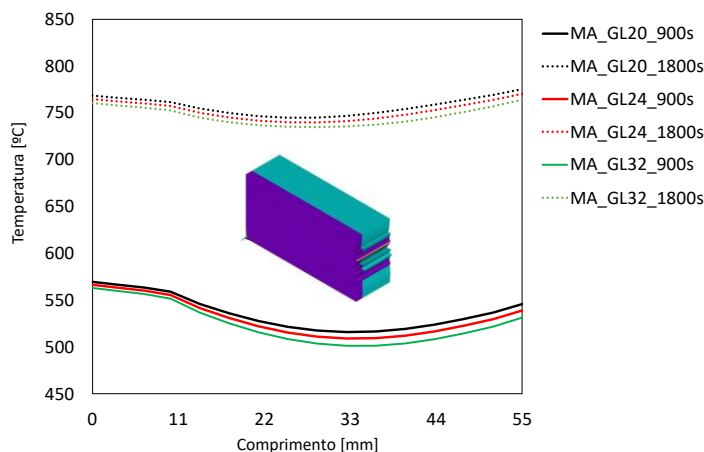


Figura 36-Temperatura ao longo da cavilha para 900s e 1800s, para a ligação MAe

Para as ligações MAf e MAe, os resultados mostram uma significativa aproximação de temperaturas, sendo que a ligação MAf apresenta um campo de temperaturas superiores à MAe, tanto para 900s como para 1800s. Em ambos os casos, pode-se verificar um decréscimo proporcional da temperatura ao longo do comprimento função da espessura da chapa em aço, possuindo, posteriormente um comportamento distinto. Contrariamente à ligação MM, ambas as ligações não possuem simetria, justificando o facto de a temperatura nos extremos da cavilha serem distintas. Salienta-se, ainda, que em todos os casos e instantes de tempos estudados, o aumento da massa volúmica da madeira dificulta a propagação do calor para o interior dos elementos.

6.3. Campos de temperaturas das ligações

As Figuras 37, 38 e 39, apresentam os resultados da temperatura nos modelos 3D das ligações, considerando os planos de corte em estudo, para cada classe da madeira. É possível a visualização da temperatura registada no interior da madeira, bem como a influência das cavilhas e das placas em aço nessa evolução, para o instante de tempo analisado (1800s).

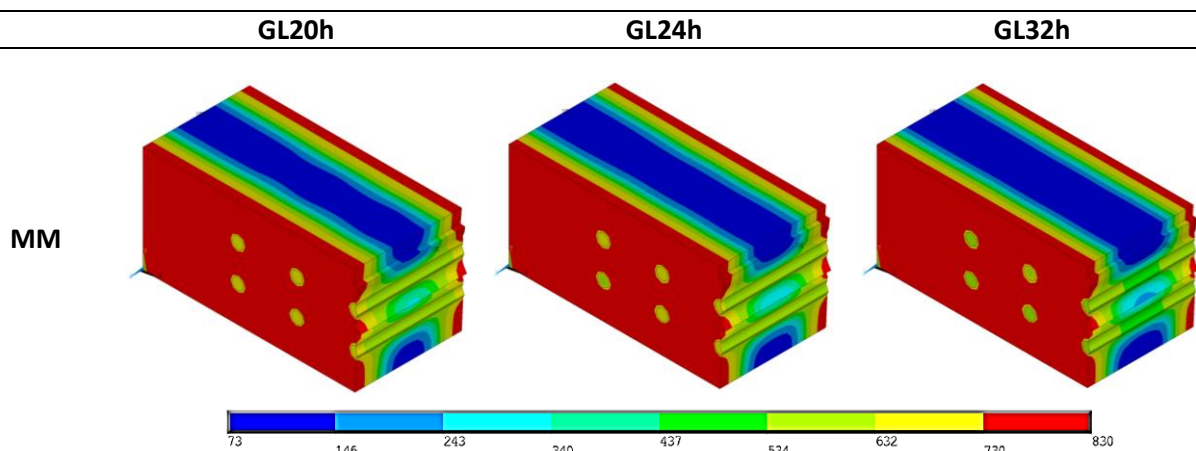


Figura 37-Campos de temperatura da ligação MM após 1800s

A análise revela que para a ligação MM, a temperatura máxima no exterior é elevada (830°C), mantendo o seu interior a temperatura baixa (73°C), que é justificado pelo facto da ligação ser de

madeira e apresentar uma elevada espessura e, conseqüentemente, dificultar a propagação do calor.

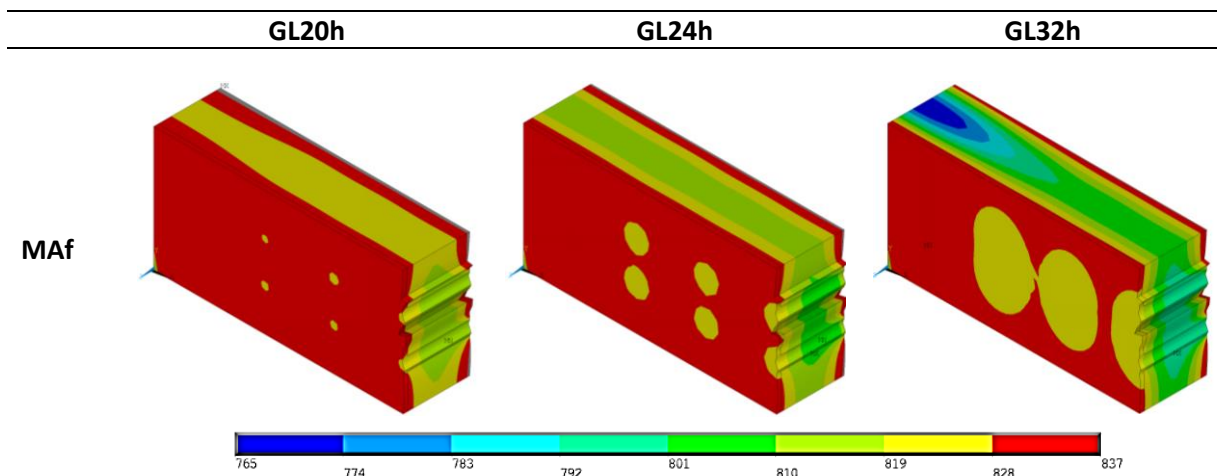


Figura 38-Campos de temperatura da ligação MAf após 1800s

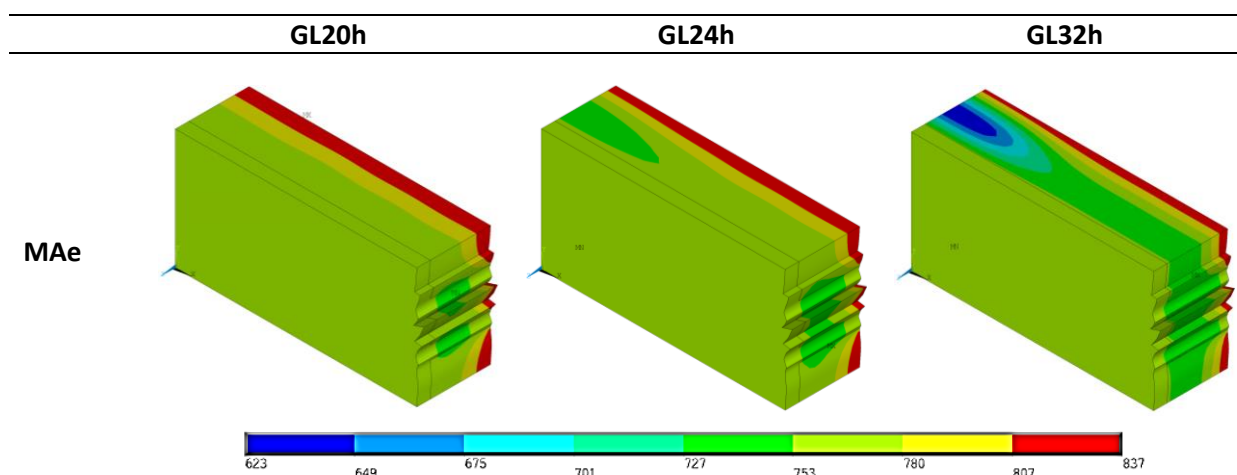
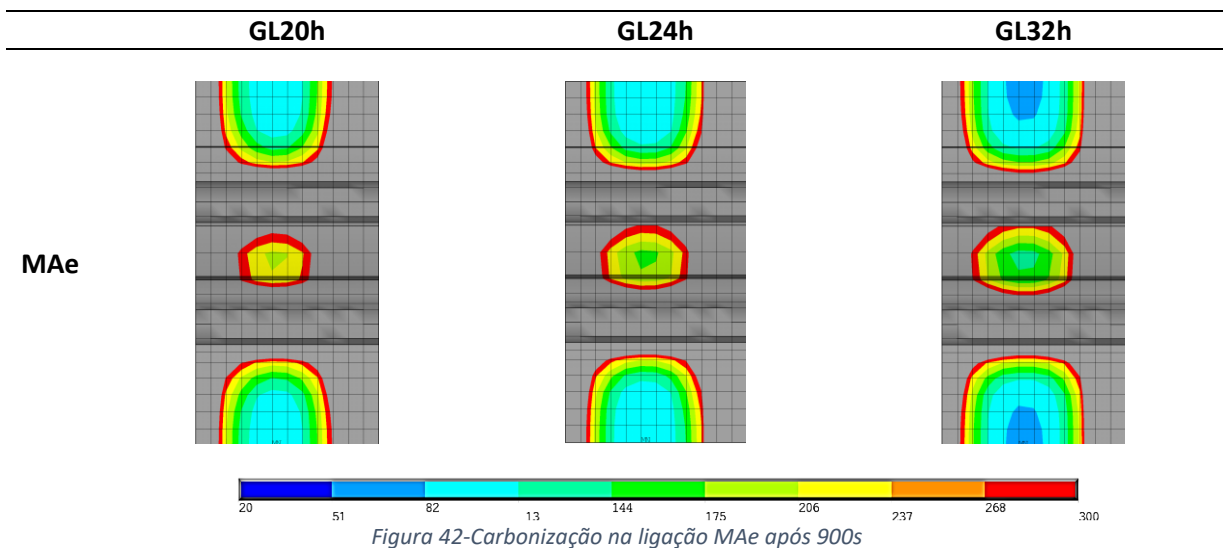
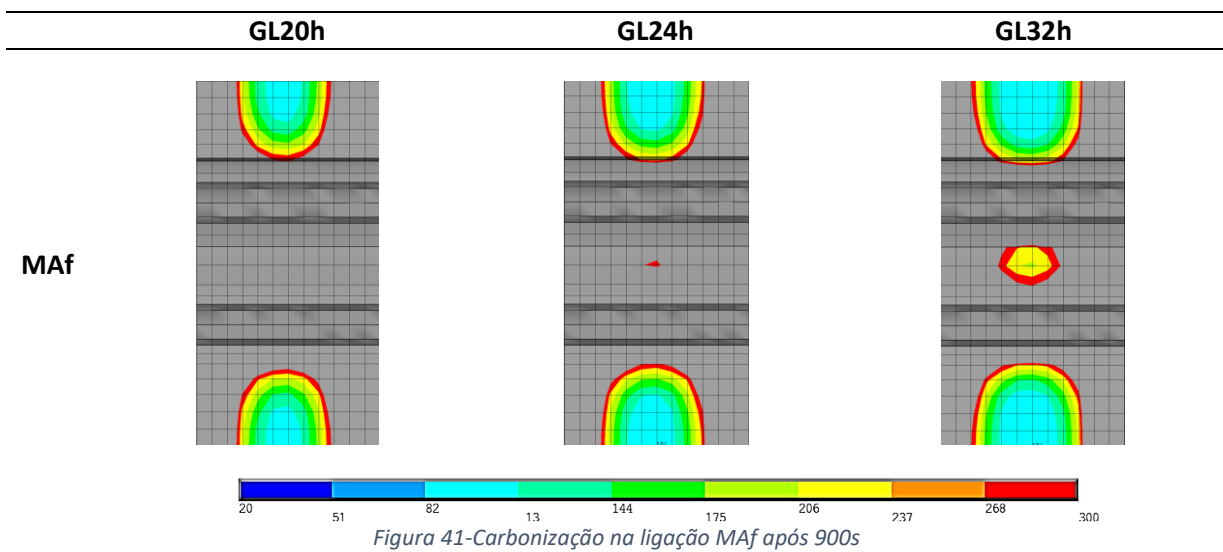
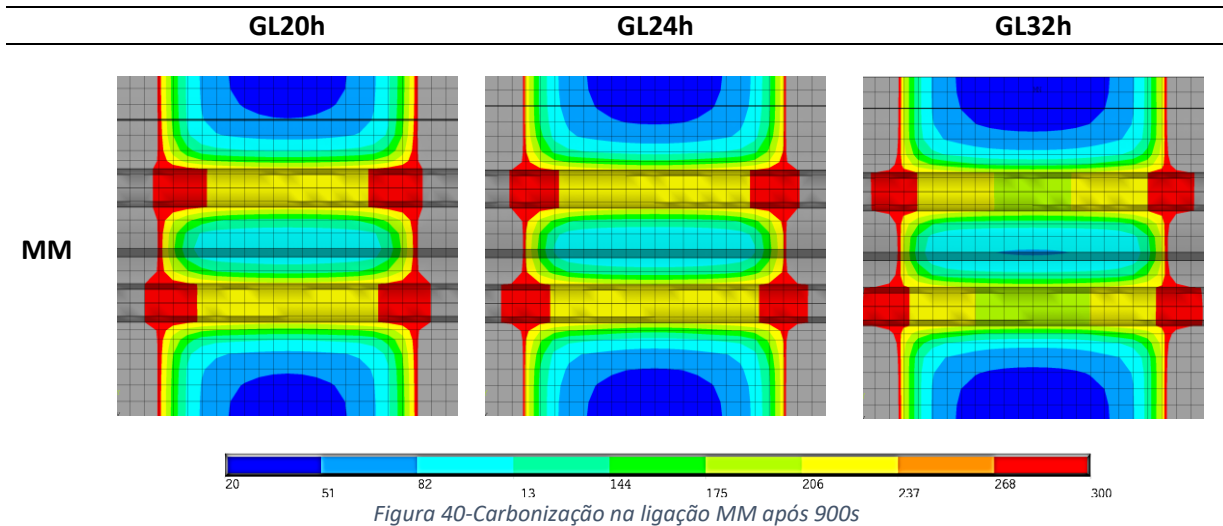


Figura 39-Campos de temperatura da ligação MAe após 1800s

No que diz respeito às ligações MAf e MAe, ambas apresentam uma variação de temperaturas num patamar de valores consideravelmente alto (765°C-837°C na ligação MAf e 623°C-837°C na ligação MAe). Toda a ligação estará totalmente carbonizada ao fim de 1800s. Em ambas as ligações são visíveis, uma vez mais, a influência da massa volúmica na propagação de calor, onde a ligação com maior massa volúmica (GL32) representa a ligação com temperaturas mais baixas. Comparativamente à ligação MAf, a ligação MAe é caracterizada por uma gama de temperaturas mais diferenciada em ambas as faces, verificando-se temperaturas mais baixas (na ordem dos 100°C) na face da chapa de aço, comparada com a face de madeira, justificando a maior dissipação do calor, aquando do aumento da espessura da chapa de aço.

6.4. Carbonização

As Figuras 40, 41 e 42, apresentam a carbonização verificada no interior da ligação na madeira (nos planos de corte previamente mencionados), para um instante de 900s. Salienta-se o facto de, para esta análise, ter-se removido todo o material em aço para uma melhor observação da carbonização existente.



Na ligação MM observa-se que existe um volume de madeira carbonizada baixo, e com a mesma profundidade de carbonização em ambos os lados da madeira devido à simetria da ligação. Verifica-se também que as regiões em torno das cavilhas serão as próximas a serem carbonizadas, uma vez que possuem as maiores temperaturas registadas da madeira não carbonizada (perto

dos 300°C). Relativamente às ligações MAf e MAe, verifica-se que a profundidade de carbonização do lado da face, sem a chapa de aço (lado direito), é idêntica à registada na ligação MM. No entanto, na face em contacto com a chapa de aço, a profundidade de carbonização é inferior (sendo na ligação MAe mais visível essa diminuição) devido ao facto da chapa de aço dificultar a propagação de calor para o interior da ligação, comparativamente à face da madeira exposta diretamente ao fogo. Salienta-se, ainda, que em todas as ligações o efeito da massa volúmica é visível, onde uma maior massa volúmica resulta em campos de temperatura mais baixos.

Com base em três instantes de tempo de exposição ao fogo (900s, 1000s e 1100s) foi efetuada a medição da profundidade de carbonização para cada ligação em cada face (sendo que na ligação MM apenas é necessária a observação de uma face, tendo em conta a simetria da ligação). Partindo do tamanho da aresta de cada elemento da malha (4 mm) foi possível realizar a medição. Posteriormente efetuou-se a média dos intervalos de tempo, bem como da profundidade de carbonização, calculando-se a velocidade média de carbonização para cada face da ligação, variando a massa volúmica da madeira. O procedimento adotado está exposto no apêndice B. Na Figura 43 podem observar-se os resultados obtidos.

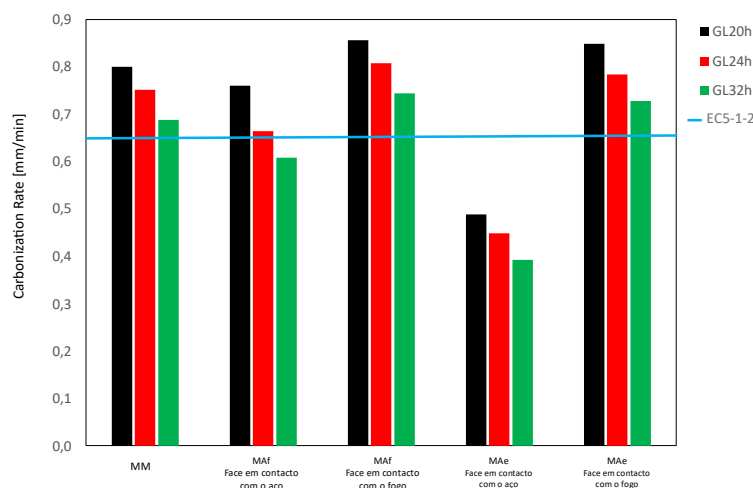


Figura 43-Velocidade de carbonização média para as ligações em estudo

Após a análise das diferentes velocidades de carbonização, comparando-se com o estipulado no EC5-1-2 [14], é possível tirar-se algumas conclusões. Inicialmente, verifica-se que a velocidade de carbonização (com exceção da ligação MAe na face em contacto com o aço) globalmente é maior do que a considerada no EC5-1-2 [14], de 0.65 mm/min. Isto ocorre devido ao facto de no EC5-1-2 [14] a consideração é para a existência de um único material (madeira) ao fogo e para uma espessura da madeira de 20 mm, ou seja, menor do que a considerada no presente estudo. Por último, verifica-se que a massa volúmica interfere na velocidade de carbonização, na medida em que quanto maior for, menor será a velocidade de carbonização. Este comportamento é comprovado em todas as ligações estudadas, independentemente da gama de velocidades registadas.

Na Figura 44 é possível verificar o efeito da carbonização nos elementos de madeira para cada ligação em estudo, no instante de tempo de 900s. É possível verificar o efeito da massa volúmica da madeira nas ligações possuem uma chapa de aço (quanto maior é a massa volúmica, menor é o volume carbonizado, nomeadamente em torno das cavilhas). Relativamente à ligação MM, para o instante de tempo de 900 s, o impacto da massa volúmica da madeira na carbonização ainda

não é muito significativo, devido ao facto de esta ligação apresentar uma maior resistência térmica.

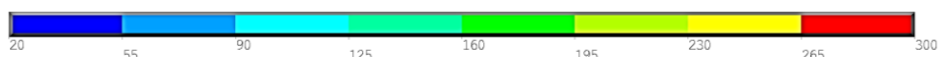
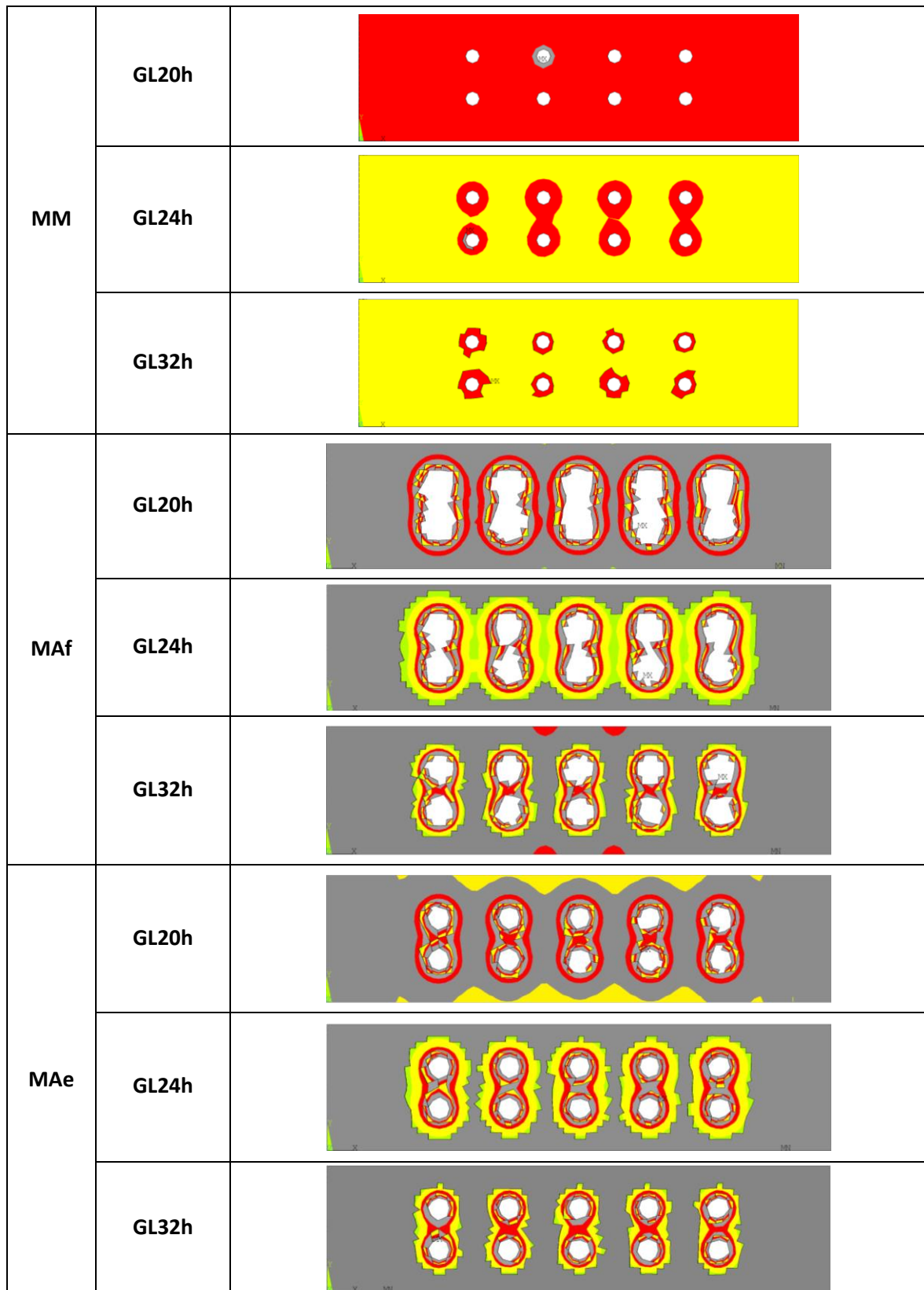


Figura 44-Efeito da carbonização nas ligações em estudo, com a remoção do aço.

6.5. Resistência mecânica das ligações ao fogo

Na análise do modelo termomecânico, foi avaliada a resistência ao fogo, combinado com a aplicação de uma carga de tração linear incremental.

Inicialmente, foi realizada uma análise estrutural mecânica num instante inicial, em que a ação do fogo é nula. Esta primeira análise permite a verificação da carga máxima suportada pela ligação, bem como a validação da metodologia já utilizada, comparando esse valor com o valor de cálculo na ligação respectiva, tendo por base o EC5-1-2 [14].

Quando se considera a atuação do fogo, e à medida que o tempo de exposição aumenta, pode-se observar um decréscimo da carga resistente.

Os resultados obtidos podem ser observados nas Figuras 45, 46 e 47.

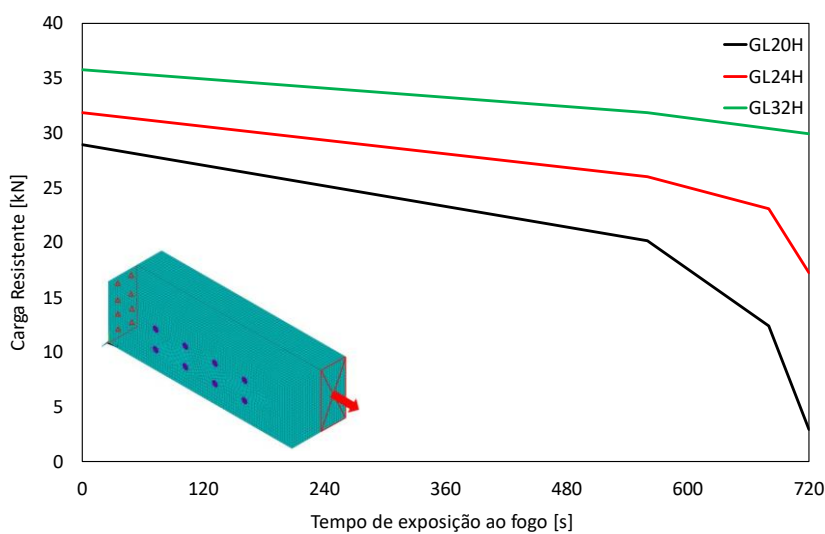


Figura 45-Carga resistente da ligação MM em função do tempo de exposição ao fogo

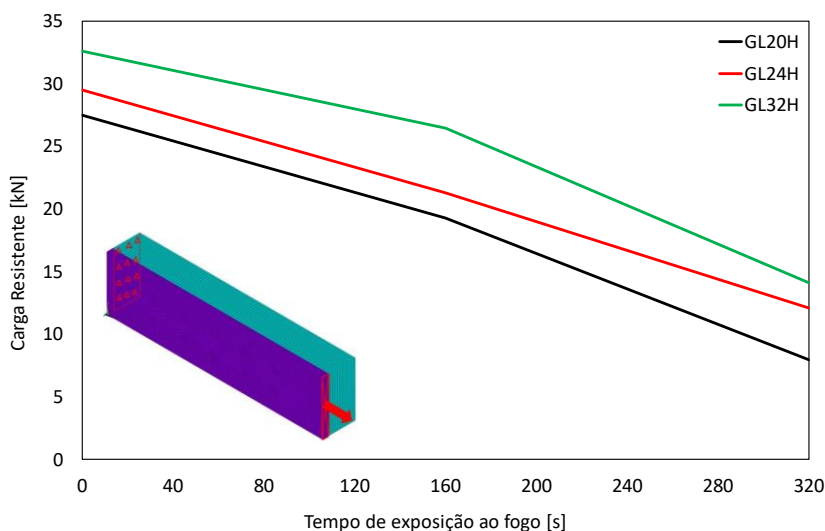


Figura 46-Carga resistente da ligação MAf em função do tempo de exposição ao fogo

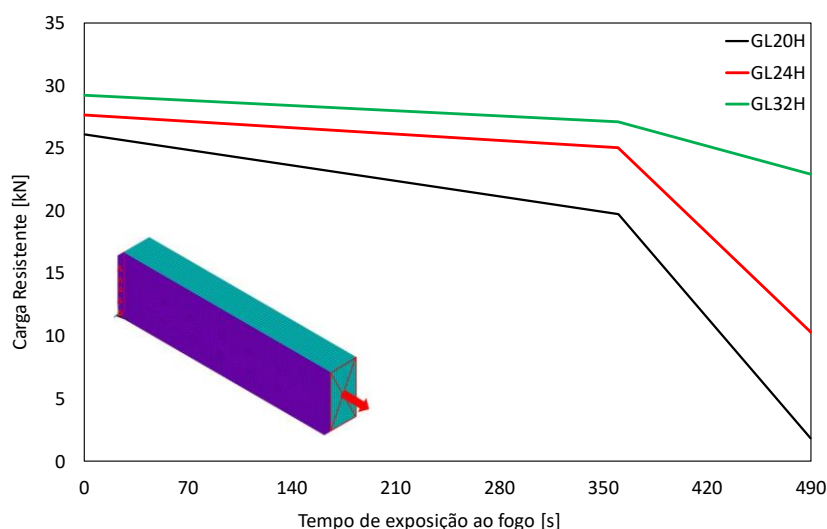


Figura 47-Carga resistente da ligação MAe em função do tempo de exposição ao fogo

Relativamente à ligação MM os resultados da carga resistente foram obtidos para os instantes de tempos 0s, 560s, 680s e 720s. Verifica-se que até ao instante de 560s a ligação perde cerca 8.7-3.9 kN da carga resistente inicial (30.3-10.9%) e que nos 160s posteriores, a ligação perdeu, aproximadamente, 17-1.9 kN da carga resistente inicial (85.5-6.1% da carga resistente que ainda possuía). Esta ligação apresenta a melhor resistência ao fogo, dentre as três ligações estudadas, devido ao facto de ser a ligação com maior volume de madeira. No que diz respeito aos resultados para as diferentes massas volúmicas, denota-se um impacto significativo desta mesma propriedade, nomeadamente para a GL32h, conferindo mais resistência ao longo da exposição do fogo do que nas restantes massas volúmicas.

Já a ligação MAf demonstrou os piores resultados de resistência ao fogo, tendo-se calculado os valores de carga resistente para 0s, 160s e 320s. Nos primeiros 160s de exposição, a carga resistente reduz entre 8.2-6.2 kN (29.9-18.9%) e, até ao último instante, verifica-se uma redução da carga resistente entre 11.3-12.3 kN (58.7-46.6%). Esta ligação apresenta a redução mais proporcional ao longo do tempo da exposição ao fogo, entre as ligações estudadas.

Por último, a ligação MAe apresenta um comportamento favorável em condições de fogo até ao primeiro instante de tempo analisado, sendo que até ao último instante existiu uma redução significativa da carga resistente. Até ao primeiro instante de tempo analisado (360s) a carga resistente inicial reduziu cerca de 6.3-2.1 kN (24.3-7.2%), no entanto, para o último instante (490s), a carga resistente diminuiu cerca de 17.9-4.2 kN (90.7-15.5%). Também nesta ligação, a classe de madeira GL32h, apresenta a melhor resistência ao longo da exposição ao fogo, verificando-se um menor declive no gráfico que representa a redução de carga de resistência ao longo do tempo de exposição ao fogo.

As figuras seguintes apresentam o campo de temperatura e de tensão equivalente de Von Mises observado nas ligações em estudo, quer na madeira GL32h (visto ser a classe de madeira com melhor desempenho), quer no aço existente na ligação, no instante de tempo em que a ligação atinge o máximo valor da tensão de cedência do material.

Nas Figuras 48 e 49 são apresentados os resultados para o instante de 720s da ligação MM, onde a tensão máxima verificada na madeira (24 MPa) está localizada junto à face, na interface entre ambas as placas. Registou-se ainda algum volume de madeira já carbonizado, sendo esta zona da madeira a que apresenta uma tensão nula. No que diz respeito às tensões verificadas nas cavilhas, estas são superiores às da madeira, atingindo os 109 MPa no centro das mesmas, sendo que nas extremidades a tensão é nula.

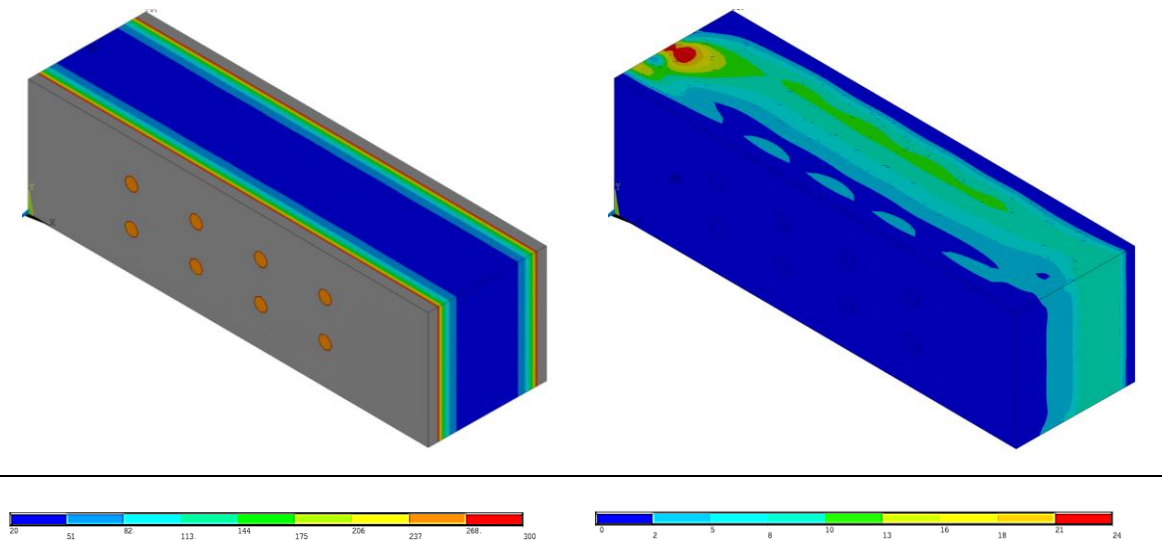


Figura 48-Campo de temperaturas [°C] e tensão equivalente de Von Mises [MPa] na madeira GL32h da ligação MM a 720s

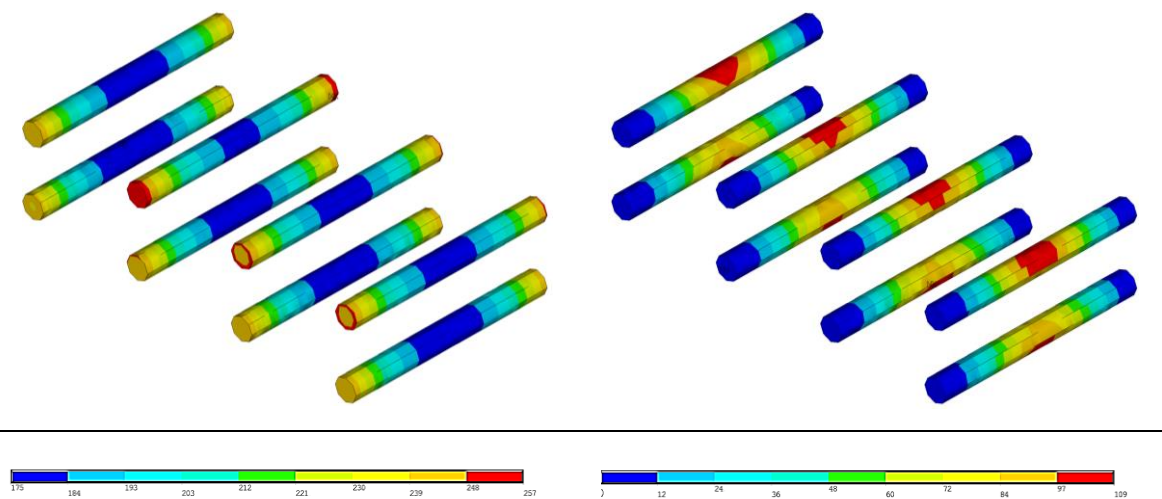


Figura 49-Campo de temperaturas [°C] e tensão equivalente de Von Mises [MPa] no aço da ligação MM a 720s

Nas Figuras 50 e 51 são apresentados os resultados para o instante de 320s da ligação MAf, onde a tensão máxima verificada na madeira (21.48MPa) está localizada na interface entre os materiais, apresentando um valor nulo na zona carbonizada. Relativamente ao aço, a tensão máxima é superior (200MPa), situada nas cavilhas, junto à chapa de aço, verificando-se uma tensão nula na extremidade oposta.

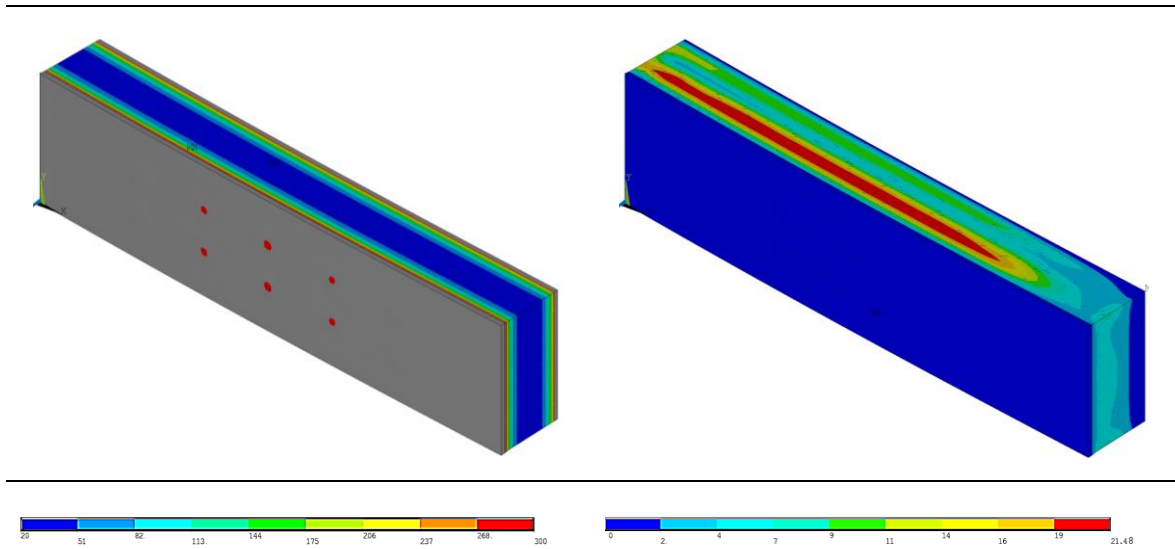


Figura 50-Campo de temperaturas [°C] e tensão equivalente de Von Mises [MPa] na madeira GL32h da ligação MAf a 320s

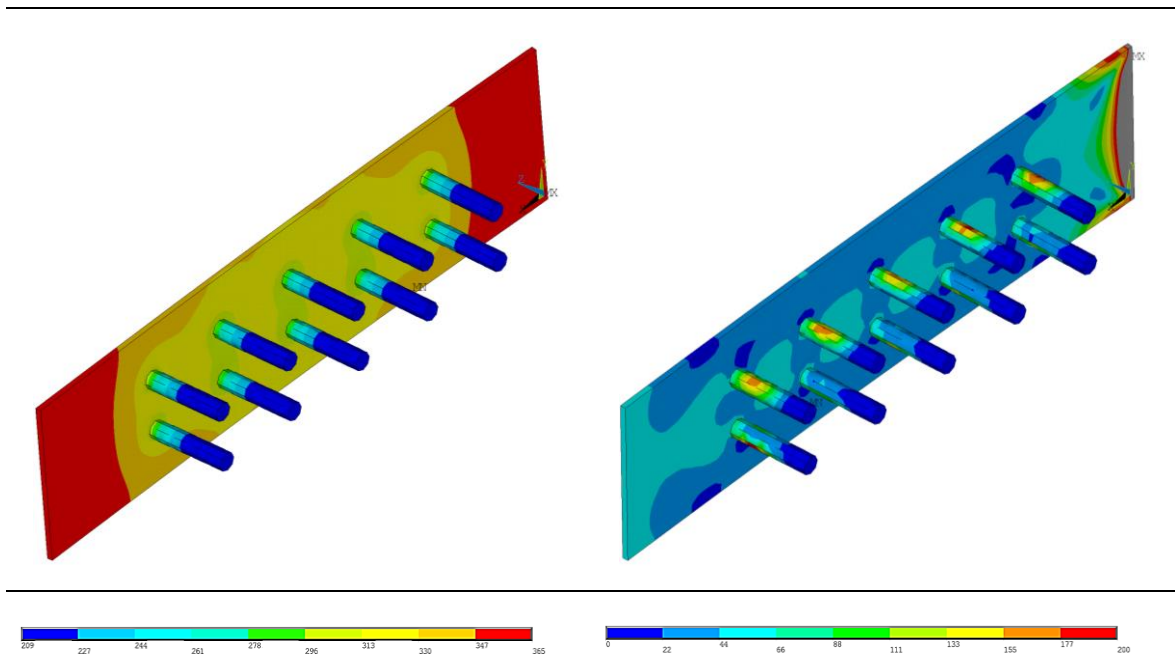


Figura 51-Campo de temperaturas [°C] e tensão equivalente de Von Mises [MPa] no aço da ligação MAf a 320s

Nas Figuras 52 e 53 são apresentados os resultados para o instante de 490s da ligação MAe, onde se verifica uma tensão máxima na madeira (21.97MPa) semelhante à registada na ligação MAf. No que diz respeito ao aço, este apresenta uma tensão máxima de 230 MPa, situada nas cavilhas próximo da chapa de aço, verificando-se uma tensão nula na extremidade oposta.

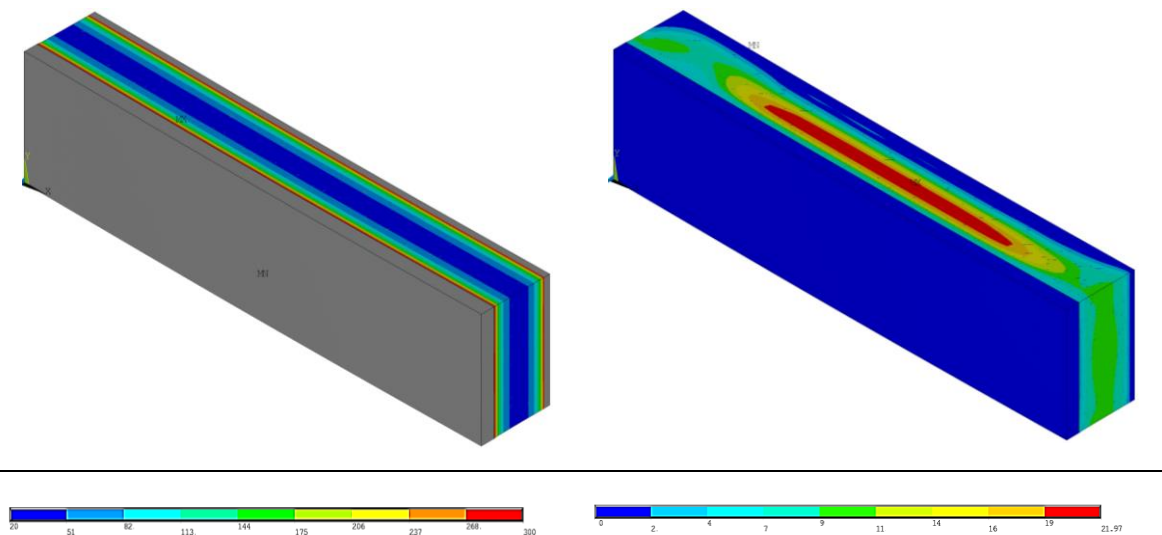


Figura 52-Campo de temperaturas [°C] e tensão equivalente de Von Mises [MPa] na madeira GL32h da ligação MAe a 490s

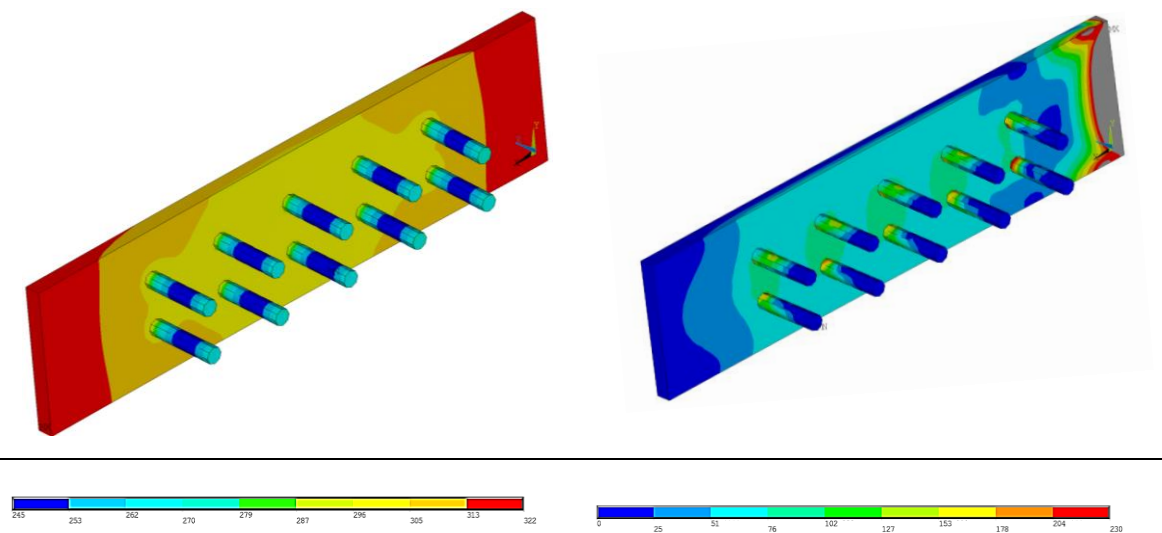


Figura 53-Campo de temperaturas [°C] e tensão equivalente de Von Mises [MPa] no aço da ligação MAe a 490s

7. CONCLUSÃO

7.1. Conclusões finais

O estudo das ligações em madeira aplicadas na construção, particularmente sob ação do fogo, é um campo de pesquisa ainda pouco explorado. O tipo de ligações em estudo no presente trabalho incidiu na análise de ligações de madeira-aço submetidas a corte simples e sob condições de incêndio. É ainda de extrema importância avançar nesta área, não só pelos estudos ainda recentes neste campo de aplicação, mas também devido às propriedades sustentáveis da madeira, que pode desempenhar um papel crucial no combate às alterações climáticas.

A madeira apresenta uma ampla gama de aplicações na construção. Devido a essas características, o interesse acadêmico em relação a esse material tem crescido significativamente. Essa crescente atenção tem sido de extrema utilidade na avaliação da segurança estrutural dos elementos de madeira, bem como na atualização dos regulamentos existentes, especialmente o Eurocódigo 5. Nesse sentido, a comunidade científica tem-se dedicado a investigar os aspectos mecânicos e de comportamento ao fogo dos elementos de madeira, a fim de fornecer bases sólidas para atualizações regulamentares. Essa pesquisa visa desenvolver modelos mais avançados e precisos, capazes de estimar com maior precisão as capacidades estruturais da madeira sob diferentes condições de fogo.

Os resultados obtidos por meio da análise termomecânica revelaram que a capacidade de carga das ligações é afetada pelo tempo de exposição ao fogo, devido às alterações nas propriedades da madeira e do aço em resposta ao aumento da temperatura. Esses resultados indicam que a carga exerce influência direta no comportamento resistente da ligação, juntamente com a degradação das propriedades mecânicas dos materiais, resultante das altas temperaturas.

Através das análises numéricas realizadas, foi possível observar o impacto da massa volúmica da madeira nas propriedades das ligações. Conclui-se que a madeira com maior massa volúmica, especificamente a classe GL32h, apresentou resistência térmica e mecânica das ligações, quando comparada às outras classes de madeira consideradas. Esse desempenho superior pode ser atribuído à menor transferência de calor para a ligação.

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que a ligação MM demonstrou uma melhor resistência tanto do ponto de vista térmico quanto mecânico em comparação com a ligação MAf. A ligação MM exibiu uma resistência térmica mais elevada, o que indica uma capacidade superior de suportar temperaturas elevadas sem sofrer degradação significativa. Além disso, a ligação MM também apresentou um desempenho mecânico superior, indicando uma maior capacidade de suportar cargas estruturais. Por outro lado, a ligação MAf revelou resultados inferiores tanto em termos de resistência térmica quanto mecânica, sugerindo que essa ligação é mais suscetível a danos e falhas quando submetida a condições de temperatura elevada e cargas estruturais.

7.2. Limitações e trabalhos futuros

O estudo desenvolvido ressalta a necessidade de pesquisas adicionais e do desenvolvimento de diretrizes específicas para o projeto de ligações em madeira sujeitas a situações de incêndio, e neste caso em corte simples.

Os modelos desenvolvidos apresentam como principais limitações e dificuldades a análise mecânica, uma vez que as ligações não apresentam simetria transversalmente, sendo o seu comportamento altamente imprevisível, levando a muitas aprimoramentos nos modelos desenvolvidos até se alcançar valores congruentes com a análise analítica.

Como proposta para trabalhos futuros, seria importante continuar a realizar novos modelos numéricos tridimensionais para estudos termomecânicos, variando alguns parâmetros subjacentes à análise, tal como, a espessura da chapa de aço e o número total de cavilhas, bem como a localização das mesmas. Noutra perspectiva, seria interessante a análise de ligações que estejam submetidas a mais do que um esforço, atuando em mais do que uma direção, uma vez que, numa construção, este é o cenário mais usual.

Com um maior entendimento desses aspetos, será possível aperfeiçoar a segurança estrutural e a eficiência das construções em madeira, aproveitando ao máximo as suas propriedades sustentáveis e contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. Wiesner and L. Bisby, "The structural capacity of laminated timber compression elements in fire: A meta-analysis," *Fire Saf J*, vol. 107, pp. 114–125, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.firesaf.2018.04.009.
- [2] E. M. M. Fonseca, P. A. S. Leite, L. D. S. Silva, V. S. B. Silva, and H. M. Lopes, "Parametric Study of Three Types of Timber Connections with Metal Fasteners Using Eurocode 5," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 3, Feb. 2022, doi: 10.3390/app12031701.
- [3] Olle Carling, "Fire resistance of joint details in loadbearing timber construction - A literature survey," 1989.
- [4] L. Peng, G. Hadjisophocleous, J. Mehaffey, and M. Mohammad, "Fire resistance performance of unprotected woodwood and woodsteelwood connections: A literature review and new data correlations," *Fire Saf J*, vol. 45, no. 6–8, pp. 392–399, 2010, doi: 10.1016/j.firesaf.2010.08.003.
- [5] J. Noren, "Load-bearing capacity of nailed joints exposed to fire," *Fire Mater*, vol. 20, no. 3, pp. 133–143, May 1996, doi: 10.1002/(SICI)1099-1018(199605)20:3.
- [6] J. Luo, M. He, Z. Li, Z. Gan, X. Wang, and F. Liang, "Experimental and numerical investigation into the fire performance of glulam bolted beam-to-column connections under coupled moment and shear force," *Journal of Building Engineering*, vol. 46, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.job.2021.103804.
- [7] Dhima D, "Verification experimentale de la resistance au feu des assemblages delements en bios.," *cticm*, 1999.
- [8] L. Peng, G. Hadjisophocleus, J. Mehaffey, and M. Mohammad, "Predicting the Fire Resistance of Wood-Steel-Wood Timber Connections," *Fire Technol*, vol. 47, no. 4, pp. 1101–1119, 2011, doi: 10.1007/s10694-009-0118-4.
- [9] M. Audebert, D. Dhima, M. Taazount, and A. Bouchaïr, "Numerical investigations on the thermo-mechanical behavior of steel-to-timber joints exposed to fire," *Eng Struct*, vol. 33, no. 12, pp. 3257–3268, Dec. 2011, doi: 10.1016/j.engstruct.2011.08.021.
- [10] E. Resch and M. Kaliske, "Numerical analysis and design of double-shear dowel-type connections of wood," *Eng Struct*, vol. 41, pp. 234–241, Aug. 2012, doi: 10.1016/j.engstruct.2012.03.047.
- [11] B. H. Xu, A. Bouchaïr, M. Taazount, and P. Racher, "Numerical simulation of embedding strength of glued laminated timber for dowel-type fasteners," *Journal of Wood Science*, vol. 59, no. 1, pp. 17–23, Feb. 2013, doi: 10.1007/s10086-012-1296-0.
- [12] M. Audebert, D. Dhima, M. Taazount, and A. Bouchaïr, "Thermo-mechanical behaviour of timber-to-timber connections exposed to fire," *Fire Saf J*, vol. 56, pp. 52–64, 2013, doi: 10.1016/j.firesaf.2013.01.007.
- [13] J. Schmid, M. Klippel, A. Just, and A. Frangi, "Review and analysis of fire resistance tests of timber members in bending, tension and compression with respect to the Reduced Cross-Section Method," *Fire Saf J*, vol. 68, pp. 81–99, 2014, doi: 10.1016/j.firesaf.2014.05.006.
- [14] *EN 1995-1-2: Eurocode 5: "Design of Timber Structures, Part 1–2: General Rules-Structural Fire Design."* CEN, Bruxelas, Bélgica, 2004.
- [15] Dhionis Dhima, Maxime Audebert, and Abdelhamid Bouchaïr, "Analysis of the Thermo-Mechanical Behaviour of Steel-to-Timber Connections in Bending," *Journal of Structural Fire Engineering*, Jun. 2014.
- [16] I. El-Houjeyri *et al.*, "Experimental investigations on adhesive free laminated oak timber beams and timber-to-timber joints assembled using thermo-mechanically compressed wood dowels," *Constr Build Mater*, vol. 222, pp. 288–299, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.163.

- [17] A. Szász, V. Hlavička, É. Lublók, and A. Biró, "Numerical modelling of the fire resistance of double sheared steel-to-timber connections," *Journal of Building Engineering*, vol. 37, May 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2021.102150.
- [18] V. Silva and E. M. M. Fonseca, "Design of steel-wood-steel connections at the ambient and elevated temperature," *Journal of Computational Applied Mechanics*, vol. 52, no. 1, pp. 85–101, Mar. 2021, doi: 10.22059/jcamech.2021.315728.579.
- [19] M. Basterrechea-Arévalo, J. M. Cabrero, B. Iraola, and R. Goñi, "Modelling of moment transmitting beam-to-column timber connections accounting for frictional transmission," *Eng Struct*, vol. 247, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.113122.
- [20] E. M. M. Fonseca, D. C. S. Coelho, and L. M. S. Barreira, "Structural safety in wooden beams under thermal and mechanical loading conditions," *International Journal of Safety and Security Engineering*, vol. 2, no. 3, pp. 242–255, 2012, doi: 10.2495/safe-v2-n3-242-255.
- [21] J. Wang, J. Liu, J. Li, and J. Y. Zhu, "Characterization of microstructure, chemical, and physical properties of delignified and densified poplar wood," *Materials*, vol. 14, no. 19, Oct. 2021, doi: 10.3390/ma14195709.
- [22] A. Cloutier, C. Fang, N. Mariotti, and P. Blanchet, "Densification of Wood Veneers Under the Effect of Heat, Steam and Pressure," *European Journal of Wood and Wood Products*, 2011, doi: 10.1007/s00107-011-0524-4.
- [23] H. Guo, Y. Liu, Y. Meng, H. Huang, C. Sun, and Y. Shao, "A Comparison of the energy saving and carbon reduction performance between reinforced concrete and cross-laminated timber structures in residential buildings in the severe cold region of China," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 9, no. 8, Aug. 2017, doi: 10.3390/su9081426.
- [24] L. Mallo, M. Fernanda Laguarda Mallo, and O. Espinoza, "Outlook for CLT," 2014.
- [25] L. Mallo, Espinoza, O. Awareness, "Perceptions and willingness to adopt cross-laminated timber by the architecture community in the United States." *Prod.* 2015, 94, 198–210.
- [26] I. M. Okuni and T. E. Bradford, "Modelling of Elevated Temperature Performance of Adhesives Used in Cross Laminated Timber: An Application of ANSYS Mechanical 2020 R1 Structural Analysis Software," Feb. 2021, p. 46. doi: 10.3390/iecf2020-07902.
- [27] K. F. Darby, "A case study to investigate the life cycle carbon emissions and carbon storage capacity of a cross laminated timber, multi-storey residential building.," *In Proceedings of the Sustainable Building Conference*, vol. 13, Jul. 2013.
- [28] Y. Liao *et al.*, "Feasibility of manufacturing cross-laminated timber using fast-grown small diameter eucalyptus lumbers," *Constr Build Mater*, vol. 132, pp. 508–515, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.027.
- [29] R. Brandner, G. Flatscher, A. Ringhofer, G. Schickhofer, and A. Thiel, "Cross laminated timber (CLT): overview and development," *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 74, no. 3, pp. 331–351, May 2016, doi: 10.1007/s00107-015-0999-5.
- [30] C. B. Ong, "Glue-laminated timber (Glulam)," *Wood Composites*, pp. 123–140, 2015.
- [31] M. Augustin, "Structural Timber," *Handbook 1-Timber Structures*, L. d. V. P. Project, Ed. República Checa: TEMTIS, 2008, pp. 28-39.
- [32] D. W. Green, J. E. Winandy, and D. E. Kretschmann, "Mechanical properties of wood, Chapter 4," *Wood Handbook—Wood as an Engineered Material*, F. P. Laboratory, Ed. Madison WI, USA: University Press of the Pacific, 1999.
- [33] *BS EN 1194:1999 Timber structures, Glued laminated timber, Strength classes and determination of characteristic values*. BSI, Reino Unido, 1999.
- [34] *EN 1480: Timber structures - Glued laminated timber and glued solid timbER - Requirements*. CEN, Bruxelas, Bélgica, 2013.
- [35] C. Gomes, E. M. M. Fonseca, and H. M. Lopes, "Thermomechanical Analysis of Steel-to-Timber Connections under Fire and the Material Density Effect," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 20, Oct. 2022, doi: 10.3390/app122010516.

- [36] König J, Walleij L, "Timber frame assemblies exposed to standard and parametric fires, Part 2: a design model for standard fire exposure." Swedish Institute for Wood Technology Research, Stockholm.
- [37] H. Cruz, D. Jones, and L. Nunes, "Wood," *Materials for Construction and Civil Engineering*, Gonçalves M. e M. F., Eds. Berlin, Alemanha: Springer, 2015, doi: 10.1007/978-3-319-08236-3_12.
- [38] *EN 1993-1-1: Eurocode 3: "Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings."* CEN, Bruxelas, Bélgica, 2010.
- [39] *BS EN 10025-2. Hot Rolled Products of Structural Steels—Part 2: Technical Delivery Conditions for non-Alloy Structural Steels.* CEN, Bruxelas, Bélgica, 2004.
- [40] E. M. M. Fonseca and M. M. Paulo (1999), Finite element modelling of thermo-elastoplastic behaviour of hot-rolled steel profiles submitted to fire, *Métodos Numéricos en Ingeniería*, Vila Real.
- [41] Fonseca. E. M. M., and Magalhães. C. A. (2002), Métodos avançados de cálculo de estruturas metálicas submetidas à ação do fogo, *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, Vol. 18 (3), pp. 367–384.
- [42] *EN 1993-1-2: Eurocode 3: "Design of Steel Structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design."* CEN, Bruxelas, Bélgica, 2010.
- [43] E. M. M. Fonseca and P. M. M. Vila Real (1998), "Modelação Numérica do Comportamento Termo-Mecânico de Componentes Metálicos Sujeitas ao Fogo."
- [44] *EN 1993-1-2: Eurocode 3: "Design of Steel Structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design."*, CEN, Bruxelas, Bélgica, 2010.
- [45] Ghonsla, *Technical Specifications of Laminated Gypsum Tiles*. Pakistan, 2015.
- [46] M. Imran, M. S. Liew, M. S. Nasif, E. M. Gracia, K. U. Danyaro, and M. U. Niazi, "Thermal and Mechanical Response of Partially Protected Steel I-Beam under Fire," *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 203, p. 6009.
- [47] T. L. Bergman, F. P. Incropera, D. P. DeWitt, and A. S. Lavine, *Fundamentals of heat and mass transfer*, 7th ed. Nova Jersey, EUA: Wiley, 2011.
- [48] J. B. J. Fourier, *Théorie Analytique de la Chaleur*. Paris: Firmin Didot, 1822.
- [49] Janssens ML, "Thermo-physical properties for wood pyrolysis models," 1994.
- [50] M. Audebert, D. Dhima, and A. Bouchaïr, "Proposal for a new formula to predict the fire resistance of timber connections," *Eng Struct*, vol. 204, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.110041.
- [51] Ghonsla, *Technical Specifications of Laminated Gypsum Tiles*. Pakistan, 2015.
- [52] A. H. Buchanan and A. K. Abu, *Structural Design for Fire Safety*. Chichester: John Wiley & Sons, 2017.
- [53] J. P. Holman, *Heat Transfer*. 10th ed. Nova York: McGraw Hill, 2010.
- [54] P. Vila Real, *Incêndio em Estruturas Metálicas - Cálculo Estrutural*, 1st ed. Amadora, 2003.
- [55] *EN 1991-1-2: Eurocode 1: "Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire."* CEN, Bruxelas, Bélgica, 2002.
- [56] J.-M. Franssen and P. Vila Real, *Fire Design of Steel Structures: EC1: Actions on structures; Part 1-2: Actions on structure exposed to fire; EC3: Design of steel structures*. 2nd ed. Berlin: John Wiley & Sons, 2016.
- [57] R.H. White, "Charring rates of different wood species," University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, USA, 1988.
- [58] A. I. Bartlett, R. M. Hadden, and L. A. Bisby, "A Review of Factors Affecting the Burning Behaviour of Wood for Application to Tall Timber Construction," *Fire Technology*, vol. 55, no. 1. Springer New York LLC, Jan. 15, 2019. doi: 10.1007/s10694-018-0787-y.
- [59] Audebert M., "Approche expérimentale et modélisation du comportement au feu d'assemblages bois sous différents types de sollicitations," Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand and CSTB, 233p; France, 2010.

- [60] S. H. Ingberg, H. K. Griffin, W. C. Robinson, and R. E. Wilson, "Fire tests of building columns," *J Franklin Inst*, vol. 191, no. 6, pp. 823–827, Jun. 1921, doi: 10.1016/S0016-0032(21)90681-1.
- [61] Z. Shu, Z. Li, X. Yu, J. Zhang, and M. He, "Rotational performance of glulam bolted joints: Experimental investigation and analytical approach," *Constr Build Mater*, vol. 213, pp. 675–695, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.002.
- [62] T. Mori, M. Nakatani, and S. Tesfamariam, "Performance of semirigid timber frame with Lagscrewbolt connections: experimental, analytical, and numerical model results," *International Journal of Advanced Structural Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 387–403, Dec. 2015, doi: 10.1007/s40091-015-0107-4.
- [63] T. K. Bader, M. Schweigler, G. Hochreiner, E. Serrano, B. Enquist, and M. Dorn, "Dowel deformations in multi-dowel LVL-connections under moment loading," *Wood Mater Sci Eng*, vol. 10, no. 3, pp. 216–231, Jul. 2015, doi: 10.1080/17480272.2015.1070372.
- [64] N. Dourado, F. G. A. Silva, and M. F. S. F. de Moura, "Fracture behavior of wood-steel dowel joints under quasi-static loading," *Constr Build Mater*, vol. 176, pp. 14–23, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.230.
- [65] *EN 1995-1-1: Eurocode 5: "Design of Timber Structures—Part 1-1: General—Common Rules and Rules for Buildings."* CEN, Bruxelas, Bélgica, 2004.
- [66] M. Yurrita and J. M. Cabrero, "On the need of distinguishing ductile and brittle failure modes in timber connections with dowel-type fasteners," *Eng Struct*, vol. 242, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.112496.
- [67] Ruben Filipe Pereira da Silva, "Cálculo ao Fogo de Ligações de Madeira," Universidade de Aveiro, Aveiro, 2009.
- [68] K. Jones, J. Stegemann, J. Sykes, and P. Winslow, "Adoption of unconventional approaches in construction: The case of cross-laminated timber," *Constr Build Mater*, vol. 125, pp. 690–702, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.088.
- [69] U. Berardi, "A cross-country comparison of the building energy consumptions and their trends," *Resour Conserv Recycl*, vol. 123, pp. 230–241, 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2016.03.014.
- [70] P. C. P. Silva, M. Almeida, L. Bragança, and V. Mesquita, "Development of prefabricated retrofit module towards nearly zero energy buildings," *Energy Build*, vol. 56, pp. 115–125, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.09.034.
- [71] J. Monahan and J. C. Powell, "An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing: A case study using a lifecycle assessment framework," *Energy Build*, vol. 43, no. 1, pp. 179–188, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.09.005.
- [72] P. K. Borjesson and L. Gustavsson, "Greenhouse gas balances in building construction: wood versus concrete from life-cycle and forest land-use perspectives." *Energy Policy*, vol. 28, pp.575-588, July. 2000, doi: 10.1016/S0301-4215(00)00049-5.
- [73] R. W. Malmshemer, P. Heffernan, S. Brink, D. Crandall, F. Deneke, and C. Galik (2008), Forest Management Solutions for Mitigating Climate Change in the United States About the Authors, *Journal of Forestry*, pp. 115-171.
- [74] S. Construction, "CLTModular Construction: Residential Opportunities," Seattle, USA, 2013.
- [75] F. Teixeira-Dias, J. A. Cruz, R. Valente, and R. Sousa (2010), *Método dos Elementos Finitos: Técnicas de Simulação Numérica em Engenharia*, 1st ed. Lisboa, ISBN: 978-972-304180/09.
- [76] M. K. Thompson e J. M. Thompson, *ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis*. Elsevier Science, 2017.
- [77] M. K. Thompson e J. M. Thompson (2017), *ANSYS Mechanical APDL for Finite Elements Analysis*, San Diego: Elsevier Science, ISBN: 978-0128129814.

- [78] ScienceDirect." Newton-Raphson Method". Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/topics/mathematics/newton-raphson-method>. Acesso em: 4 de maio de 2023.

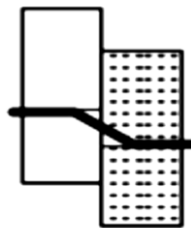
página propositadamente em branco

APÊNDICE A

Tabelas de dimensionamento das ligações à temperatura ambiente com modos de rotura.

MM

Glulam	Carga F _d [kN]	Dimensões Cavilhas d [mm]	Tensão admissível na madeira f _k [N/mm ²]	Número de cavilhas N _t	Número de colunas N _c	Número de linhas N _L	Espaçamento entre cavilhas				Dimensões da ligação				Tensão admissível na madeira f _{t,0,d} [N/mm ²]	Capacidade de carga por ligador e por plano de corte F _{v,rd} [N]	Modo de rotura	f _{d,fi}	E _{d,fi} /A _s	
							a ₁ [mm]	a ₂ [mm]	a _{3,t} [mm]	a _{4,c} [mm]	t ₁ [mm]	W [mm]	L [mm]	H [mm]						t ₂ [mm]
GH20h	10	6	16	10	5	2	30	18	80	18	45	90	280	54	45	10,24	1148,92	(f)	14,72	6,14
	10	8	16	6	3	2	40	24	80	24	45	90	240	72	45	10,24	1907,69	(f)	14,72	6,14
	10	10	16	4	2	2	50	30	80	30	45	90	210	90	45	10,24	2819,51	(f)	14,72	6,14
	15	6	16	14	7	2	30	18	80	18	45	90	340	54	45	10,24	1148,92	(f)	14,72	6,14
	15	8	16	8	4	2	40	24	80	24	45	90	280	72	45	10,24	1907,69	(f)	14,72	6,14
	15	10	16	6	3	2	50	30	80	30	45	90	260	90	45	10,24	2819,51	(f)	14,72	6,14
	20	6	16	18	9	2	30	18	80	18	45	90	400	54	45	10,24	1148,92	(f)	14,72	6,14
	20	8	16	12	6	2	40	24	80	24	45	90	360	72	45	10,24	1907,69	(f)	14,72	6,14
	20	10	16	8	4	2	50	30	80	30	45	90	310	90	45	10,24	2819,51	(f)	14,72	6,14
	20	15	16	10	5	2	30	18	80	18	45	90	280	54	45	12,29	1224,09	(f)	17,66	7,37
GL24h	10	6	19,2	10	5	2	30	18	80	18	45	90	280	54	45	12,29	2032,51	(f)	17,66	7,37
	10	8	19,2	6	3	2	40	24	80	24	45	90	240	72	45	12,29	3003,98	(f)	17,66	7,37
	10	10	19,2	6	3	2	50	30	80	30	45	90	260	90	45	12,29	3003,98	(f)	17,66	7,37
	15	6	19,2	14	7	2	30	18	80	18	45	90	340	54	45	12,29	1224,09	(f)	17,66	7,37
	15	8	19,2	8	4	2	40	24	80	24	45	90	280	72	45	12,29	2032,51	(f)	17,66	7,37
	15	10	19,2	6	3	2	50	30	80	30	45	90	260	90	45	12,29	3003,98	(f)	17,66	7,37
	20	6	19,2	18	9	2	30	18	80	18	45	90	400	54	45	12,29	1224,09	(f)	17,66	7,37
	20	8	19,2	10	5	2	40	24	80	24	45	90	320	72	45	12,29	2032,51	(f)	17,66	7,37
	20	10	19,2	8	4	2	50	30	80	30	45	90	310	90	45	12,29	3003,98	(f)	17,66	7,37
	20	15	19,2	10	5	2	30	18	80	18	45	90	280	54	45	16,38	1308,60	(f)	23,55	9,83
GH32h	10	8	25,6	6	3	2	40	24	80	24	45	90	240	72	45	16,38	2172,84	(f)	23,55	9,83
	10	10	25,6	4	2	2	50	30	80	30	45	90	210	90	45	16,38	3211,39	(f)	23,55	9,83
	15	6	25,6	12	6	2	30	18	80	18	45	90	310	54	45	16,38	1308,60	(f)	23,55	9,83
	15	8	25,6	8	4	2	40	24	80	24	45	90	280	72	45	16,38	2172,84	(f)	23,55	9,83
	15	10	25,6	8	4	2	50	30	80	30	45	90	310	90	45	16,38	3211,39	(f)	23,55	9,83
	20	6	25,6	16	8	2	30	18	80	18	45	90	370	54	45	16,38	1308,60	(f)	23,55	9,83
	20	8	25,6	10	5	2	40	24	80	24	45	90	320	72	45	16,38	2172,84	(f)	23,55	9,83
	20	10	25,6	8	4	2	50	30	80	30	45	90	310	90	45	16,38	3211,39	(f)	23,55	9,83



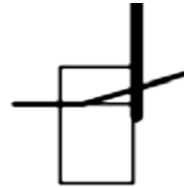
(f)

MAf

Glulam	Carga F_d [kN]	Dimensões cavilhas d [mm]	Tensão admissível na madeira f_k [N/mm ²]	Número cavilhas N_t	Número de colunas N_c	Número de linhas N_L	Espaçamento entre cavilhas				Dimensões da ligação				Tensão admissível na madeira $f_{t,0,d}$ [N/mm ²]	Capacidade de carga por ligador e por plano de corte $F_{v,d}$ [N]	Modo de rotura	$f_{d,n}$	$E_{d,n}/A_s$	
							a_1 [mm]	a_2 [mm]	$a_{3,t}$ [mm]	$a_{4,c}$ [mm]	t_1 [mm]	L [mm]	H [mm]	t_s [mm]						
GH20h	10	6	16	10	5	2	30	18	80	18	45	280	54	3	10,24	1148,92	(b)	14,72	6,14	
	10	8	16	6	3	2	40	24	80	24	45	240	72	3	10,24	1907,69	(b)	14,72	6,14	
	10	10	16	6	3	2	50	30	80	30	45	260	90	3	10,24	2359,24	(a)	14,72	6,14	
	15	6	16	14	7	2	30	18	80	18	45	340	54	3	10,24	1148,92	(b)	14,72	6,14	
	15	8	16	10	5	2	40	24	80	24	45	320	72	3	10,24	1907,69	(b)	14,72	6,14	
	15	10	16	8	4	2	50	30	80	30	45	310	90	3	10,24	2359,24	(a)	14,72	6,14	
	20	6	16	18	9	2	30	18	80	18	45	400	54	3	10,24	1148,92	(b)	14,72	6,14	
	20	8	16	12	6	2	40	24	80	24	45	360	72	3	10,24	1907,69	(b)	14,72	6,14	
	20	10	16	10	5	2	50	30	80	30	45	360	90	3	10,24	2359,24	(a)	14,72	6,14	
	20	6	19,2	10	5	2	30	18	80	18	45	280	54	3	12,29	1224,09	(b)	17,66	7,37	
GL24h	10	8	19,2	6	3	2	40	24	80	24	45	240	72	3	12,29	2032,51	(b)	17,66	7,37	
	10	10	19,2	4	2	2	50	30	80	30	45	210	90	3	12,29	2678,05	(a)	17,66	7,37	
	15	6	19,2	14	7	2	30	18	80	18	45	340	54	3	12,29	1224,09	(b)	17,66	7,37	
	15	8	19,2	8	4	2	40	24	80	24	45	280	72	3	12,29	2032,51	(b)	17,66	7,37	
	15	10	19,2	6	3	2	50	30	80	30	45	260	90	3	12,29	2678,05	(a)	17,66	7,37	
	20	6	19,2	18	9	2	30	18	80	18	45	400	54	3	12,29	1224,09	(b)	17,66	7,37	
	20	8	19,2	10	5	2	40	24	80	24	45	320	72	3	12,29	2032,51	(b)	17,66	7,37	
	20	10	19,2	8	4	2	50	30	80	30	45	310	90	3	12,29	2678,05	(a)	17,66	7,37	
	GH32h	10	6	25,6	8	4	2	30	18	80	18	45	250	54	3	16,38	1308,60	(b)	23,55	9,83
		10	8	25,6	6	3	2	40	24	80	24	45	240	72	3	16,38	2172,84	(b)	23,55	9,83
10		10	25,6	4	2	2	50	30	80	30	45	210	90	3	16,38	3060,63	(a)	23,55	9,83	
15		6	25,6	12	6	2	30	18	80	18	45	310	54	3	16,38	1308,60	(b)	23,55	9,83	
15		8	25,6	8	4	2	40	24	80	24	45	280	72	3	16,38	2172,84	(b)	23,55	9,83	
15		10	25,6	6	3	2	50	30	80	30	45	260	90	3	16,38	3060,63	(a)	23,55	9,83	
20		6	25,6	16	8	2	30	18	80	18	45	370	54	3	16,38	1308,60	(b)	23,55	9,83	
20		8	25,6	10	5	2	40	24	80	24	45	320	72	3	16,38	2172,84	(b)	23,55	9,83	
20	10	25,6	8	4	2	50	30	80	30	45	310	90	3	16,38	3060,63	(a)	23,55	9,83		



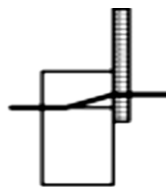
(a)



(b)

MAe

Glulam	Carga		Tensão admissível na madeira	Número cavilhas	Número de colunas	Número de linhas	Espaçamento entre cavilhas				Dimensões da ligação				Tensão admissível na madeira	Capacidade de carga por ligador e por plano de corte	Modo de rotura	f _{d,fi}	E _{d,fi} /A _s
	F _d [kN]	d [mm]					f _k [N/mm ²]	N _t	N _c	N _L	a ₁ [mm]	a ₂ [mm]	a _{3,t} [mm]	a _{4,c} [mm]					
GH20h	10	6	16	12	6	2	30	18	80	18	45	310	54	10	10,24	973,60	(e)	14,72	6,14
	10	8	16	8	4	2	40	24	80	24	45	280	72	10	10,24	1634,07	(e)	14,72	6,14
	10	10	16	6	3	2	50	30	80	30	45	260	90	10	10,24	2441,80	(e)	14,72	6,14
	15	6	16	16	8	2	30	18	80	18	45	370	54	10	10,24	973,60	(e)	14,72	6,14
	15	8	16	10	5	2	40	24	80	24	45	320	72	10	10,24	1634,07	(e)	14,72	6,14
	15	10	16	8	4	2	50	30	80	30	45	310	90	10	10,24	2441,80	(e)	14,72	6,14
	20	6	16	22	11	2	30	18	80	18	45	460	54	10	10,24	973,60	(e)	14,72	6,14
	20	8	16	14	7	2	40	24	80	24	45	400	72	10	10,24	1634,07	(e)	14,72	6,14
	20	10	16	10	5	2	50	30	80	30	45	360	90	10	10,24	2441,80	(e)	14,72	6,14
	20	10	16	10	5	2	30	18	80	18	45	280	54	10	12,29	1066,53	(e)	17,66	7,37
GL24h	10	8	19,2	6	3	2	40	24	80	24	45	240	72	10	12,29	1790,04	(e)	17,66	7,37
	10	10	19,2	4	2	2	50	30	80	30	45	210	90	10	12,29	2674,86	(e)	17,66	7,37
	15	6	19,2	14	7	2	30	18	80	18	45	340	54	10	12,29	1066,53	(e)	17,66	7,37
	15	8	19,2	10	5	2	40	24	80	24	45	320	72	10	12,29	1790,04	(e)	17,66	7,37
	15	10	19,2	6	3	2	50	30	80	30	45	260	90	10	12,29	2674,86	(e)	17,66	7,37
	20	6	19,2	20	10	2	30	18	80	18	45	430	54	10	12,29	1066,53	(e)	17,66	7,37
	20	8	19,2	12	6	2	40	24	80	24	45	360	72	10	12,29	1790,04	(e)	17,66	7,37
	20	10	19,2	8	4	2	50	30	80	30	45	310	90	10	12,29	2674,86	(e)	17,66	7,37
	10	6	25,6	10	5	2	30	18	80	18	45	280	54	10	16,38	1231,52	(e)	23,55	9,83
	10	8	25,6	6	3	2	40	24	80	24	45	240	72	10	16,38	2066,96	(e)	23,55	9,83
GH32h	10	10	25,6	4	2	2	50	30	80	30	45	210	90	10	16,38	3088,66	(e)	23,55	9,83
	15	6	25,6	14	7	2	30	18	80	18	45	340	54	10	16,38	1231,52	(e)	23,55	9,83
	15	8	25,6	8	4	2	40	24	80	24	45	280	72	10	16,38	2066,96	(e)	23,55	9,83
	15	10	25,6	6	3	2	50	30	80	30	45	260	90	10	16,38	3088,66	(e)	23,55	9,83
	20	6	25,6	18	9	2	30	18	80	18	45	400	54	10	16,38	1231,52	(e)	23,55	9,83
	20	8	25,6	10	5	2	40	24	80	24	45	320	72	10	16,38	2066,96	(e)	23,55	9,83
	20	10	25,6	6	3	2	50	30	80	30	45	260	90	10	16,38	3088,66	(e)	23,55	9,83
	20	10	25,6	6	3	2	30	18	80	18	45	280	54	10	16,38	1231,52	(e)	23,55	9,83



(e)

APÊNDICE B

Procedimento para o cálculo da velocidade de carbonização

			Profundidade de carbonização (mm)	Profundidade de carbonização média (mm)	Velocidade de carbonização (mm/min)	
MM	GL20h	900	11,6	13,33	0,80	
		1000	13,6			
		1100	14,8			
	GL24h	900	11,2	12,53	0,75	
		1000	12,4			
		1100	14			
	GL32h	900	10,4	11,47	0,69	
		1000	11,6			
		1100	12,4			
Maf	Lado da Chapa de aço	GL20h	900	10,4	12,67	0,76
			1000	12		
			1100	15,6		
	GL24h	900	9,2	11,07	0,66	
		1000	11,2			
		1100	12,8			
	GL32h	900	8	10,13	0,61	
		1000	10,8			
		1100	11,6			
Maf	Lado da Madeira	GL20h	900	12	14,27	0,86
			100	14		
			1100	16,8		
	GL24h	900	11,6	13,47	0,81	
		1000	13,2			
		1100	15,6			
	GL32h	900	11,2	12,40	0,74	
		1000	12			
		1100	14			
Mae	Lado da Chapa de aço	GL20h	900	6,4	8,13	0,49
			100	7,6		
			1100	10,4		
	GL24h	900	5,6	7,47	0,45	
		1000	7,6			
		1100	9,2			
	GL32h	900	4,8	6,53	0,39	
		1000	7,2			
		1100	7,6			
MAe	Lado da Madeira	GL20h	900	12	14,13	0,85
			100	14,4		
			1100	16		
	GL24h	900	11,6	13,07	0,78	
		1000	12,8			
		1100	14,8			
	GL32h	900	11,2	12,13	0,73	
		1000	12			
		1100	13,2			