



Resistência de ligações mecânicas em madeira em corte simples, com e sem proteção ao fogo

JOÃO CAMPOS PINTO COELHO DE AGUIAR

julho de 2025

**Resistência de ligações mecânicas em madeira em
corte simples, com e sem proteção ao fogo**

João Campos Pinto Coelho de Aguiar

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica, Área de Especialização em
Construções Mecânicas**

Orientador: Elza Maria Morais Fonseca

Júri:

Presidente:

Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, Doutor, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Vogais:

Elza Maria Morais Fonseca, Doutora, Instituto Superior de Engenharia do Porto

António José Pedroso de Moura Correia, Doutor, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Porto, junho de 2025

Agradecimentos

Quero agradecer à minha família, especialmente aos meus pais, Anabela e Luís Aguiar, por todo o apoio incondicional ao longo do meu percurso académico e pelo constante incentivo, fazendo-me acreditar que era possível querer mais. À minha filha, Isabella Aguiar, por todo o amor e inspiração, apresentando-me desafios e aprendizagens valiosas ao longo do seu crescimento. À minha avó, tio e prima, Dores, Jorge e Leonor Campos, pela companhia, carinho e conselhos sempre presentes.

Agradeço à minha orientadora, Professora Doutora Elza Fonseca, excelente profissional e pessoa, que sempre demonstrou disponibilidade para apoiar e partilhar conhecimentos essenciais ao desenvolvimento deste trabalho. Foi um enorme privilégio trabalhar sob a sua orientação, que me transmitiu confiança nas minhas capacidades como engenheiro para enfrentar os desafios da minha futura carreira profissional.

Resumo

A presente dissertação incide sobre o estudo do comportamento de ligações em madeira em corte simples, com e sem proteção em gesso, submetidas à ação do fogo. O trabalho contempla o dimensionamento analítico, de acordo com o Eurocódigo 5, bem como o desenvolvimento e análise de modelos numéricos, aplicando o método dos elementos finitos. Inicialmente, efetuou-se uma revisão bibliográfica dos temas subjacentes à análise. Seguidamente, é realizada a validação da metodologia numérica, com base em dados experimentais e numéricos previamente publicados. São desenvolvidos novos modelos térmicos e termomecânicos para avaliar a evolução da temperatura, taxa de carbonização e a capacidade resistente das ligações ao longo do tempo de exposição ao fogo. Os modelos consideram a variação das propriedades térmicas e mecânicas dos materiais com a temperatura. Os resultados obtidos mostram que a proteção em gesso contribui para uma redução significativa da propagação do calor no interior da ligação, aumentando o tempo de resistência ao fogo. Verifica-se que o cálculo efetuado com base no Eurocódigo 5 é conservador no dimensionamento de ligações à temperatura ambiente, mas com menor incidência no projeto da resistência ao fogo, não considerando, por exemplo, a influência de parâmetros geométricos e da proteção passiva para o desempenho estrutural. Por fim, e com base nos resultados obtidos, são propostas duas equações úteis para o projeto, com tendência polinomial de segundo grau, permitindo o cálculo da carga resistente de ligações de madeira, com ou sem proteção, em corte simples, função do tempo de exposição ao fogo.

Palavras-chave: Ligações em madeira; Placas de gesso; Resistência ao fogo; Análise termomecânica; Eurocódigos; Método dos elementos finitos.

Abstract

This dissertation focuses on the study of the behavior of single shear timber connections, with and without gypsum board protection, when exposed to fire. The work includes analytical design following Eurocode 5, as well as the development and analysis of numerical models using the finite element method. Initially, a literature review was carried out on topics related to the analysis. Subsequently, the numerical methodology was validated using previously published experimental and numerical data. New thermal and thermomechanical models were developed to evaluate the temperature evolution, charring rate, and load-bearing capacity of the connections throughout the exposure to fire. The models consider the temperature-dependent variation of the thermal and mechanical properties of the materials. The results show that gypsum board protection significantly reduces heat propagation inside the connection, increasing its fire resistance time. It can be seen that the calculation carried out based on Eurocode 5 is conservative in the dimensioning of connections at room temperature, but with less incidence in the design of fire resistance, not taking into account, for example, the influence of geometric parameters or of passive protection on structural performance. Finally, and based on the results obtained, two useful design equations are proposed, with a second-degree polynomial trend, allowing the calculation of the resistant load of timber connections, with or without protection, in single shear, as a function of the fire exposure.

KEYWORDS: Timber connections; Gypsum board; Fire resistance; Thermomechanical analysis; Eurocodes; Finite Element Method.

Índice

Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas.....	xiii
Acrónimos e Símbolos.....	xv
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento e motivação.....	1
1.2. Objetivos e opções metodológicas.....	1
1.3. Modelos em estudo.....	2
1.4. Estrutura do trabalho.....	2
2. Revisão Bibliográfica.....	5
2.1. Ação do Fogo.....	5
2.1.1. Regulamentação.....	5
2.1.2. Curvas de fogo.....	7
2.1.3. Modos de transferência de calor.....	8
2.2. Medidas de Proteção.....	10
2.2.1. Passivas.....	10
2.2.2. Ativas.....	13
2.3. Propriedades mecânicas e térmicas dos materiais.....	15
2.3.1. Madeira.....	15
2.3.2. Aço.....	20
2.3.3. Gesso.....	22
2.4. Metodologias.....	26
2.4.1. Método simplificado de cálculo.....	26
2.4.2. Métodos experimentais.....	31
2.4.3. Método dos elementos finitos.....	32
2.5. Análise crítica da revisão bibliográfica.....	34
3. Desenvolvimento.....	39
3.1. Validação.....	39
3.1.1. Modelo Térmico.....	39
3.1.2. Modelo Mecânico.....	42
3.2. Dimensionamento das ligações de madeira em corte simples.....	45
3.3. Análise por Elementos Finitos.....	47
3.3.1. Análise Térmica.....	49
3.3.2. Análise Termomecânica.....	50
4. Resultados e Discussão.....	53
4.1. Resultados de Análise Térmica.....	53

4.1.1. Distribuição de temperaturas	53
4.1.2. Carbonização.....	56
4.2. Resultados da Análise Termomecânica.....	60
4.2.1. Análise à temperatura ambiente	60
4.2.2. Análise a altas temperaturas	61
5. Conclusão	65
5.1. Conclusões finais	65
5.2. Limitações e trabalhos futuros.....	66
Referências.....	67
Declaração de Integridade	73
Apêndice A	75
Apêndice B	77
Apêndice C	79
Glossário.....	81

Lista de Figuras

Figura 1 - Curvas de Incêndio padrão ISO 834, hidrocarbonetos, e elementos exteriores.	8
Figura 2 - Sistemas de isolamento: a) Placas de Gesso (adaptado de [22]), b) Pannel de Lã Mineral [25].	11
Figura 3 - Elementos de construção aço-madeira: a) Secção quadrada (adaptado de [34]), b) Secção em I [30].	13
Figura 4 - Sistemas ativos de proteção: a) Dispositivo de alarme, b) Luz de emergência de saída [19].	14
Figura 5 - Sistemas de supressão de incêndios: a) <i>Sprinkler</i> [27], b) Extintor portátil [19], c) Boca de incêndio [38].	15
Figura 6 - Ilustração dos processos químicos e físicos numa amostra de madeira exposta ao fogo (adaptado de [33]).	18
Figura 7 - Evolução da massa volúmica a) EN 1194:1999 [12] b) <i>Buckland Timber</i> [46].	19
Figura 8 - Curvas tensão-deformação para várias classes de resistência de <i>Glulam</i> , para diferentes temperaturas.	19
Figura 9 - Evolução do calor específico da <i>Glulam</i> em função da temperatura.	20
Figura 10 - Evolução da condutividade térmica da <i>Glulam</i> em função da temperatura.	20
Figura 11 - Curvas tensão-deformação do aço S275, para diferentes temperaturas.	21
Figura 12 - Evolução do calor específico do aço (C_p) em função da temperatura.	22
Figura 13 - Evolução da condutividade térmica (k) do aço em função da temperatura.	22
Figura 14 - Evolução da massa volúmica (ρ) do gesso com o aumento da temperatura.	23
Figura 15 - Evolução do calor específico (C_p) do gesso com o aumento da temperatura.	24
Figura 16 - Evolução da condutividade (k) térmica do gesso com o aumento da temperatura.	24
Figura 17 - Modos de rotura de ligações madeira-madeira em corte simples: a) e b) esmagamento da madeira; c) flexão do ligador; d), e) e f) flexão do ligador em conjunto com o esmagamento da madeira (adaptado de [7]).	28
Figura 18 - Modos de rotura para ligações em madeira com cavilha: a) rotura dúctil; b), c), d) e e) rotura frágil (adaptado de [56]).	29
Figura 19 - Mapa de citações.	35
Figura 20 - Mapa de palavras-chave.	35
Figura 21 - Representação da malha de elementos finitos e condições fronteiras, para a análise térmica.	40
Figura 22 - Gradiente de temperatura do modelo térmico, para 1800s de exposição ao fogo a) do quarto de ligação (interior) e b) secção ao nível da cavilha.	40
Figura 23 - Gradiente de temperatura do modelo térmico, para 3600s de exposição ao fogo a) do quarto de ligação (interior) e b) secção ao nível da cavilha.	41
Figura 24 - Comparação da distribuição de temperaturas apresentadas por M. Audebert, et al. [5] e obtidas pelo modelo desenvolvido.	41
Figura 25 - Representação da malha de elementos finitos e condições de fronteira.	42

Figura 26 – Gradiente de tensão do modelo mecânico, à temperatura ambiente a) elementos de madeira e b) cavilhas.	43
Figura 27 - Representação da malha de elementos finitos e condições fronteira, para a análise termomecânica.	44
Figura 28 – Gradiente de tensão dos elementos de madeira do modelo termomecânico, para 30 min de exposição ao fogo.	44
Figura 29 - Ligação madeira-madeira, com parâmetros geométricos.	45
Figura 30 - Número efetivo de cavilhas para ligações madeira-madeira.	46
Figura 31 - Dimensões da ligação em madeira a estudar.	47
Figura 32 – Malha de elementos das ligações em estudo a) sem proteção e b) com proteção.	48
Figura 33 – Fluxograma da simulação numérica.....	48
Figura 34 - Representação da malha de elementos finitos e condições de fronteira, para a análise térmica.....	49
Figura 35 – Planos de corte e nós para obtenção de resultados na ligação a) sem proteção e b) com proteção.....	50
Figura 36 – Representação da malha e com condições fronteira na ligação a) sem proteção e b) com proteção.....	50
Figura 37 - Temperatura de nós no interior da ligação, em função do tempo de exposição ao fogo.....	53
Figura 38 – Gradiente de temperatura do modelo térmico da ligação sem proteção, para 3600s de exposição ao fogo a) vista isométrica e b) vista do plano de corte.....	55
Figura 39 – Gradiente de temperatura do modelo térmico da ligação com proteção, para 3600s de exposição ao fogo a) vista isométrica e b) vista do plano de corte.....	55
Figura 40 – Gradiente de temperatura do modelo térmico, para 1800s de exposição ao fogo, da ligação a) sem proteção e b) com proteção.	56
Figura 41 – Carbonização dos elementos de madeira, da ligação a) sem proteção para 900 s e b) 1800 s; c) com proteção para 1800 s e d) 3600 s de exposição ao fogo.	57
Figura 42 – Madeira não carbonizada, da ligação a) sem proteção para 900 s e b) 1200 s; c) com proteção para 2300 s e d) 3000 s de exposição ao fogo.....	59
Figura 43 – Gradiente de tensão dos elementos de madeira, da ligação sem proteção, à temperatura ambiente.	61
Figura 44 – Gradiente de tensão dos elementos de madeira, da ligação com proteção, à temperatura ambiente.	61
Figura 45 - Carga resistente das ligações com e sem proteção, em função do tempo de exposição ao fogo.	62
Figura 46 – Gradiente de tensão dos elementos de madeira, da ligação sem proteção, para 1200 s de exposição ao fogo.....	63
Figura 47 – Gradiente de tensão dos elementos de madeira, da ligação com proteção, para 1800 s de exposição ao fogo.....	63

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Propriedades mecânicas à temperatura ambiente de <i>Glulam</i> homogénea, segundo EN 1194:1999 (adaptado de [12]).....	16
Tabela 2 - Propriedades mecânicas à temperatura ambiente de <i>Glulam</i> homogénea, segundo <i>Buckland Timber</i> (adaptado de [46])	16
Tabela 3 - Propriedades mecânicas de elementos em aço ao carbono, com espessura inferior a 40 mm (adaptado de [39])	21
Tabela 4 – Propriedades mecânicas de placas de gesso tipo X com revestimento de papel (adaptado de [42])	25
Tabela 5 – Propriedades térmicas de vários tipos de placas de gesso, com e sem revestimento em papel (adaptado de [43])	26
Tabela 6 – Cálculo dos espaçamentos mínimos entre cavilhas (adaptado de [7])	28
Tabela 7 – Comparação dos resultados da carga resistente à temperatura ambiente.....	43
Tabela 8 – Comparação dos resultados para o tempo de resistência ao fogo, para 30% da capacidade de carga à temperatura ambiente.....	45
Tabela 9 – Taxa de carbonização das ligações em estudo	58
Tabela 10 – Comparação dos resultados da capacidade resistente à temperatura ambiente .	60

Acrónimos e Símbolos

Lista de Acrónimos

CLT	<i>Cross-Laminated Timber</i>
EUA	Estados Unidos da América
EN	<i>European Standard</i>
FSP	<i>Fiber Saturation Point</i>
GL	<i>Glulam</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MEF	Método dos elementos finitos
P.PORTO	Instituto Politécnico do Porto
RT-SCIE	Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios

Lista de Símbolos

a_1	distância horizontal mínima entre cavilhas	mm
a_2	distância vertical mínima entre cavilhas	mm
$a_{3,t}$	distância horizontal mínima entre as cavilhas e o bordo da ligação	mm
$a_{4,c}$	distância vertical mínima entre as cavilhas e o bordo da ligação	mm
cs	coeficiente de segurança	adimensional
d	diâmetro do ligador	mm
$f_{c,0,k}$	resistência à compressão paralela à fibra da madeira	MPa
$f_{c,90,k}$	resistência à compressão perpendicular à fibra da madeira	MPa
$f_{h,i,k}$	resistência ao esmagamento característico da madeira	MPa
$f_{m,k}$	resistência à flexão da madeira	MPa
$f_{t,0,d}$	resistência à tração de projeto da madeira	MPa
$f_{t,0,k}$	resistência à tração paralela à fibra da madeira	MPa

$f_{t,90,k}$	resistência à tração perpendicular à fibra da madeira	MPa
f_u	tensão de rotura do aço	MPa
$f_{v,k}$	resistência ao corte da madeira	MPa
f_y	tensão de cedência do aço	MPa
$f_{0,m,g}$	resistência à flexão longitudinal da placa de gesso tipo X	MPa
f_{20}	resistência à tração correspondente ao percentil 20%	MPa
$f_{90,m,g}$	resistência à flexão transversal da placa de gesso tipo X	MPa
h	coeficiente de transferência de calor por convecção	W/m ² K
h_p	espessura do painel de gesso	mm
k	condutividade térmica	W/mK
k_{fi}	fator característico do material	adimensional
k_{mod}	fator de correção	adimensional
$k_{mod,fi}$	fator de modificação ao fogo	adimensional
\dot{q}''_c	fluxo de calor por convecção no interior da amostra	W/m ²
\dot{q}''_{cond}	fluxo de calor por condução	W/m ²
\dot{q}''_{conv}	fluxo de calor por convecção	W/m ²
$\dot{q}''_{ext,r}$	fluxo de calor externo à amostra por radiação	W/m ²
$\dot{q}''_{l,c}$	perda de calor na superfície da amostra por convecção	W/m ²
$\dot{q}''_{l,r}$	perda de calor na superfície da amostra por radiação	W/m ²
\dot{q}''_r	fluxo de calor por radiação no interior da amostra	W/m ²
\dot{q}''_{rad}	fluxo de calor por radiação	W/m ²
t	tempo	s
t_{ch}	tempo de atraso da carbonização devido à proteção	min

$t_{d,fi}$	tempo de resistência ao fogo para ligações não protegidas	min
$t_{fi30,c}$	tempo de resistência da ligação do modelo numérico de validação	min
$t_{fi30,c,A}$	tempo de resistência da ligação do modelo numérico em estudo	min
$t_{fi30,exp}$	tempo de resistência da ligação do ensaio experimental	min
$t_{fi30,EC5}$	tempo de resistência da ligação do Eurocódigo 5	min
t_i	espessura dos elementos de madeira	mm
t_{req}	tempo de resistência ao fogo requerido	min
w	razão entre a massa de água e a massa sólida na madeira	adimensional
x	distância entre superfícies na direção do fluxo de calor	m
A_S	área resistente da ligação	mm ²
C_{ij}	componentes do tensor de rigidez	MPa
C_p	calor específico	kJ/kgK
E	módulo de elasticidade	GPa
E_d	valor de projeto para os efeitos relevantes das ações	MPa
$E_{d,fi}$	resultado das ações de projeto para situação de fogo	MPa
E_i	módulo de elasticidade	GPa
$E_{0,g}$	módulo de elasticidade longitudinal da placa de gesso tipo X	GPa
$E_{90,g}$	módulo de elasticidade transversal da placa de gesso tipo X	GPa
$E_{0,mean}$	módulo de elasticidade paralelo à fibra da madeira	MPa
$E_{90,mean}$	módulo de elasticidade perpendicular à fibra da madeira	MPa
F_d	carga aplicada	N

$F_{ax,Rk}$	resistência ao arranque característica do ligador	N
$F_{v,Rd}$	capacidade de carga característica de projeto por plano de corte e por ligador	N
$F_{v,Rk}$	capacidade de carga característica por plano de corte e por ligador	N
G	módulo de elasticidade ao corte	GPa
G_{ij}	módulo de elasticidade ao corte	GPa
G_{mean}	módulo de elasticidade ao corte da madeira	MPa
$M_{y,Rk}$	momento de cedência característico do ligador	Nmm
N	número efetivo de cavilhas	adimensional
$N_{u,c,Tamb}$	carga resistente da ligação do modelo numérico de validação	kN
$N_{u,c,fi30min}$	carga resistente da ligação do modelo numérico de validação, 30 min de exposição ao fogo	kN
$N_{u,cs,Tamb}$	carga resistente da ligação do modelo numérico sem proteção	kN
$N_{u,cp,Tamb}$	carga resistente da ligação do modelo numérico com proteção	kN
$N_{u,exp}$	carga resistente da ligação do ensaio experimental	kN
$N_{u,th,EC5}$	carga resistente da ligação do Eurocódigo 5	kN
$N_{u,th,J}$	carga resistente da ligação de Johansen	kN
Q	geração de calor	W/m ³
$R_{d,t,fi}$	resistência de projeto em situação de fogo	MPa
U	energia interna	W
α_d	difusividade térmica	m ² /s
α_c	coeficiente de expansão térmica	K ⁻¹
$\alpha_{0,c,g}$	coeficiente de expansão térmica longitudinal da placa de gesso tipo X	K ⁻¹
$\alpha_{90,c,g}$	coeficiente de expansão térmica transversal da placa de gesso tipo X	K ⁻¹
β	rácio de resistência ao esmagamento	adimensional
β_n	taxa de carbonização nominal de projeto	mm/min

β_0	taxa de carbonização unidimensional de projeto	mm/min
$\beta_{0,dc}$	taxa de carbonização direta da ligação em estudo	mm/min
$\beta_{0,ic}$	taxa de carbonização indireta da ligação em estudo	mm/min
ε	emissividade	adimensional
ε_e	emissividade da superfície emissiva	adimensional
ε_r	emissividade da superfície recetiva	adimensional
$\underline{\varepsilon}$	tensor de deformação total	adimensional
$\underline{\varepsilon}^e$	tensor de deformação elástica	adimensional
$\underline{\varepsilon}^p$	tensor de deformação plástica	adimensional
ρ	massa volúmica	kg/m ³
ρ_k	massa volúmica da madeira	kg/m ³
$\rho_{k,g}$	massa volúmica da madeira	kg/m ³
ν	coeficiente de Poisson	adimensional
ν_{ij}	coeficiente de Poisson	adimensional
φ	fator de forma	adimensional
$\delta\theta$	campo virtual de Temperatura	K
σ	constante de Stefan-Boltzmann	W/m ² K ⁴
$\underline{\sigma}$	tensor de tensões	MPa
η_{fi}	fator de redução de carga de projeto de exposição ao fogo	adimensional
θ	temperatura	°C
θ_e	temperatura absoluta da superfície emissiva	K
θ_g	temperatura dos gases quentes	°C
θ_r	temperatura absoluta da superfície recetiva	K
∇q	variação do fluxo de calor	W/m ³
$\underline{\underline{\Lambda}}$	tensor de rigidez	MPa
Δ	parâmetro do tensor de rigidez	MPa ⁻³
γ_M	fator parcial de segurança	adimensional
$\gamma_{M,fi}$	fator parcial de segurança para madeira exposta ao fogo	adimensional
Ω	volume	m ³

1. Introdução

1.1. Enquadramento e motivação

No combate às alterações climáticas, uma mudança importante é a substituição de materiais de construção convencionais, como o aço e o betão, por materiais mais sustentáveis, como a madeira, por exemplo. A madeira, sendo um material existente na natureza e renovável, a sua utilização é vasta, em particular no uso em edifícios de pequena dimensão. A maior dificuldade está na sua aplicação em situações mais exigentes, como em risco de incêndio. Embora o aumento da utilização da madeira poder conduzir ao agravamento da deflorestação, desde que aplicadas políticas florestais sustentáveis, esse acréscimo poderá ter um impacto positivo no ciclo de carbono.

Atualmente, no setor da construção em geral, observa-se o incremento do uso de elementos estruturais em madeira lamelada. É fundamental o projeto correto destas estruturas, com especial atenção, nas ligações entre os vários elementos. Perante um incêndio, as estruturas devem ser capazes de suportar as solicitações impostas, durante um intervalo de tempo suficientemente alto, garantindo assim a evacuação segura dos ocupantes. Apesar de ser um material combustível, a madeira apresenta uma boa resistência à ação do fogo, devido à formação da camada isolante de carvão. Esta resistência pode ser adicionalmente melhorada, aumentando o tempo de resposta ao incêndio, com a utilização de materiais isolantes e incombustíveis, como o gesso, uma solução eficiente e com vasta utilização.

1.2. Objetivos e opções metodológicas

O principal objetivo da presente dissertação é obter informação sobre o comportamento térmico e mecânico de ligações em madeira, sujeitas a altas temperaturas devido à ação do fogo, com e sem proteção. Para esse efeito, são delineados diferentes objetivos específicos:

- análise prévia de regulamentos europeus relevantes,
- verificação de estudos recentes sobre o tema,
- apresentação das curvas de fogo utilizadas para avaliar as cargas térmicas em elementos estruturais;
- estudo dos modos de transferência de calor,
- análise das várias medidas de proteção (passivas e ativas) no combate a incêndios,

Introdução

-estudo das propriedades mecânicas e térmicas dos materiais presentes nas ligações a estudar, a madeira, o aço, e o gesso.

As opções metodológicas a utilizar no presente trabalho, para a elaboração do estado da arte, passarão pelo estudo da regulamentação existente e pela leitura de diferentes artigos, recolhidos da pesquisa em diferentes bases de dados científicas. No desenvolvimento posterior deste trabalho, serão utilizadas folhas de cálculo para aplicação de modelos analíticos; programas de modelação para a criação de geometrias de ligações; programas de análise para o desenvolvimento de modelos numéricos, baseados no método de elemento finitos; e a calibração dos modelos numéricos a desenvolver, com outros modelos obtidos experimentalmente.

1.3. Modelos em estudo

Este trabalho de pesquisa incidirá sobre o tipo de ligações mecânicas existentes e os métodos de análise disponíveis, como sejam os numéricos e a aplicação com base no método de elementos finitos. Pretende-se também estudar os materiais constituintes das ligações, como a madeira, o aço e o gesso, bem como as ações externas a que vão estar submetidas (ação do fogo e carregamento em geral). Pretende-se que as ligações a estudar garantam a maior resistência ao corte, pelo que serão constituídas por ligadores em aço, escolhidos em função do seu diâmetro e tipo de material. O estado da arte sobre este tipo de modelos, permitirá incidir o desenvolvimento posterior em ligações ao corte simples submetidas ao fogo. Estes tipos de ligações traduzem-se num problema complexo de estudo, atendendo à solicitação conjunta da ação mecânica e de incêndio. Pretende-se que os componentes constituintes das ligações a desenvolver, sejam dimensionados de acordo com equações simplificadas, baseadas nos procedimentos regulamentares. O dimensionamento previsto na ligação mecânica, sob determinadas condições, será objeto de verificação de segurança, aquando da implementação da análise por elementos finitos. Os modelos em estudo serão analisados sob ação térmica e mecânica, para a avaliação da capacidade resistente da ligação ao fogo.

1.4. Estrutura do trabalho

A presente dissertação, no âmbito da unidade curricular de Dissertação / Projeto / Estágio, engloba o estado da arte do tema, sendo seguida do desenvolvimento do trabalho. No desenvolvimento do trabalho, é incluída a validação da metodologia numérica a utilizar, seguida do projeto das ligações em madeira em corte simples e sob a ação do fogo, com e sem proteção passiva. Finalmente é apresentada a discussão de resultados, as conclusões gerais e as propostas para trabalhos futuros.

No capítulo 1 é feita uma pequena introdução ao tópico em estudo, apresentando a motivação e objetivos, tal como as metodologias aplicadas para o seu desenvolvimento, e a estrutura do presente trabalho.

No capítulo 2, a revisão bibliográfica, é exposta uma análise da regulamentação europeia em vigor, no que respeita à classificação dos elementos de construção, e às classes de madeira

lameladas utilizadas em ligações mecânicas. Neste capítulo são apresentadas as curvas de fogo, os modos de transferência de calor, as medidas de proteção de combate contra incêndio e as metodologias utilizadas no estudo de ligações mecânicas. Apresentam-se ainda as propriedades térmicas e mecânicas dos materiais das ligações a estudar. O capítulo termina com uma reflexão crítica sobre o estado da arte, complementada por um estudo bibliométrico com recurso ao programa *VOSviewer*.

No capítulo 3 é apresentado o desenvolvimento da dissertação, começando pela validação da metodologia numérica adotada, baseada na análise de ligações em madeira em corte duplo sujeitas à ação do fogo, conforme um estudo de outro autor. Posteriormente são expostos os resultados do dimensionamento das ligações em corte simples, a sua verificação ao fogo e dimensionamento das placas de gesso. São descritos os modelos numéricos em estudo, incluindo a sua geometria, as condições de fronteira e as variáveis utilizadas no processo de convergência.

O capítulo 4 é reservado para a apresentação e discussão de resultados. Na análise térmica é obtida a evolução da temperatura nodal, o campo de temperatura no interior da ligação e a taxa de carbonização dos elementos de madeira. Na análise termomecânica é avaliada a carga resistente das ligações e a sua evolução ao longo do tempo de exposição ao fogo, comparando-se os resultados obtidos entre as ligações com e sem proteção passiva.

O capítulo 5 é dedicado às conclusões gerais da presente dissertação, reunindo as principais observações retiradas ao longo do trabalho, com destaque nos contributos para as metodologias analítica e numérica na avaliação do comportamento das ligações em madeira sob ação do fogo. São ainda sugeridas propostas para investigação futura, com base nas limitações identificadas, procurando orientar trabalhos que possam contribuir para o desenvolvimento técnico e científico no domínio em estudo.

Introdução

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Ação do Fogo

No presente subcapítulo, é efetuada uma breve apresentação do papel das ligações mecânicas, e da regulamentação europeia em vigor, tal como a classificação dos elementos construtivos, e a classificação das classes de resistência de madeira lamelada a estudar. Além disso, são apresentadas as curvas de fogo utilizadas em cálculos de casos de incêndio, e dos modos de transferência de calor.

2.1.1. Regulamentação

As ligações em madeira, responsáveis por transferir a capacidade de carga entre os vários elementos de uma estrutura, são consideradas como o elemento mais importante da estrutura, necessitando de uma análise mais cuidada [1], [2], [3]. A sua durabilidade está diretamente relacionada com o dimensionamento. Por esse motivo, vários modelos analíticos e experimentais foram desenvolvidos de forma a prever a durabilidade das ligações [2]. Apesar do papel importante das ligações, a base da regulamentação para os outros membros da estrutura, como as vigas, é mais consistente, isto deve-se à relativa facilidade de caracterizar o comportamento mecânico desses membros, em comparação às ligações [3], [4]. Existem vários tipos de ligações em madeira, como as ligações com entalhes, ligações por colagem e ligações mecânicas. Nas ligações mecânicas, a seleção do ligador depende do tipo de conexão e da resistência exigida [1]. No presente trabalho serão estudadas as ligações com cavilhas.

Em 2013, M. Audebert, et al. [5] desenvolveram um modelo numérico para analisar o comportamento termomecânico de ligações madeira-madeira, utilizando os resultados de duas séries de testes para validar os resultados. Referem que os comportamentos mecânicos em condições normais de temperatura são bem conhecidos. Já na exposição ao fogo, o procedimento de cálculo com o Eurocódigo 5 (Parte 1-2) [6] é baseado num número limitado de resultados experimentais e numéricos. Em conformidade com os requisitos de alta resistência, as ligações madeira-madeira com cavilhas são frequentemente utilizadas, embora, em casos particulares, sejam substituídas por ligações com uma placa de aço, dado o modo de rotura tipicamente dúctil. Além disso, comparando as ligações com cavilhas e parafusos, confirmaram que a utilização de parafusos tem um efeito negativo na resistência ao fogo da ligação. Concluíram também que aumentar o número de ligadores, ou a variação do seu diâmetro, não tem um efeito significativo na resistência ao fogo [5].

Em 2022, E. M. M. Fonseca, et al. [1], estudaram vários tipos de ligações, de acordo com o Eurocódigo 5 (Parte 1-1) [7]. Afirmaram que os projetos de ligações de madeira exigem o uso de diferentes regras, de forma a garantir a construção de uma estrutura segura e estável. A resistência e a rigidez são critérios importantes a considerar para o serviço correto da estrutura. Referiram também que a tensão de cedência, a resistência ao esmagamento e a resistência ao corte do ligador devem ser consideradas na determinação da capacidade de carga característica das ligações [1], [7].

Os diferentes elementos de uma estrutura devem cumprir os requisitos de resistência ao fogo, executando as funções atribuídas perante situações de incêndio, durante um intervalo de tempo definido. Segundo a Portaria nº 135/2020, de 2 de junho, que define o Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios (RT-SCIE) [8], a resistência ao fogo é definida como a “propriedade de um elemento de construção, ou de outros componentes de um edifício, de conservar durante um período de tempo determinado a estabilidade e ou a estanquidade, isolamento térmico, resistência mecânica, ou qualquer outra função específica, quando sujeito ao processo de aquecimento resultante de um incêndio” [8]. No regulamento europeu, Eurocódigo 1 (Parte 1-2) [9], o mesmo conceito é definido como a “propriedade de um elemento de construção, ou de outros componentes de um edifício, de conservar durante um período de tempo determinado a estabilidade e ou a estanquidade, isolamento térmico, resistência mecânica, ou qualquer outra função específica, quando sujeito ao processo de aquecimento resultante de um incêndio” [9].

De forma a garantir a resistência ao fogo de uma estrutura, os materiais utilizados devem ser analisados segundo os critérios de capacidade de carga, integridade, e isolamento térmico, norma ISO 834-1 [10]. Dependendo da sua função, são definidos os elementos estruturais, que suportam cargas externas, devendo manter este suporte no caso de um incêndio; e os elementos de compartimentação, que mantêm a separação entre áreas adjacentes no caso de um incêndio. De notar que um elemento, pode cumprir uma ou ambas as funções em simultâneo, conforme a norma ISO 834-1 [10]. A resistência ao fogo padrão é determinada aplicando as condições de temperatura estipuladas pela curva de incêndio padrão (equação (2)), ao longo de um período determinado [9], [10], [11].

A capacidade de carga é definida como a capacidade de um membro estrutural suportar a sua carga de teste, sem exceder critérios específicos, relacionados com o valor e a taxa de deformação, segundo a norma ISO 834-1 [10]. O RT-SCIE [8] define como “Estabilidade ao fogo, a propriedade de um elemento de construção, com funções de suporte de cargas, capaz de resistir ao colapso durante um período de tempo determinado, quando sujeito à ação de incêndio” [8].

A integridade é definida na norma ISO 834-1 [10] como a capacidade de um elemento separador, exposto a chamas em um lado, impedir a passagem de chamas ou gases quentes através de si mesmo, tal como obstruir a ocorrência de chamas no lado não exposto [10]. Na regulamentação portuguesa (RT-SCIE [8]), este conceito é definido como “Estanquidade ao fogo, a propriedade de um elemento de construção com função de compartimentação de não deixar passar, durante um período de tempo determinado, qualquer chama ou gases quentes” [8].

O isolamento térmico, conforme a norma ISO 834-1 [10], é a capacidade de um elemento separador, exposto a chamas em um lado, manter a temperatura do lado não exposto inferior a valores estipulados [10]. Este conceito é definido no RT-SCIE [8] como “Isolamento térmico, propriedade de um elemento de construção com função de compartimentação de garantir que a temperatura na face não exposta ao fogo, desde o seu início e durante um período de tempo determinado, não se eleva acima de dado valor” [8].

O tipo de madeira a utilizar no presente trabalho é designado como *Glulam*, que, de acordo com a definição da norma EN 1194:1999 [12], é um componente estrutural constituído através da junção de camadas de madeira, paralelamente ao grão. É um dos produtos mais utilizados em estruturas em madeira, oferecendo uma enorme flexibilidade geométrica [13]. É um produto tecnologicamente avançado, composto por diferentes espécies de madeira, com alta resistência e estabilidade. Além das vantagens apresentadas anteriormente, é facilmente integrado com outros materiais isolantes, placas de gesso, acabamentos, azulejos e alvenaria [14]. As diferentes classes de resistência são definidas de acordo com a norma EN 1194:1999 [12]. As classes são nomeadas *GLxh*, para disposições homogêneas, ou seja, todas as placas são de categoria e espécie equivalente, ou *GLxc*, em que a secção transversal contém placas interiores e exteriores de classes diferentes [14]. Além disso, o valor associado à classe de resistência (na posição do “x”), corresponde ao valor da resistência à flexão [2].

2.1.2. Curvas de fogo

Para caracterizar a ação do fogo, de forma a analisar termicamente os elementos estruturais, são utilizadas curvas nominais de temperatura em função ao tempo, descritas através de equações apresentadas no Eurocódigo 1 (Parte 1-2) [2], [9].

A curva nominal de elementos exteriores deve ser utilizada na análise de incêndios exteriores à estrutura [2]. De acordo com o Eurocódigo 1 (Parte 1-2) [9], a temperatura dos gases quentes é obtida através da equação (1).

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

Utilizada em vários modelos de ensaio [2], [11], a curva nominal de incêndio padrão ISO 834 [9], de acordo com o Eurocódigo 1 (Parte 1-2) [9], é descrita pela equação (2). Esta curva é generalizada e apresenta temperaturas consideravelmente superiores às registadas em casos de incêndios naturais [2].

$$\theta_g = 20 + 345 * \log_{10}(8t + 1) \quad (2)$$

A curva de incêndio de hidrocarbonetos é utilizada para avaliar casos de incêndio onde a temperatura sobe mais rapidamente, e atinge valores superiores [15]. É tipicamente utilizada em projetos onde o combustível principal é o petróleo, o gás natural, solventes plásticos, ou outros líquidos inflamáveis [2]. De acordo com Eurocódigo 1 (Parte 1-2) [9], esta curva é descrita pela equação (3), subindo rapidamente e atingindo um valor constante de 1100°C. Após meia hora, a curva de incêndio padrão é menos acentuada, mas a temperatura continua a aumentar em função do tempo [9], [15].

$$\theta_g = 1080 * (1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,657e^{-2,5t}) + 20 \quad (3)$$

Nas equações (1), (2) e (3), θ_g é a temperatura dos gases quentes, e t é o tempo desde o início do incêndio. A representação gráfica das curvas de incêndio é apresentada na Figura 1.

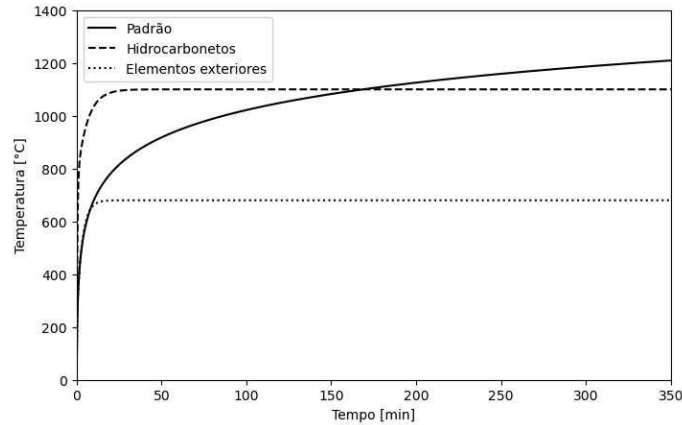


Figura 1 - Curvas de Incêndio padrão ISO 834, hidrocarbonetos, e elementos exteriores.

2.1.3. Modos de transferência de calor

Para o estudo do comportamento do fogo é necessária a compreensão dos modos de transferência de calor. A transferência de calor ocorre através dos modos da condução, convecção e radiação, em simultâneo ou separadamente [16].

- **Condução**

A condução é o mecanismo de transferência de calor num material sólido. Existindo um gradiente de temperatura, a condução ocorre na direção da temperatura superior para a inferior, através da interação entre partículas, sem o movimento macroscópico das mesmas [17]. É importante a sua consideração na ignição de superfícies sólidas, e na resistência ao calor de membros estruturais [16]. Em regime permanente, a transferência de calor por condução é diretamente proporcional ao gradiente de temperatura entre dois pontos, conforme se descreve na equação (4).

$$q''_{cond} = -k \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (4)$$

Onde, q''_{cond} é o fluxo de calor por unidade de área perpendicular à direção da transferência, k é a condutividade térmica do material, θ é a temperatura e x é a distância na direção do fluxo [16], [17]. O sinal negativo indica que o sentido do fluxo de calor é dado da temperatura superior, à inferior, contrária ao gradiente de temperatura [2].

Para o fluxo de calor transiente, quando as temperaturas mudam em função do tempo, a quantidade de calor necessária para mudar a temperatura do material tem de ser incluída. A equação governante é a (5), para a transferência unidimensional sem geração de calor [16].

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_d} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (5)$$

Onde t é o tempo e α_d é a difusividade térmica. Esta análise também pode ser efetuada para duas ou três dimensões no espaço [16].

- **Convecção**

A convecção é um fenómeno de transferência de calor observado nos fluídos. Na convecção, a transferência de calor ocorre também devido ao movimento macroscópico do fluído. Esse movimento, na presença de um gradiente térmico, contribui para a transferência de calor [17]. Este fenómeno tem um efeito notável na propagação das chamas, e no movimento ascendente do fumo e dos gases quentes, principalmente em incêndios em compartimentos fechados [16]. A transferência de calor por convecção depende de vários fatores, principalmente a velocidade do fluído em contacto com a superfície em questão. Para determinadas condições, o fluxo de calor é considerado como diretamente proporcional à diferença de temperatura entre os materiais em consideração [16], equação (6).

$$q''_{conv} = h * \Delta\theta \quad (6)$$

Onde q''_{conv} é o fluxo de calor, h é o coeficiente de transferência de calor por convecção e $\Delta\theta$ é a diferença de temperatura entre o fluído e a superfície do sólido. O valor de h depende de vários fatores, como a geometria da superfície, o tipo de fluxo, e da espessura da camada limite. De acordo com o Eurocódigo 1 (Parte 1-2) [9], quando é utilizada a curva de incêndio para elementos exteriores, ou a curva de incêndio padrão, o valor de h é 25 W/m²K, quando é utilizada a curva de incêndio de hidrocarbonetos, o valor a utilizar é de 50 W/m²K [16].

- **Radiação**

A radiação é a energia emitida por matéria através de ondas eletromagnéticas. A energia pode atravessar sólidos, líquidos e gases, e é mais eficiente a propagar-se no vácuo [16], [17]. A radiação pode ser atribuída à mudança de configuração de eletrões nas moléculas ou átomos que constituem o material em consideração [17]. Este modo de transferência de calor é extremamente importante para incêndios, é o mecanismo principal de transferência de calor das chamas e dos gases quentes para as superfícies, e entre edifícios em combustão e outros adjacentes [16]. O fluxo de calor através da radiação, entre duas superfícies, é calculado segundo a equação (7).

$$q''_{rad} = \varphi \varepsilon \sigma * (\theta_e^4 - \theta_r^4) \quad (7)$$

Onde q''_{rad} é o fluxo de calor, através da radiação, φ é o fator de forma, que depende da disposição geométrica das superfícies, ε é a emissividade das superfícies (equação (8)), σ é a constante de Stefan-Boltzmann, igual a 5,67x10⁻⁸W/m²K⁴, θ_e e θ_r são as temperaturas absolutas das superfícies, respetivamente, da que emite energia, e da que recebe [16], [17]. A resultante emissividade das superfícies é calculada segundo a equação (8).

$$\varepsilon = \frac{1}{(1/\varepsilon_e) + (1/\varepsilon_r) - 1} \quad (8)$$

Onde ε_e e ε_r são as emissividades das superfícies, da que emite e da que recebe energia, respetivamente. Esta propriedade representa a eficiência da superfície como radiador, com um valor que pode variar entre 0 e 1. Em situações de incêndio, superfícies quentes, partículas de fumo, e chamas, é tipicamente considerado um valor para a emissividade entre 0,7 e 1 [16].

2.2. Medidas de Proteção

As medidas de proteção ao fogo, passivas e ativas, são usadas em edifícios e outras construções de engenharia, tendo como objetivo, manter a temperatura dos componentes inferior à temperatura crítica, e limitar a propagação das chamas [18]. Os sistemas ativos de proteção proporcionam uma resposta imediata de supressão do incêndio, já os sistemas passivos contêm-no e desaceleram o seu desenvolvimento. A construção de edifícios deve conter ambos os tipos de sistemas de proteção, por trabalharem em conjunto na salvaguarda de vidas e proteção em geral da estrutura [19], [20]. A segurança contra incêndios efetiva deve ser uma das prioridades centrais em qualquer projeto de construção, e é crucial que estes sistemas sejam instalados por profissionais certificados. Os vários sistemas apresentados requerem a manutenção regular de forma a serem efetivas. Um sistema de segurança contra incêndios inadequadamente mantido, oferece tanta eficácia quanto a ausência de qualquer proteção [20].

2.2.1. Passivas

Como o nome indica, as medidas de proteção passiva devem-se manter inativas até ao início do incêndio, quando ativos, devem confinar as chamas e diminuir a velocidade de propagação [11], [18]. Como descrito anteriormente, uma das possíveis funções dos elementos construtivos é a compartimentação, o desempenho desta função está diretamente associado às propriedades dos materiais de proteção passiva utilizadas, e o modo como reagem ao fogo e a altas temperaturas [11].

As placas de gesso são habitualmente produzidas para montagem em várias superfícies, como paredes e tetos, tal como para o interior de poços de elevador, por exemplo. Também podem ser montadas diretamente em elementos estruturais, como vigas e colunas, oferecendo uma camada de resistência ao fogo [18]. Estas placas são compostas de um núcleo de gesso revestido com camadas de papel [14]. As suas propriedades podem ser modificadas de forma a atender a requisitos específicos, como a resistência ao fogo, à humidade, ou ao impacto, entre outros. Além da sua utilização como proteção ao fogo, as placas de gesso também contribuem para o desempenho mecânico de toda a estrutura [21]. Uma configuração típica para uma parede que utiliza placas de gesso é apresentada na Figura 2 a), esta é composta por duas placas de gesso, ligadas com perfis de aço ou de madeira. No espaço entre as placas pode ser colocado material isolante, como lã de rocha, fibra de vidro, ou isolamento de fibra de celulose, ou deixado vazio [22].

O núcleo de gesso é um material sólido poroso, maioritariamente composto por sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) [23]. As placas de gesso são frequentemente utilizadas como

material de proteção passiva, devido à sua proteção ao fogo efetiva [18]. Tipicamente contém, aproximadamente, 20% em massa de água quimicamente ligada à matriz cristalina do gesso. No evento de um incêndio, essa massa de água é evaporada, ajudando a minimizar a temperatura no interior da estrutura, desempenhando este fenómeno um papel significativo no comportamento do gesso a altas temperaturas [14], [18], [23]. Além disso, as placas de gesso são incombustíveis, mesmo depois da evaporação da água, estas permanecem como uma barreira isolante [18].

O betão é um material muito utilizado na construção de estruturas, quando se pretende uma boa resistência ao fogo. É um material incombustível, composto por uma quantidade significativa de cristais hidratados. No caso de um incêndio, a água é libertada e evaporada, levando a uma diminuição da temperatura no interior do membro estrutural. Além disso, a sua baixa condutividade térmica também contribui para a proteção da parte subjacente da estrutura, levando a mais tempo de resposta perante o incêndio [18]. A crescente necessidade de materiais de maior resistência levou ao desenvolvimento de tipos de betão de alto desempenho. Tendo uma microestrutura mais compacta, e assim uma maior massa volúmica, são mais suscetíveis a fissuração quando expostos ao fogo, fenómeno que habitualmente não é observado em betão convencional [18], [24].

De forma a contornar os problemas de fissuração a quente do betão mais compacto, foi desenvolvida uma solução, através da adição de fibras de polipropileno, que apresenta resultados positivos [18], [24]. A temperatura de fusão do propileno é, aproximadamente, 170°C. No caso de um incêndio, assim que as fibras fundem, são parcialmente absorvidas pela matriz do betão, deixando um caminho para o vapor de água libertado. Além disso, a expansão térmica das fibras é consideravelmente superior à do betão, levando à formação de microfissuras. Ambos os mecanismos levam ao aumento da sua permeabilidade, reduzindo assim a pressão produzida pelo vapor de água, prevenindo os problemas de fissuração [24].

A lã mineral (Figura 2 b)) é um dos mais antigos isolantes térmicos, composto por lã de rocha, um material incombustível e resistente ao fogo. Resiste a temperaturas até 1000°C, a partir dos quais começa a derreter. Pode ser utilizado como isolante térmico e acústico em edifícios, como núcleo resistente ao fogo para estruturas *sandwich*, ou como barreiras isolantes em elementos estruturais, tubos e condutas [18].



Figura 2 - Sistemas de isolamento: a) Placas de Gesso (adaptado de [22]), b) Painel de Lã Mineral [25].

Outros materiais minerais utilizados como isolantes térmicos incluem a perlita expandida, xisto, argila, ardósia e vermiculita. Estes minerais são agregados que oferecem uma solução eficiente

como proteção contra o fogo. Além de serem materiais incombustíveis, com alto isolamento térmico, são ainda agregados altamente porosos que absorvem a humidade. Estas características combinadas entre si, tornam estes materiais uma excelente opção como proteção passiva ao fogo [18].

Uma das soluções mais sustentáveis é o uso de isolamento à base de papel reciclado, jornais, cartão, e outros materiais similares. Este tipo de materiais é associado a alta inflamabilidade, mas é possível aplicar um tratamento químico com sulfato de amónio e borato, fornecendo alguma incombustibilidade ao isolamento. Além disso, a alta compactação neste tipo de isolamento sufoca as cavidades da parede de ar, minimizando assim a proliferação das chamas [18].

Outro tipo de material tipicamente utilizado para proteger estruturas em aço, é a tinta intumescente. São revestimentos projetados de forma a expandir quando expostos ao calor, e atingem temperaturas entre os 200°C e 250°C, diminuindo a massa volúmica, formando uma espuma com baixa condutividade térmica, protegendo assim o material revestido [18], [26]. Esta solução é cada vez mais utilizada, devido à estética, rapidez de aplicação, proteção à corrosão e melhor controlo de qualidade, quando comparado a outros métodos tradicionais de proteção passiva. As tintas intumescentes conseguem assim, fornecer um acabamento decorativo e protetor que não compromete a aparência original da estrutura exposta [26]. As tintas intumescentes podem ser separadas em dois tipos, revestimentos de película fina, com tintas à base de água ou solvente químico, e revestimentos de película espessa, com tintas à base de epóxido. Os de película fina são tipicamente utilizados para proteção contra incêndios celulósicos, já os revestimentos de película espessa são usados quando é necessária maior resistência ao fogo, ou quando há o risco de incêndios de hidrocarbonetos, por exemplo [18].

A madeira pode ser submetida a uma variedade de tratamentos, predominantemente tratamentos superficiais, ou revestimentos, e tratamentos químicos, cada um com impactos únicos na resistência ao fogo da madeira [3], [27]. A tinta intumescente, descrita anteriormente, também é utilizada na madeira, embora exista escassez em estudos científicos, devido à sua principal aplicação em estruturas de aço [28]. Os revestimentos utilizados não só diminuem a radiação que atinge a madeira, mas, ao estabelecer uma barreira, também inibem o contacto direto da madeira com o oxigénio [3]. Recentemente, destaca-se o uso de revestimentos nanoestruturados depositados camada por camada, devido à sua eficiência e ao efeito ambiental reduzido [3], [29]. Outras proteções, como processos de impregnação química consistem na imersão de madeira em soluções de compostos retardantes de chama, bem como a impregnação por vácuo que é outro método para integrar os compostos na matriz da madeira [3], [28]. Alguns exemplos de produtos utilizados como retardantes de fogo incluem soluções de ácido bórico e óxido de grafeno, cloreto de cálcio e fosfato de hidrogénio dissódico, argila de coloidal de montmorilonite [3].

Quando submetido a temperaturas elevadas, o aço perde a capacidade de resistência com relativa facilidade. Quando a temperatura atinge os 500°C, a perda de resistência ronda os 20%, e a perda de rigidez é aproximadamente 40% [30], [31], sendo que esta temperatura pode ser atingida, em estruturas em aço não protegidas, em aproximadamente 15 minutos [30], [32]. Devido a estes factos, as estruturas em aço devem ser protegidas, de forma a manter a função

de suporte de carga quando expostas ao fogo, durante o tempo necessário. Além das soluções exploradas anteriormente, uma solução com sucesso recente é a construção com elementos híbridos, com aço e madeira. Esta solução de construção, além de oferecer resistência ao fogo à estrutura, devido à camada de carvão formada pela madeira [14], [30], [33], combina o comportamento favorável à compressão da madeira, com o do aço em tração, possibilitando assim a construção de edifícios com alta resistência ao fogo, e a ações sísmicas [30]. Em 2021, Jiang, et al. [34], estudaram o comportamento de um elemento de construção compósito aço-madeira ao fogo, estudando a camada de carvão formada como isolamento, protegendo assim o aço. Concluíram que, utilizando uma secção com 20 mm de aço ao carbono, envolvida em 100 mm de espessura de madeira (Figura 3 a)), é possível manter o núcleo metálico a menos de 100°C, sob condições de incêndio padrão, após duas horas de exposição [30], [34]. Exemplos de elementos de construção compósitos de aço-madeira são apresentados na Figura 3.



Figura 3 - Elementos de construção aço-madeira: a) Secção quadrada (adaptado de [34]), b) Secção em I [30].

Outras soluções de medidas de proteção passivas são as portas e as cortinas de fogo. As portas de fogo são elementos construtivos que devem prevenir a propagação do fogo e do fumo com o mesmo nível de resistência ao fogo que as paredes e o chão [35]. De acordo com a regulamentação portuguesa (RT-SCIE) [8], estas devem ser equipadas com dispositivos de fecho, que, por meios mecânicos, as conduzem para a posição fechada. Já as cortinas de fogo podem ser uma alternativa mais económica às portas de fogo, também utilizadas para conter o fogo na zona afetada [20].

2.2.2. Ativas

Ao contrário dos sistemas de proteção passivos, os sistemas de proteção ativos requerem uma ação, manual ou automática, para detetarem, responderem, conterem, ou suprimir um incêndio. As combinações apropriadas de sistemas ativos que se devem implementar depende do tamanho e do tipo de construção, os materiais utilizados, e da regulamentação relevante aplicável [16], [19], [27].

Os sistemas de deteção de fogo são projetados de forma a detetar o incêndio no início do seu desenvolvimento, permitindo assim a evacuação antecipada e segura dos ocupantes. O alarme

pode ser acionado manualmente (Figura 4 a)), ou automaticamente, pelo sistema de detecção, estes devem ser frequentemente testados e monitorizados [20]. O momento de detecção e aviso da presença do fogo é fundamental, pois influencia a possibilidade dos ocupantes de eliminarem a ameaça, ou evacuarem o local, e a possibilidade dos bombeiros chegarem a tempo de extinguir um incêndio, ou prevenir o seu desenvolvimento [16], [27].

A toxicidade dos gases libertados durante a combustão é um fator indispensável na avaliação do risco de incêndio. O fumo não só reduz a visibilidade, dificultando a fuga, este tem efeitos adversos, e possivelmente letais, quando inalado. A maioria das mortes relacionadas ao fogo são devido à inalação de fumo [36]. Devido a estes factos, no decorrer de um incêndio, é fundamental manter certas zonas livres de fumo e gases resultantes da combustão, garantindo assim a evacuação segura dos ocupantes do edifício, e acesso para as equipas de resposta a emergências [16], [20]. Sistemas de controlo de fumo requerem a operação de ventiladores, ou outros dispositivos que retirem o fumo de certas áreas, ou que as pressurizem com ar [16].

No trajeto de evacuação deve ser instalado um sistema de luzes de emergência (Figura 4 b)), para, no caso de uma falha no sistema elétrico do edifício, a fuga seja possível. Este sistema deve sempre ser de ativação automática [19], [20]. Além disso, o trajeto deve ser acessível a todo tipo de pessoas com mobilidade reduzida [20]. Na Figura 4 são apresentados alguns exemplos de métodos de proteção ativa contra incêndios.



Figura 4 - Sistemas ativos de proteção: a) Dispositivo de alarme, b) Luz de emergência de saída [19].

Os sistemas de supressão de incêndio, ou *sprinklers* (Figura 5 a)), são dispositivos que tipicamente contêm, e libertam, CO₂, gases inertes, espuma, ou água pulverizada [20]. A utilização de sistemas automáticos de extinção automática por água é das formas mais efetivas para a melhoria e a segurança de incêndios nos edifícios. São particularmente recomendados em construções altas de madeira, pois o fogo estará extinto ou controlado antes da estrutura estar em risco. A sua instalação correta e manutenção é particularmente importante, pois a falha deste sistema pode levar à ausência total de proteção, ao contrário dos sistemas passivos de proteção, que tipicamente retêm alguma proteção, mesmo quando danificados [16], [37].

A disponibilidade de extintores de fogo funcionais (Figura 5 b)) ajuda diretamente a proteger as vidas dos ocupantes e a prevenir danos materiais, em muitos locais é obrigatória a sua instalação, perante a lei [19]. Os extintores de fogo portáteis são equipamentos projetados de forma a combater os vários tipos de fogos específicos. Dependendo do tipo de incêndio que pode ocorrer, cada local deve estar equipado com o extintor apropriado, [20].

Os hidrantes, ou bocas de incêndio (Figura 5 c)), são outros meios de proteção ativa importantes utilizáveis em estruturas. Estes equipamentos são utilizados pelos bombeiros para aceder ao abastecimento de água local, de forma a combater um incêndio ativo [20]. Durante a construção de um edifício, as bocas de incêndio devem ser instaladas, e estar totalmente operacionais [27]. Na Figura 5 são apresentados alguns exemplos de métodos de supressão de incêndios.



Figura 5 - Sistemas de supressão de incêndios: a) *Sprinkler* [27], b) Extintor portátil [19], c) Boca de incêndio [38].

2.3. Propriedades mecânicas e térmicas dos materiais

No presente capítulo são apresentadas as propriedades mecânicas e térmicas dos materiais que compõe as ligações em estudo, madeira, aço e gesso. De forma a desenvolver modelos de transferência de calor e avaliar a resistência ao fogo das ligações, é necessário o conhecimento das propriedades a altas temperaturas. Algumas destas propriedades são delineadas no Eurocódigo 3 (Parte 1-1) [39] e (Parte 1-2) [31] para aço, e no Eurocódigo 5 (Parte 1-2) [6] para madeira. As propriedades do gesso serão obtidas através da literatura, por consulta de diferentes trabalhos de investigação [14], [40], [41], [42], [43].

2.3.1. Madeira

Ao longo da história, a madeira sempre foi um material muito utilizado em construção, edifícios, mobília, ferramentas, veículos e objetos de decoração. A facilidade da sua obtenção, e um conjunto de características únicas, tornou-o desde sempre como um material atrativo. A madeira é composta por celulose, lignina, hemicelulose e pequenas quantidades de substâncias desconhecidas contidas na estrutura celular. As variações das proporções destes componentes levam a diferenças no comportamento da madeira, existindo assim espécies mais leves que outras, mais ou menos flexíveis, macias ou duras [44].

Recentemente, e devido a fatores estéticos e de sustentabilidade, tem-se observado um crescimento na utilização da madeira para edifícios de vários andares. O uso de produtos de madeira laminada estrutural permitiu o projeto e a construção de edifícios com maior vão e mais altos, que utilizam este material como sendo o principal da estrutura. Além disso, devido ao seu peso inferior, em relação a estruturas equivalentes de aço ou gesso, a madeira apresenta diversas vantagens em projetos de construção urbana [45].

Na Tabela 1 são apresentadas as propriedades mecânicas, à temperatura ambiente, das classes de *Glulam* para disposições homogêneas, de acordo com a norma EN 1194:1999 [12]. Onde, na Tabela 1, $f_{m,k}$ é a resistência à flexão, $f_{t,0,k}$ é a resistência à tração paralela à fibra, $f_{t,90,k}$ é a Resistência à tração perpendicular à fibra, $f_{c,0,k}$ é a resistência à compressão paralela à fibra, $f_{c,90,k}$ é a resistência à compressão perpendicular à fibra, $f_{v,k}$ é a resistência ao corte, $E_{0,mean}$ é o módulo de elasticidade paralelo à fibra, $E_{90,mean}$ é o módulo de elasticidade perpendicular à fibra, G_{mean} é o módulo de elasticidade ao corte e ρ_k é a massa volúmica.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas à temperatura ambiente de *Glulam* homogênea, segundo EN 1194:1999 (adaptado de [12])

Simbologia	GL24h	GL28h	GL32h	GL36h
$f_{m,k}$ [MPa]	24	28	32	36
$f_{t,0,k}$ [MPa]	16,5	19,5	22,5	26
$f_{t,90,k}$ [MPa]	0,4	0,45	0,5	0,6
$f_{c,0,k}$ [MPa]	24	26,5	29	31
$f_{c,90,k}$ [MPa]	2,7	3,0	3,3	3,6
$f_{v,k}$ [MPa]	2,7	3,2	3,8	4,3
$E_{0,mean}$ [MPa]	11 600	12 600	13 700	14 700
$E_{90,mean}$ [MPa]	390	420	460	490
G_{mean} [MPa]	720	780	850	910
ρ_k [kg/m ³]	380	410	430	450

Na Tabela 2 são também apresentadas as propriedades mecânicas de *Glulam* homogênea, disponibilizadas pelo fornecedor *Buckland Timber* [46]. Apresentam uma maior abrangência de propriedades, em particular da massa volúmica, que tem uma grande influência no seu comportamento [47]. O coeficiente de Poisson (ν) considerado é igual a 0,40 [44].

Tabela 2 - Propriedades mecânicas à temperatura ambiente de *Glulam* homogênea, segundo *Buckland Timber* (adaptado de [46])

Simbologia	GL20h	GL24h	GL28h	GL30h	GL32h
$f_{m,k}$ [MPa]	20	24	28	30	32
$f_{t,0,k}$ [MPa]	16	19,2	22,3	24	25,5
$f_{t,90,k}$ [MPa]	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
$f_{c,0,k}$ [MPa]	20	24	28	30	32
$f_{c,90,k}$ [MPa]	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
$f_{v,k}$ [MPa]	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
$E_{0,mean}$ [MPa]	8400	11 500	12 600	13 600	14 200
$E_{90,mean}$ [MPa]	300	300	300	300	300
G_{mean} [MPa]	650	650	650	650	650
ρ_k [kg/m ³]	370	420	460	480	490

Em 2019, EL-Houjeyri, et al. [47], efetuaram testes de forma a estudar a compressão da madeira, e os seus efeitos nas propriedades mecânicas. Realizaram ensaios de flexão em 3 e 4 pontos, em cavilhas fabricadas através de uma placa de madeira comprimida. Verificaram que, aumentando a massa volúmica em, aproximadamente, 2,6 vezes, o módulo de elasticidade e o módulo de rotura aumentaram em cerca de 1,68 e 2,16 vezes, respetivamente. Concluindo assim que a variação de propriedades mecânicas da madeira, nomeadamente a massa volúmica, leva a variações na resistência mecânica, neste caso, o aumento da massa volúmica levou a uma melhoria da resistência mecânica [47].

De forma a analisar situações reais de fogo, é fundamental conhecer as propriedades térmicas da madeira [14]. Embora seja um material inflamável, quando cumpre os critérios de dimensionamento, a madeira poderá ter uma boa resistência ao fogo, pela formação da camada exterior de carvão que promove o isolamento da madeira no seu interior [45].

Em 2018, A. I. Bartlett, et al. [33], realizaram uma revisão dos fatores que afetam o comportamento da madeira quando exposta ao fogo. Constatam que o desempenho de uma estrutura num incêndio depende vários parâmetros, como a espécie da madeira, as condições de aquecimento, a geometria, e, em particular, a sua massa volúmica e a humidade, estas podem levar a uma variabilidade de até 18% dentro dos intervalos esperados no projeto [3], [33]. Na exposição ao calor, alguns materiais iniciam um processo de decomposição, denominado de pirólise, é um processo que afeta a madeira química e fisicamente, a compreensão e quantificação do fenómeno é fundamental. Ao aquecer, os polímeros presentes na madeira degradam, produzindo gases inertes e combustíveis, pode ocorrer antes da desidratação estar completa se o fluxo de calor for alto o suficiente, mas o processo de pirólise ocorre mais rapidamente quando o material está seco. A madeira tipicamente passa por três estágios de pirólise, enquanto a temperatura é inferior a 200°C, decorre a desidratação e pirólise muito lenta, início da pirólise até aos 300°C, e pirólise rápida acima dos 300°C [33]. O carvão rígido resultante da pirólise desempenha um papel significativo na transferência de calor para a madeira restante [3], [33], [48]. Em aplicações estruturais, todo o processo é tipicamente simplificado, assumindo que a carbonização da madeira ocorre por volta dos 300°C. Na presença de oxigénio, os produtos da pirólise podem sofrer uma reação de combustão, resultando na ignição, desde que a temperatura da superfície e o fluxo de calor atinjam níveis suficientemente elevados. Devido às qualidades isolantes do carvão, se a ignição não ocorrer antes da geração da camada de carvão, será necessária uma temperatura superior para fornecer o fluxo de calor necessário. Também foi explorado o efeito da corrente de ar, uma corrente de ar mais forte resulta no atraso da ignição, devido ao arrefecimento inicial, mas, após ignição, contribui para uma combustão mais completa, devido à mistura de ar [33]. Na Figura 6 são ilustrados alguns dos processos que ocorrem numa amostra de madeira exposta ao fogo, ao longo da sua espessura.

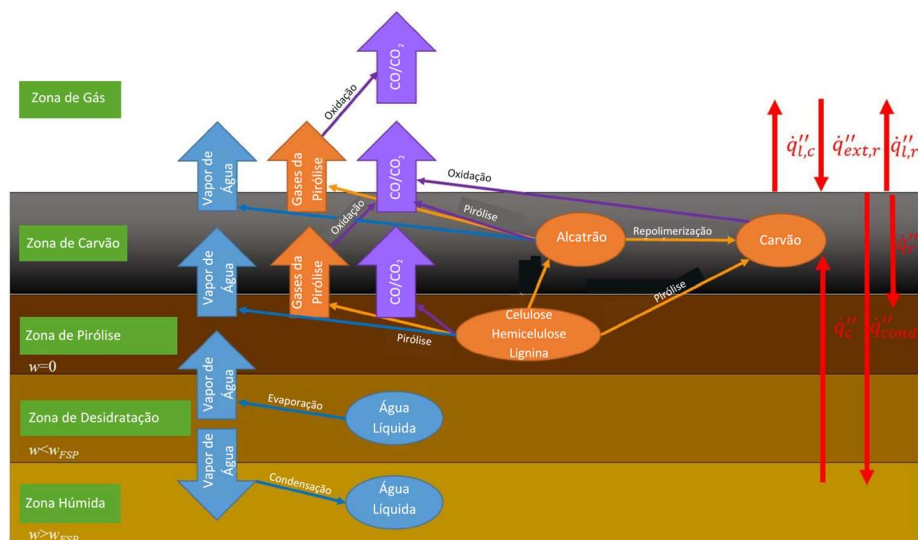


Figura 6 - Ilustração dos processos químicos e físicos numa amostra de madeira exposta ao fogo (adaptado de [33]).

Onde, na Figura 6, $\dot{q}''_{l,c}$ e $\dot{q}''_{l,r}$ são as perdas de calor na superfície, por convecção e radiação, respetivamente, $\dot{q}''_{ext,r}$ é o fluxo de calor externo, \dot{q}''_c representa a transferência por radiação no interior da amostra, \dot{q}''_{cond} é o fluxo de calor por condução para dentro da amostra e \dot{q}''_c é a transferência de calor por convecção através das fissuras formadas, w é a razão entre a massa de água e a massa sólida na madeira [33]. A sigla FSP refere-se ao *Fiber Saturation Point* ou, o Ponto de Saturação das Fibras da madeira, que representa a quantidade de humidade em que as paredes das células da madeira estão saturadas com água, sem a presença desta entre as cavidades celulares [49].

Com o aumento da temperatura, a secção resistente da madeira e a sua capacidade de carga diminuem, uma vez que a degradação térmica e a consequente camada de carvão se desenvolvem [14], [50]. A taxa de carbonização é constante e essencialmente depende da massa volúmica da madeira e da água contida no seu interior. A profundidade da carbonização depende do tempo de exposição ao fogo, representando a velocidade a que a madeira queima, ou seja, a taxa de carbonização [14]. O Eurocódigo 5 parte 1-2 [6] apresenta valores tabelados para a taxa de carbonização da madeira, em função do tipo de elemento construtivo, do tipo de madeira, e da sua massa volúmica. Para *Glulam* com massa volúmica igual ou superior a 290 kg/m³, a taxa de carbonização unidimensional de projeto (β_0) é igual a 0,65 mm/min e a taxa de carbonização nominal de projeto (β_n), cujo valor considera o efeito de arredondamento dos cantos e das fissuras, é igual a 0,7 mm/min [6]. Os elementos estruturais queimam na direcção da exposição ao fogo para o seu interior. A secção interior da madeira poderá ficar intacta, caso a propagação do fogo se extinga, denominando-se essa secção como efetiva no cálculo da resistência da madeira. A espessura da camada de carvão é a distância da superfície exterior à posição da linha isotérmica a 300°C, que demarca o limite interior intacto da madeira [14].

Os fenómenos descritos são fortemente dependentes das propriedades da madeira, em particular a massa volúmica [33]. Com base no Eurocódigo 5 (Parte 1-2) [6], são apresentadas as propriedades relevantes e a sua evolução com a temperatura. A emissividade (ϵ) da madeira

é igual a 0,8, de acordo com o Eurocódigo 5 (Parte 1-2) [6], e o coeficiente de expansão térmica (α_c) igual a $4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [44].

O aumento da temperatura na madeira também leva à diminuição da sua massa volúmica, quando são atingidos os 100°C. A água contida na madeira evapora, levando a uma queda súbita da massa volúmica. Quando a madeira se aproxima dos 300°C, a diminuição da massa volúmica é muito significativa, levando ao seu desaparecimento. Na Figura 7, observa-se a evolução da massa volúmica, em função da temperatura, de acordo com os valores para um rácio à temperatura ambiente, apresentados no Eurocódigo 5 (Parte 1-2) [6]. Estes valores foram calculados para os vários tipo de *Glulam*, de acordo com a norma EN 1194:1999 [12] em a), e para os vários tipos apresentados pelo fornecedor *Buckland Timber* [46] em b).

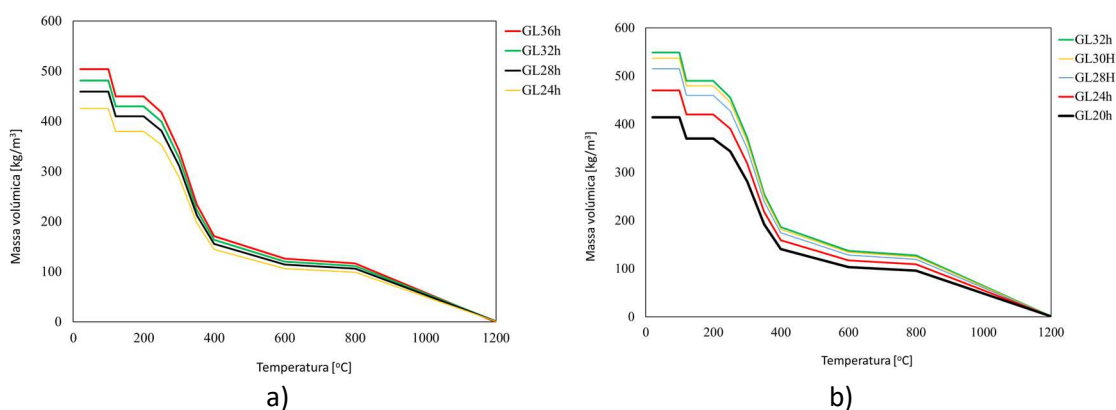


Figura 7 - Evolução da massa volúmica a) EN 1194:1999 [12] b) *Buckland Timber* [46].

Na Figura 8 são apresentadas as curvas de tensão-deformação, em tração, para várias classes de resistência de *Glulam* para temperaturas diferentes, de acordo com os fatores de redução de resistência e do módulo de elasticidade, apresentados no Eurocódigo 5 (Parte 1-2) [6].

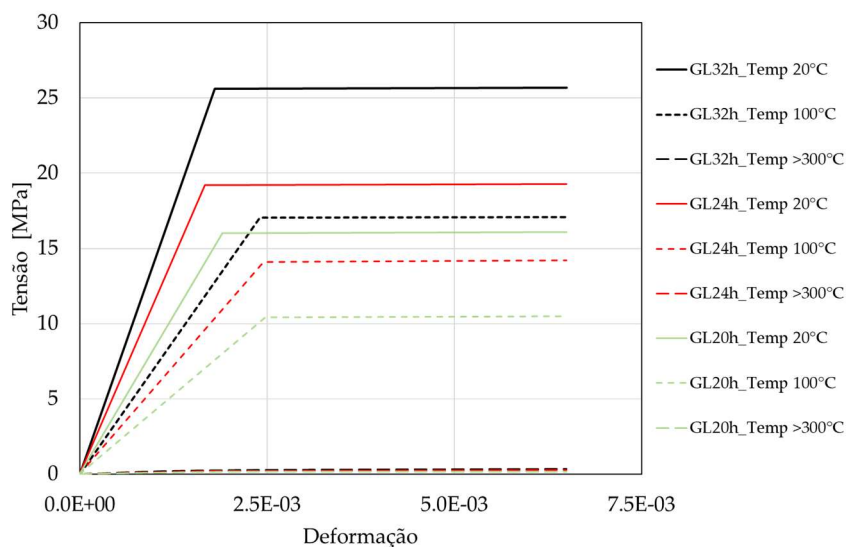


Figura 8 - Curvas tensão-deformação para várias classes de resistência de *Glulam*, para diferentes temperaturas.

O calor específico (C_p) da madeira depende de vários fatores, mas é independente da massa volúmica ou da espécie de madeira [14]. A sua variação em função da temperatura é apresentada na Figura 9, verificando-se o valor máximo por volta dos 100°C, devido à energia necessária para evaporar a água na madeira [2], [51].

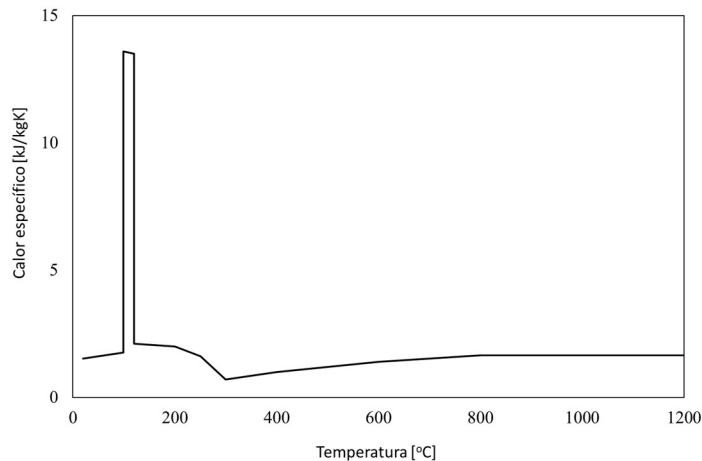


Figura 9 - Evolução do calor específico da *Glulam* em função da temperatura.

Durante a carbonização, ocorre a fissuração da madeira, particularmente alterando a sua condutividade térmica (k), principalmente a partir dos 500°C [2]. Esta propriedade mede o fluxo de calor através da espessura do material, perante um gradiente de temperatura [14]. De acordo com Eurocódigo 5 (Parte 1-2) [6], a evolução desta propriedade com o aumento da temperatura encontra-se representado na Figura 10.

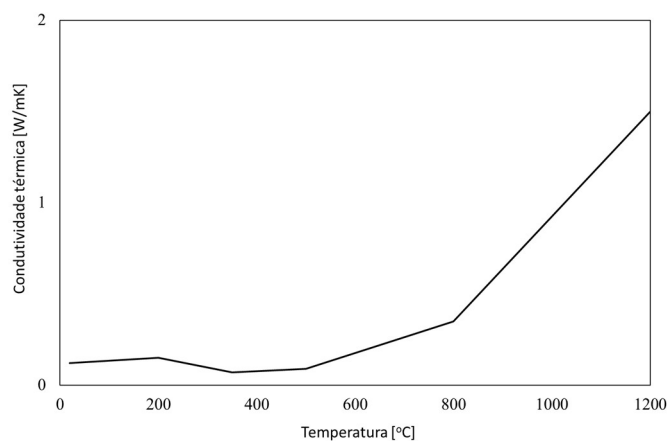


Figura 10 - Evolução da condutividade térmica da *Glulam* em função da temperatura.

2.3.2. Aço

Desde o início do século 19, a utilização do aço aumentou significativamente, principalmente no setor de construção civil. Devido à sua resistência mecânica, particularmente à tração, a sua utilização levou a uma mudança importante nos limites de projetos, permitindo a construção de edifícios com maior volume, maior vão e maior altura. Os aços têm uma grande variabilidade de propriedades mecânicas, alta resistência à tração e à compressão, rigidez e tenacidade.

Tipicamente têm boa soldabilidade, e podem ser deformados plasticamente, com alta capacidade de absorção de energia até à rotura. Estas características tornam o aço num material extremamente versátil, permitindo ampla liberdade na fase de projeto [49].

Na Tabela 3 são apresentadas a tensão de cedência e de rotura para diferentes tipos de aço ao carbono, utilizáveis em elementos de construção, com espessura inferior a 40 mm, conforme apresentado no Eurocódigo 3 (Parte 1-1) [39].

Tabela 3 - Propriedades mecânicas de elementos em aço ao carbono, com espessura inferior a 40 mm (adaptado de [39])

Tipo de aço	S235	S275	S355	S450
f_y [MPa]	235	275	355	440
f_u [MPa]	360	430	510	550

Na Tabela 3, f_y é a tensão de cedência e f_u é a tensão de rotura, em MPa. Outras propriedades, comuns entre os vários aços, incluem, o módulo de elasticidade (E) igual a 210 GPa; o módulo de elasticidade ao corte (G) com valor de 81 GPa; o coeficiente de Poisson (ν) igual a 0,3; e a massa volúmica (ρ) de 7 850 kg/m³, considerada constante e independentemente da temperatura, conforme o Eurocódigo 3 (Parte 1-1) [39] e Eurocódigo 3 (Parte 1-2) [31]. A emissividade do aço ao carbono (ε) é igual a 0,7, e o coeficiente de expansão térmica (α_c) de $12 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, Eurocódigo 3 (Parte 1-2) [31].

Com o aumento da temperatura, tal como a madeira, o aço sofre um decréscimo das suas propriedades, sem a redução da sua área resistente, mas, devido à alta condutividade térmica, uma vez que as altas temperaturas são atingidas em todo o elemento. A redução da resistência e da rigidez são calculadas aplicando fatores de redução, de acordo com o Eurocódigo 3 (Parte 1-2) [14], [31]. Na Figura 11 são apresentadas as curvas de tensão-deformação, em tração, para o aço S275, para temperaturas diferentes, de acordo com os fatores de redução de resistência e do módulo de elasticidade, apresentados no Eurocódigo 3 (Parte 1-2) [31].

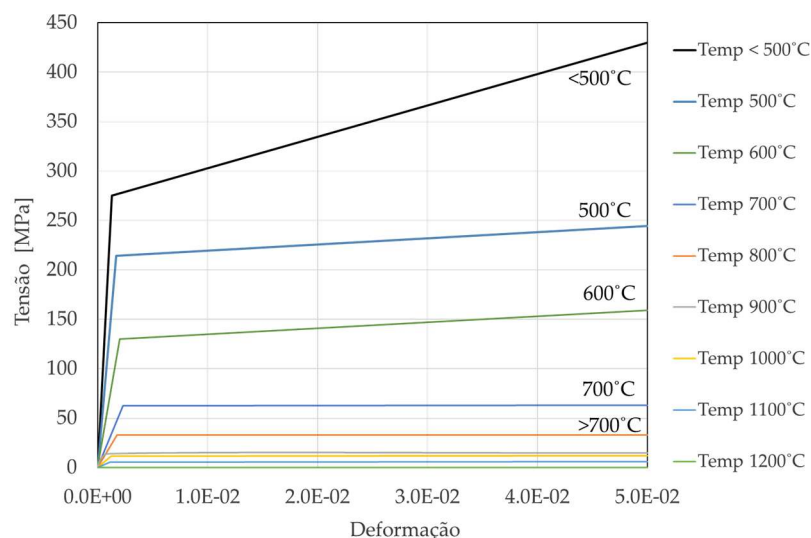


Figura 11 – Curvas tensão-deformação do aço S275, para diferentes temperaturas.

O calor específico do aço (C_p) varia em função da temperatura, verificando-se um pico próximo dos 750°C. Essa variação é calculada segundo equações apresentadas no Eurocódigo 3 (Parte 1-2) [31], dentro de intervalos de temperatura estabelecidos, como representado na Figura 12.

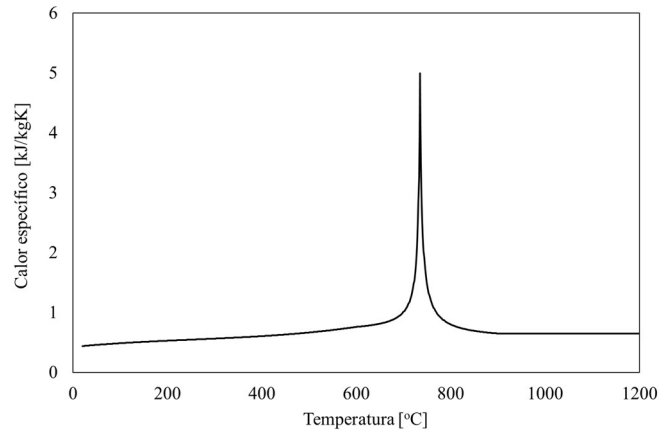


Figura 12 - Evolução do calor específico do aço (C_p) em função da temperatura.

A condutividade térmica (k) também varia em função da temperatura, calculada segundo equações apresentadas no Eurocódigo 3 (Parte 1-2) [31]. Com o aumento da temperatura esta propriedade diminui proporcionalmente, até aproximadamente aos 800°C, a partir da qual se mantém constante, como se observa na Figura 13.

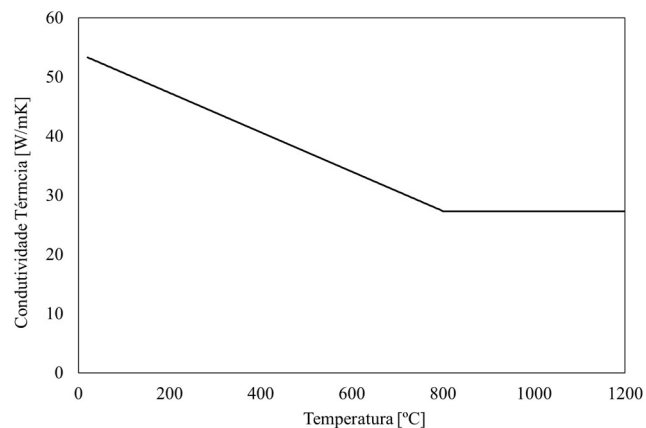


Figura 13 - Evolução da condutividade térmica (k) do aço em função da temperatura.

2.3.3. Gesso

O gesso é um mineral natural, ou de rocha sedentária, raramente usado como material estrutural [14]. Devido ao seu comportamento a altas temperaturas, é idealmente usado como material de proteção passiva contra a ação do fogo, em elementos estruturais e não estruturais. A adição de placas de gesso também melhora significativamente o desempenho de uma estrutura, como por exemplo, a sua rigidez lateral, em construções de madeira em particular [21]. As propriedades apresentadas foram obtidas em ensaios experimentais. Além disso, devido à sua natureza heterogênea e diferenças entre a composição química dos vários produtos de gesso, os vários estudos sobre este material apresentam uma ampla faixa de

valores para as suas propriedades [52]. As propriedades mecânicas a altas temperaturas também não estão bem estabelecidas, assim como o seu comportamento [14], [52].

De acordo com o Eurocódigo 5 (Parte 1-2) [6], os tipos de placas de gesso utilizados em ligações em madeira são os tipo A, H e F [6], [11]. O tipo A é um painel de gesso revestido com folhas de papel em ambas as superfícies, sem reforço no núcleo, os tipo H são tratados com uma substância resistente à água, diminuindo a sua absorção, e os tipo F são resistentes ao fogo, com um núcleo reforçado, tipicamente com fibras de vidro [11]. A emissividade das placas de gesso é igual a 0,8, de acordo com o Eurocódigo 5 (Parte 1-2) [6].

A evolução da massa volúmica (ρ) com o aumento da temperatura, para os tipos de gesso A e F, são obtidos de acordo com um estudo realizado em 2010, por A. Frangi, et al. [40], conforme representado na Figura 14. Verifica-se uma queda súbita, que ronda os 17%, entre os 100°C e os 170°C, devido à evaporação da água. Também é registada outra queda significativa, entre os 600°C e os 750°C. Os valores de referência da massa volúmica, a 20°C, utilizados no estudo são 640 kg/m³ e 889 kg/m³, para os tipos de gesso A e F, respetivamente [40].

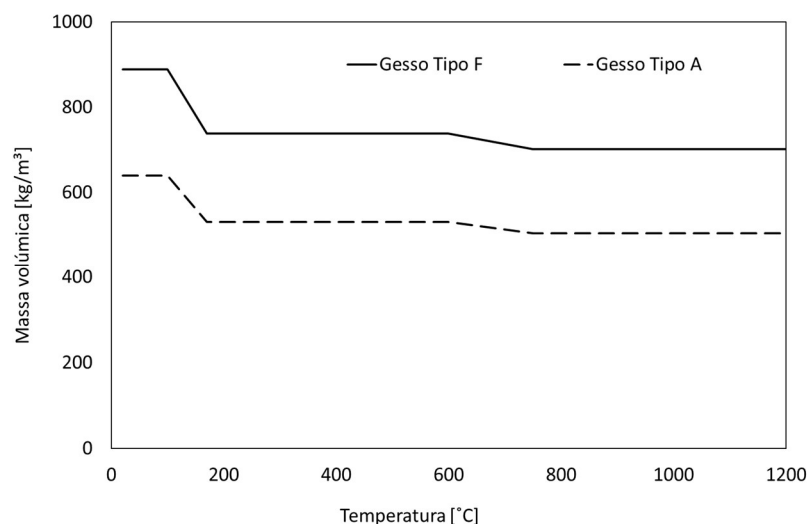


Figura 14 - Evolução da massa volúmica (ρ) do gesso com o aumento da temperatura.

A variação do calor específico (C_p) é representada na Figura 15, de acordo com um estudo realizado em 2009, por I.Rahmanian e Y. Wang [41]. São verificados dois picos, correspondentes às reações químicas que causam as descidas significativas de massa volúmica, referidos anteriormente.

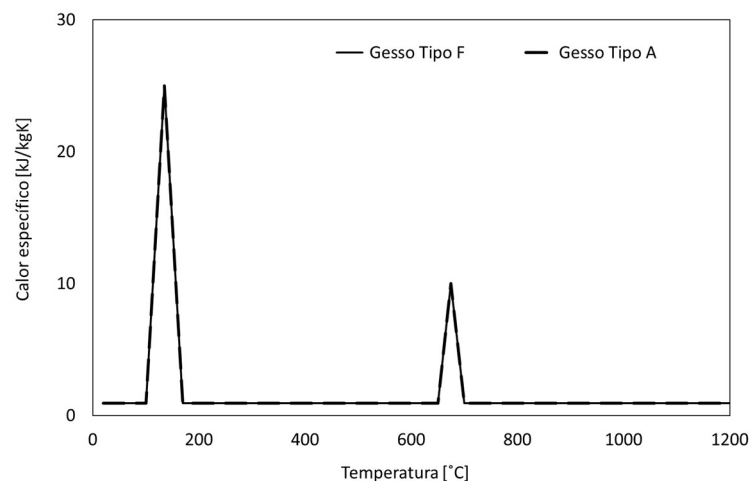


Figura 15 - Evolução do calor específico (C_p) do gesso com o aumento da temperatura.

A evolução da condutividade térmica (k) definida segundo o estudo de I.Rahmanian e Y. Wang [41], encontra-se representada na Figura 16. Esta propriedade depende de várias condições, como a variação da massa volúmica, o conteúdo de água e a porosidade do gesso. A evolução do calor específico e da condutividade térmica são independentes do tipo de gesso considerado, neste caso, A ou F [41].

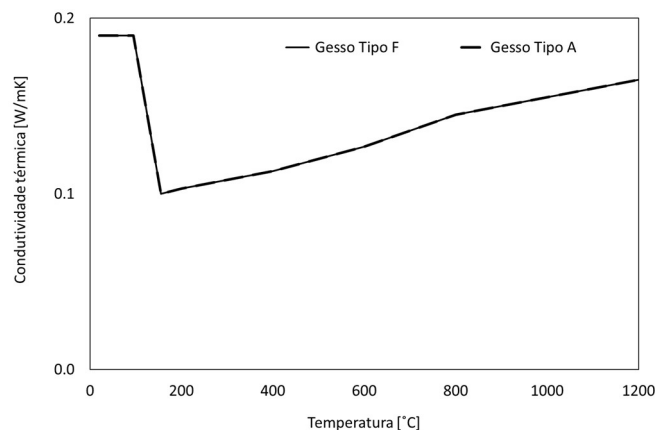


Figura 16 - Evolução da condutividade (k) térmica do gesso com o aumento da temperatura.

De forma a modelar corretamente a ligação protegida com placa de gesso, sob solicitação térmica e mecânica, é essencial dispor de um conjunto coerente de propriedades térmicas e mecânicas dos materiais. No entanto, como referido anteriormente, as propriedades do gesso não estão completamente estabelecidas na literatura, particularmente para os tipos definidos no Eurocódigo 5 (Parte 1-2) [6].

Para garantir consistência no modelo numérico, é fundamental que todas as propriedades aplicadas correspondam ao mesmo tipo de gesso, evitando a combinação de dados provenientes de materiais distintos. Por esses motivos, para os modelos desenvolvidos na presente dissertação, optou-se pela utilização das propriedades do gesso tipo X, proveniente dos Estados Unidos da América (EUA), utilizado como proteção passiva para a ação do fogo [42].

Em 2003, S. M. Cramer et al. [42] realizaram um estudo do comportamento mecânico e das propriedades de painéis de gesso tipo X, à temperatura ambiente e superiores. Os ensaios foram realizados com placas de 15,9 mm de espessura, com um núcleo de gesso revestido com papel, com o objetivo de medir a perda de massa e deformação térmica, o módulo de elasticidade e a resistência à flexão, as propriedades foram medidas a 23°C, 100°C, 200°C, 300°C e 400°C. Os provetes são aquecidos num forno de convecção, onde é medida a deformação térmica, e assim determinado o coeficiente de expansão térmica. Para cada condição, foram efetuados 9 ensaios, com pelo menos 4 provetes obtidos através de cortes longitudinais, mais 4 obtidos através de cortes transversais ao painel. Devido à alta influência da humidade relativa do ambiente no comportamento de placas de gesso, todos os painéis envolvidos nos ensaios, foram condicionados a 23°C e 50% de humidade relativa, durante pelo menos 30 horas. O módulo de elasticidade e a resistência à flexão foram determinados através de ensaios de flexão de três pontos, a natureza frágil do material e a sua baixa resistência tornam ensaios de tração inviáveis [42].

Verificou-se que as propriedades mecânicas são significativamente superiores para os provetes cortados na direção longitudinal do que os cortados na direção transversal, esta distinção é reduzida para temperaturas superiores. Para a resistência à tração, à temperatura ambiente, foram obtidos valores entre 2,0 e 4,0 MPa, para 400°C, este valor tende para 0. O revestimento em papel demonstrou uma função importante no comportamento estrutural da placa. À temperatura ambiente, após a rotura do núcleo, o papel tipicamente mantinha a sua integridade, sustentando um aumento de carga. A partir dos 200°C, o papel sofre carbonização, e a sua influência na resistência desaparece gradualmente. À temperatura ambiente, observaram-se valores para o módulo de elasticidade na faixa de 1.7 a 2.5 GPa. A tendência de degradação é similar à de perda de massa, a partir dos 200°C, a degradação do módulo de elasticidade está essencialmente completa, a adesão às fibras de vidro permite a retenção de alguma rigidez a 400°C [42].

Na Tabela 4 é possível observar os valores médios das propriedades obtidas dos ensaios nas placas de gesso tipo X, onde $f_{0,m,g}$ é a resistência à flexão, $E_{0,g}$ é o módulo de elasticidade e $\alpha_{0,c,g}$ é o coeficiente de expansão térmica dos provetes cortados longitudinalmente, $f_{90,m,g}$ é a resistência à flexão, $E_{90,g}$ é o módulo de elasticidade e $\alpha_{90,c,g}$ é o coeficiente de expansão térmica dos provetes cortados transversalmente, e $\rho_{k,g}$ é a massa volúmica.

Tabela 4 – Propriedades mecânicas de placas de gesso tipo X com revestimento de papel (adaptado de [42])

Temperatura [°C]	$\rho_{k,g}$ [kg/m ³]	$E_{0,g}$ [GPa]	$E_{90,g}$ [GPa]	$f_{0,m,g}$ [MPa]	$f_{90,m,g}$ [MPa]	$\alpha_{0,c,g}$ (10 ⁻⁶) [K ⁻¹]	$\alpha_{90,c,g}$ (10 ⁻⁶) [K ⁻¹]
23	700	2,50	1,75	3,79	2,25		
100	680	1,41	1,15	3,76	1,64	2,6	3,9
200	590	0,94	0,48	2,37	1,09	-5,1	-6,2
300	570	0,58	0,54	0,93	0,66	-3,2	-5,4
400	545	0,47	0,52	0,26	0,14	-1,6	-1,9

Em 2008, S. L. Manzello, et al. [43] realizaram um estudo para determinar o comportamento de vários tipos de placas de gesso, com e sem revestimento em papel, a altas temperaturas, em particular, examinaram o calor específico e a condutividade térmica, também foi medida a contração geométrica e a perda de massa. Os tipos de gesso analisados incluem o tipo X e tipo C, provenientes dos Estados Unidos da América, e os tipos R e F, do Japão, todas as amostras tinham a mesma espessura nominal, 15,9 mm [43].

Para medir o calor específico, foi utilizado o procedimento delineado na norma ASTM E 1269-2001 [53], com uma taxa de aquecimento de 20°C/min, sob um fluxo contante de nitrogénio [43]. A condutividade térmica foi medida através do método descrito por Bentz, et al. [54], utilizado na avaliação do desempenho de vários tipos de materiais resistentes ao fogo [54]. O calor específico dos vários tipos de placas de gesso com papel variou entre 891 e 1 017 J/kg K, a condutividade térmica variou entre 0,254 e 0,314 W/m K, a remoção do papel afetou sobretudo os valores de calor específico [43]. Na Tabela 5 verificam-se os resultados apresentados por Manzello, et al. [43], do calor específico (C_p) e da condutividade térmica (k) dos vários tipos de gesso ensaiados, com e sem o revestimento de papel, à temperatura ambiente.

Tabela 5 – Propriedades térmicas de vários tipos de placas de gesso, com e sem revestimento em papel (adaptado de [43])

	Com papel		Sem papel	
	C_p [J/kg K]	k [W/m K]	C_p [J/kg K]	k [W/m K]
Tipo C (EUA)	1017	0,276	852	0,276
Tipo X (EUA)	1089	0,258	947	0,252
Tipo F (Japão)	963	0,254	1034	0,238
Tipo R (Japão)	891	0,314	977	0,292

2.4. Metodologias

No presente capítulo são explicitadas as metodologias aplicadas no estudo de ligações e elementos estruturais em madeira. É descrito o método analítico de cálculo, como apresentado no Eurocódigo 5 (Parte 1-1) [7]. São descritas as metodologias experimentais e a aplicação de testes em provetes. Adicionalmente, é explorada a aplicação de metodologias numéricas para a análise de modelos computacionais.

2.4.1. Método simplificado de cálculo

O método simplificado de cálculo, para ligações madeira-madeira, com ligadores tipo cavilha, é explicitado no Eurocódigo 5 (Parte 1-1) [7]. O valor para a capacidade de carga característica por plano de corte, por ligador ($F_{v,RRk}$), resulta do menor valor obtido com as expressões apresentadas no sistema de equações (9). Em geral, as ligações são compostas por mais do que um ligador, mas a avaliação da sua capacidade resistente é baseada no comportamento

individual de um ligador. Esta simplificação deve-se à complexidade do comportamento mecânico das ligações em madeira [4].

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} t_1 d \quad (a) \\ f_{h,2,k} t_2 d \quad (b) \\ \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{1 + \beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (c) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (d) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_2 d}{1 + 2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (e) \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (f) \end{array} \right. \quad (9)$$

Na equação (9), $F_{v,Rk}$ é a capacidade de carga característica por plano de corte e por ligador, t_i é a espessura dos elementos de 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 característico do ligador, $F_{ax,Rk}$ é a resistência ao arranque característico do ligador, igual a 0, para ligações com cavilhas e β é o rácio de resistência ao esmagamento, obtido segundo a equação (10) [7].

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} \quad (10)$$

A resistência ao esmagamento da madeira ($f_{h,i,k}$), é calculada em função do diâmetro do ligador (d), e da massa volúmica da madeira (ρ_k), segundo a equação (11) [7].

$$f_{h,i,k} = 0,082(1 - 0,01d)\rho_k \quad (11)$$

O momento de cedência característico do ligador ($M_{y,Rk}$), para ligadores de secção circular, depende da tensão de rotura à tração característica do ligador ($f_{u,k}$), e do seu diâmetro (d), de acordo com a equação (12) [7].

$$M_{y,Rk} = 0,3f_{u,k}d^{2,6} \quad (12)$$

Depois de calculada a capacidade de carga característica por plano de corte, por ligador ($F_{v,Rk}$), são aplicados fatores de segurança de forma a obter a capacidade de carga característica de projeto ($F_{v,Rd}$), como descrito na equação (13). Para as ligações em estudo, o fator de correção (k_{mod}) é igual a 0,6, para carregamentos de duração permanente, e para a classe de serviço 1, que se refere à humidade do ambiente, e o fator parcial de segurança (γ_M) é igual a 1,25, devido à utilização de *Glulam* nas ligações em estudo [7].

$$F_{v,Rd} = \frac{F_{v,Rk} * k_{mod}}{\gamma_M} \quad (13)$$

O número efetivo de cavilhas (N) representa o número mínimo de cavilhas que a ligação deve conter, de forma a efetivamente suportar a carga aplicada. Este valor é calculado através da capacidade de carga característica de projeto ($F_{v,Rd}$), e a carga aplicada (F_d), segundo a equação (14).

$$N = \frac{F_d}{F_{v,Rd}} \quad (14)$$

Na Tabela 6 apresenta-se o método de cálculo para os espaçamentos mínimos entre as cavilhas, para ligações cujo ângulo entre as fibras e a carga aplicada (α) é igual a 0° . O Eurocódigo 5 (Parte 1-1) [7] define a_1 e a_2 como a distância mínima que as cavilhas devem ter entre si, na horizontal e na vertical, respetivamente. As distâncias mínimas entre as margens laterais e as cavilhas mais próximas, são definidas como $a_{3,t}$ e $a_{4,c}$, para a margem horizontal e vertical, respetivamente [7]. Na Figura 29 apresenta-se a ligação em madeira com os parâmetros geométricos.

Tabela 6 – Cálculo dos espaçamentos mínimos entre cavilhas (adaptado de [7])

Parâmetros geométricos	Cálculo
a_1	$(3 + 2 \cos \alpha) * d$
a_2	$3d$
$a_{3,t}$	$\max(7d; 80\text{mm})$
$a_{4,c}$	$3d$

As equações simplificadas (9) para o cálculo capacidade de carga característica permitem avaliar os modos de rotura, conforme apresentado na Figura 17. Os modos de rotura apresentados para ligações madeira-madeira são classificados de acordo com o esmagamento de cada elemento de madeira em a) e b); a flexão do ligador em c); a flexão do ligador em conjunto com o esmagamento de cada elemento de madeira em d) e e); e o modo de rotura f) que representa a flexão do ligador em conjunto com o esmagamento de ambos os elementos de madeira [2].

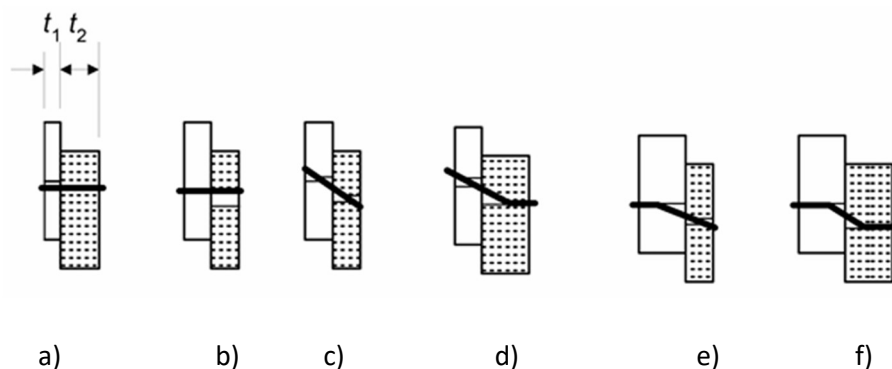


Figura 17 - Modos de rotura de ligações madeira-madeira em corte simples: a) e b) esmagamento da madeira; c) flexão do ligador; d), e) e f) flexão do ligador em conjunto com o esmagamento da madeira (adaptado de [7]).

Em 2018, R. Jockwer, et al. [4] estudaram o comportamento mecânico e a fiabilidade de ligações em madeira. Sabendo que grande parte do desempenho da estrutura depende das ligações

entre os vários membros estruturais, as mesmas também são responsáveis por grande parte das falhas registradas em estruturas de madeira [4], [55].

Em 2021, M. Yurrita e J. Cabrero [56] realizaram um estudo sobre a importância da distinção dos modos de falha, dúctil ou frágil, para ligações em madeira, com ligadores tipo cavilha. Em flexão e tração, a madeira tipicamente sofre rotura frágil, a ductilidade das estruturas em madeira é tipicamente oferecida pelas suas ligações. A deformação sequencial observada na rotura dúctil permite a sua identificação com a possível antecedência de a prevenir, ao contrário da rotura frágil, que implica um colapso repentino. Devido a estes fatores, os valores elevados de ductilidade são importantes, particularmente em regiões sísmicas. Os diferentes modos de rotura dependem das propriedades dos materiais e das propriedades geométricas da ligação. A falha dúctil deve-se à combinação do esmagamento da madeira e da cedência do ligador. A falha frágil deve-se à fratura da madeira, ocorrendo tipicamente antes da cedência dos ligadores [56].

Alguns dos modos de rotura em ligações de madeira com ligadores do tipo cavilha são apresentados na Figura 18. O modo de rotura a) representa o esmagamento da madeira e a cedência do ligador, b) apresenta a rotura da madeira através de uma fenda, ao longo de uma fila de ligadores, c) exhibe a formação de duas fendas paralelas, ao longo das filas de ligadores, d) apresenta o arrancamento de uma área de madeira solicitada, ao longo das filas exteriores de ligadores, e) exhibe a rotura através de uma fenda na secção transversal no início de uma ligação [56].

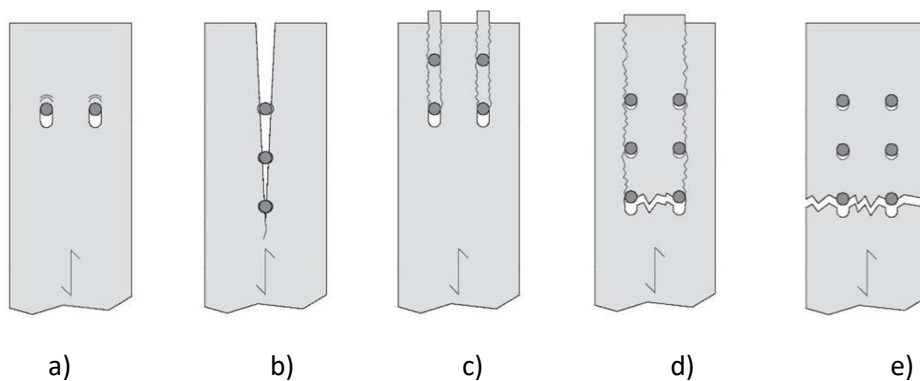


Figura 18 - Modos de rotura para ligações em madeira com cavilha: a) rotura dúctil; b), c), d) e e) rotura frágil (adaptado de [56]).

Para a validação do dimensionamento de ligações sujeitas à ação do fogo, o Eurocódigo 5 (parte 1-2) [6], apresenta a inequação (15). Quando esta equação se verifica, a ligação é considerada corretamente dimensionada ao fogo.

$$E_{d,fi} \leq R_{d,t,fi} \quad (15)$$

Na inequação (15), $E_{d,fi}$ é o resultado das ações de projeto, para situações com exposição ao fogo, calculado em função do valor de projeto para os efeitos relevantes das ações de projeto (E_d) [6], que, neste caso, é tomado como a carga de tração imposta na ligação à temperatura ambiente, segundo o conjunto de equações (16). Logo, $R_{d,t,fi}$ é a resistência de projeto da

ligação para uma situação de fogo, considerada como a resistência à carga de tração em exposição ao fogo, de acordo com o conjunto de expressões (17).

$$\begin{aligned} E_{d,fi} &= \eta_{fi} E_d \\ E_d &= F_d \end{aligned} \quad (16)$$

No conjunto de equações (16), η_{fi} é o fator de redução de carga de projeto de exposição ao fogo, igual a 0,6, segundo o Eurocódigo 5 (parte 1-2) [6].

$$\begin{aligned} R_{d,t,fi} &= f_{d,fi} * A_S \\ f_{d,fi} &= k_{mod,fi} \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}} \\ f_{20} &= k_{fi} f_{t,0,k} \end{aligned} \quad (17)$$

No conjunto de equações (17), A_S é a área resistente da ligação, calculada em função da carga imposta (F_d), e da resistência à tração de projeto ($f_{t,0,d}$), de acordo com o conjunto de equações (18); $f_{d,fi}$ é a resistência à tração em exposição ao fogo, $k_{mod,fi}$ é um fator de modificação ao fogo, igual a 1, $\gamma_{M,fi}$ é o fator de segurança parcial para madeira exposta ao fogo, também igual a 1, segundo o Eurocódigo 5 (parte 1-2) [6]; f_{20} é a resistência à tração correspondente ao percentil 20%, e k_{fi} é um fator característico do material, neste caso igual a 1,15, para *Glulam*, de acordo com o Eurocódigo 5 (parte 1-2) [6].

$$\begin{aligned} A_S &= \frac{F_d}{f_{t,0,d}} \\ f_{t,0,d} &= \frac{f_{t,0,k} * k_{mod}}{\gamma_M} \end{aligned} \quad (18)$$

Para verificar as ligações ao fogo, de acordo com o Eurocódigo 5 (parte 1-2) [6], será utilizada a inequação (19), que resulta da simplificação da inequação (15), através dos conjuntos de equações (16) e (17) [57], e é calculado o respetivo coeficiente de segurança (cs).

$$\begin{aligned} \frac{E_{d,fi}}{A_S} &\leq f_{d,fi} \\ cs &= f_{d,fi} / \frac{E_{d,fi}}{A_S} \end{aligned} \quad (19)$$

Para ligações protegidas por placas de gesso, o Eurocódigo 5 (parte 1-2) [6] disponibiliza equações para o seu dimensionamento. Primeiro é calculado o tempo de atraso da carbonização devido à proteção (t_{ch}), em função do tempo de resistência ao fogo requerido (t_{req}) e do tempo de resistência para as ligações não protegidas ($t_{d,fi}$). Para ligações protegidas com painéis de madeira ou de gesso tipo A ou H apresenta-se a inequação (20), e para painéis de gesso tipo F, a inequação (21) [6].

$$t_{ch} \geq t_{req} - 0,5t_{d,fi} \quad (20)$$

$$t_{ch} \geq t_{req} - 1,2t_{d,fi} \quad (21)$$

Para calcular a espessura de painéis de gesso (h_p), de qualquer tipo, é apresentada a equação (22) [6].

$$h_p = \frac{t_{ch} + 14}{2,8} \quad (22)$$

Nas inequações (20) e (21), o tempo de resistência ao fogo exigido (t_{req}) é considerado igual a 60 min, e, de acordo com o Eurocódigo 5 (parte 1-2) [6], o tempo de resistência para as ligações não protegidas ($t_{d,fi}$) é igual a 20 min.

2.4.2. Métodos experimentais

Os ensaios experimentais em ligações são fundamentais para a compreensão do seu comportamento, à temperatura ambiente, tal como a altas temperaturas por exposição ao fogo. Esses estudos permitem avaliar de forma prática o impacto de parâmetros específicos na resistência das ligações, como o diâmetro das cavilhas, a espessura dos membros e o número de cavilhas utilizadas. Além disso, possibilitam testar hipóteses e validar teorias, contribuindo para um dimensionamento mais preciso e eficiente dessas ligações.

Em 2019, M. Audebert, et al. [58] apresentaram uma revisão abrangente dos dados experimentais disponíveis sobre o comportamento de ligações madeira-madeira e madeira-aço com ligadores do tipo cavilhas, sob exposição ao fogo padrão ISO 834 [9]. Foram analisados estudos realizados ao longo de 18 anos, envolvendo configurações geométricas variadas e diferentes tipos de carregamento. Os resultados experimentais indicaram que a resistência ao fogo das ligações depende significativamente da configuração geométrica, do tipo de ligadores e da proporção de carga aplicada. Constatou-se também que as placas metálicas embutidas contribuem para o desempenho global das ligações, particularmente ao adicionar ductilidade. No entanto, a proteção das placas metálicas com elementos de madeira é fundamental para aumentar a resistência ao fogo, uma vez que reduz a exposição direta do aço e retarda a transferência de calor para os ligadores. Por outro lado, ligadores como parafusos e cavilhas apresentaram um impacto negativo devido à sua alta condutividade térmica. Com base nesses dados, foram feitas comparações com as regras de projeto do Eurocódigo 5 (Parte 1-2) [6], destacando a necessidade de revisões para incorporar novas descobertas e melhorar a precisão dos métodos de cálculo existentes [58].

Em 2022, M. Johanides, et al. [59] realizaram um estudo combinado de ensaios experimentais e modelos numéricos, para avaliar a rigidez rotacional de ligações semirrígidas em *Glulam*, utilizando dois tipos de fixadores, cavilhas e parafusos totalmente roscados. O objetivo principal foi comparar a eficácia de cada tipo de ligação em termos de capacidade de carga e comportamento sob ciclos de carregamento quase-estático, enquanto os modelos numéricos serviram para validar e complementar os resultados experimentais. Os ensaios consistiram em aplicar ciclos de carga e descarga nos níveis de 60%, 80% e 100% do limite de resistência, com o intuito de replicar condições realistas de uso. Para minimizar fatores externos, como o deslizamento inicial, foram utilizados furos pré-perfurados. Os resultados experimentais mostraram que as ligações com parafusos totalmente roscados apresentaram maior rigidez inicial e melhor distribuição de tensões, enquanto as ligações com cavilhas demonstraram maior ductilidade, mas com redução progressiva na rigidez ao longo dos ciclos. Os modelos

numéricos corroboraram os dados obtidos e permitiram avaliar de forma detalhada a distribuição de tensões e deformações nas ligações [59].

Em 2023, M. Shabaniyan e N. Braxtan [60] investigaram o comportamento termomecânico de ligações de tamanho intermédio entre vigas de *Glulam* e paredes de *cross-laminated timber* (CLT), com cavilhas de aço, tanto à temperatura ambiente como durante e após exposição ao fogo. Foram realizados ensaios para avaliar a capacidade de carga e os modos de rotura, incluindo testes pós-fogo com exposições de 30 e 60 minutos, além de um ensaio com carga térmica e mecânica simultânea, equivalente a 65% da capacidade à temperatura ambiente. Observou-se que, à temperatura ambiente, os modos de rotura dominantes incluíram o esmagamento das cavilhas e a formação de fendas nas vigas de *Glulam*, enquanto, durante a exposição ao fogo, o esmagamento da madeira em contacto com as cavilhas foi o modo de rotura predominante. Nos ensaios pós-exposição ao fogo, verificou-se uma redução de resistência de 14% após 30 minutos de exposição e de 37% após 60 minutos [60].

2.4.3. Método dos elementos finitos

O método dos elementos finitos (MEF) destaca-se como uma ferramenta essencial na análise estrutural, permitindo a simulação de diferentes condições e variáveis com elevada precisão. A flexibilidade do MEF possibilita explorar cenários complexos que seriam difíceis ou dispendiosos de reproduzir experimentalmente, contribuindo para um entendimento mais aprofundado do comportamento estrutural.

Em 2008, M. Dorn e K. Hofstetter [61] desenvolveram uma ferramenta computacional para analisar o comportamento mecânico de ligações madeira-aço com cavilhas. O trabalho apresenta um modelo elasto-plástico para a madeira, baseado no critério de falha de Tsai-Wu, implementado no programa de elementos finitos *Abaqus*. Este modelo foi projetado para prever com precisão os mecanismos de falha local na madeira, incluindo comportamentos frágeis e dúcteis, bem como os mecanismos de carga global, como dobradiças plásticas nas cavilhas. A ferramenta desenvolvida considera fatores cruciais, como o contacto e a fricção entre madeira e aço, bem como a não-linearidade dos materiais. Os resultados preliminares do modelo numérico demonstraram boa concordância com testes experimentais, indicando a capacidade da ferramenta em prever as características de resistência e deformação das ligações. No entanto, foram identificadas áreas de melhoria, incluindo o comportamento de endurecimento do material, a consideração de fissuras e o impacto de diferentes coeficientes de fricção na distribuição de tensões. Esta ferramenta oferece um avanço significativo na previsão da capacidade resistente de ligações com cavilhas em madeira, fornecendo um suporte confiável para projetos estruturais mais complexos [61].

Em 2019, J. Zhang, et al. [62] apresentaram uma abordagem numérica e experimental para estudar o comportamento termomecânico de ligações em madeira do tipo rabo-de-andorinha, expostas a fogo padrão ISO 834 [9]. O modelo numérico foi desenvolvido no programa *Abaqus/Explicit* e baseia-se na teoria da mecânica do dano contínuo e no critério de falha Yamada-Sun, considerando as propriedades ortotrópicas da madeira e os efeitos dependentes da temperatura. Os resultados mostraram que o modelo termomecânico apresentou boa

concordância com os ensaios experimentais, tanto à temperatura ambiente como sob exposição ao fogo, com máximo erro relativo de 34%. Foram analisadas as taxas de carbonização e a distribuição dos campos de temperatura nos elementos. Além disso, a variação das curvas de energia cinética ao longo do tempo foi utilizada como critério de falha para prever a resistência ao fogo. Estudos paramétricos destacaram a influência das taxas de carga e das propriedades térmicas na evolução do dano. No presente estudo também se observa que as ligações do tipo rabo-de-andorinha, quando expostas ao fogo, apresentam rotura devido a dano frágil na secção residual. Este trabalho reforça a importância dos métodos de elementos finitos para prever o comportamento de ligações em madeira sob ação do fogo e fornece uma base sólida para o projeto de ligações seguras em situações de incêndio [62].

Em 2024, M. Khelifa, et al. [63] desenvolveram um modelo termomecânico acoplado para prever o comportamento de vigas de madeira sob ação do fogo, integrando uma análise sequencial de transferência de calor com a resposta estrutural. Este modelo utiliza sub-rotinas desenvolvidas pelos autores para implementar leis constitutivas térmicas e mecânicas no programa *Abaqus*. A parte estrutural do modelo baseia-se numa formulação elasto-plástica com encruamento isotópico não-linear, permitindo descrever o comportamento mecânico da madeira sob diferentes condições de carga. A relação entre tensões e deformações é descrita pela formulação para materiais ortotrópicos, utilizando a Lei de Hooke adaptada. Para um material ortotrópico, a deformação total ($\underline{\varepsilon}$) é decomposta em componentes elásticas ($\underline{\varepsilon}^e$) e plásticas ($\underline{\varepsilon}^p$), como se observa na equação (23) [63].

$$\underline{\varepsilon} = \underline{\varepsilon}^e + \underline{\varepsilon}^p \quad (23)$$

O tensor de tensões ($\underline{\sigma}$) é relacionado com as deformações elásticas por meio do tensor de rigidez ($\underline{\Delta}$), calculados segundo o conjunto de expressões (24) [63], [64].

$$\underline{\sigma} = \underline{\Delta} \underline{\varepsilon}^e$$

$$\underline{\Delta} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (24)$$

Os componentes do tensor de rigidez (C_{ij}) são calculados segundo o conjunto de expressões (25) [63], [64].

$$\begin{aligned} C_{11} &= \frac{1 - \nu_{23}\nu_{32}}{\Delta E_2 E_3} & C_{22} &= \frac{1 - \nu_{13}\nu_{31}}{\Delta E_1 E_3} & C_{33} &= \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21}}{\Delta E_1 E_2} \\ C_{12} &= \frac{\nu_{21} + \nu_{31}\nu_{23}}{\Delta E_2 E_3} & C_{13} &= \frac{\nu_{31} + \nu_{21}\nu_{32}}{\Delta E_2 E_3} & C_{23} &= \frac{\nu_{32} + \nu_{12}\nu_{31}}{\Delta E_1 E_3} \\ C_{44} &= 2G_{12} & C_{55} &= 2G_{23} & C_{66} &= 2G_{13} \\ \Delta &= \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{13}\nu_{31} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13}}{E_1 E_2 E_3} \end{aligned} \quad (25)$$

Os coeficientes da matriz dependem das propriedades ortotrópicas da madeira, incluindo os módulos de elasticidade (E_i), para as várias direções i , os coeficientes de Poisson (ν_{ij}) e os módulos de elasticidade ao corte (G_{ij}), para os planos ij , e do parâmetro do tensor de rigidez (Δ). Estes parâmetros determinam o comportamento anisotrópico do material e permitem avaliar a resposta estrutural sob diferentes direções de carregamento [63].

A modelação numérica da transferência de calor é essencial para estimar a formação e evolução da camada carbonizada, para esse efeito, os efeitos das chamas são analisados através da formulação fraca da equação de condução térmica, conforme a expressão (26) [63].

$$\int_{\Omega} \delta\theta \dot{U} d\Omega = - \int_{\Omega} \delta\theta \nabla q d\Omega + \int_{\Omega} \delta\theta Q d\Omega \quad (26)$$

Onde, U é a energia interna, calculado segundo a equação (27), e Q é a geração de calor, ao longo do volume Ω , $\delta\theta$ é o campo virtual de temperatura e ∇q é a variação do fluxo de calor [63].

$$\dot{U} = \rho C_p \dot{\theta} \quad (27)$$

As previsões do modelo foram validadas com resultados experimentais, mostrando boa concordância na estimativa de perfis de temperatura, deslocamentos e espessura da camada carbonizada [63]. Por exemplo, a distribuição de temperaturas ao longo da secção transversal e o momento em que a falha ocorre, após exposição prolongada ao fogo, foram bem reproduzidos. Este trabalho destaca a importância do acoplamento térmico-mecânico para a previsão do comportamento de estruturas de madeira expostas ao fogo, oferecendo uma ferramenta robusta para o dimensionamento de estruturas seguras. A incorporação de fatores de redução sugeridos pelo Eurocódigo 5 (Parte 1-2) [6] garantiu a precisão dos resultados em aplicações práticas [63].

2.5. Análise crítica da revisão bibliográfica

No presente subcapítulo é analisada a revisão bibliográfica efetuada. De forma a realizar uma revisão bibliográfica robusta e alinhada com o estado da arte, foram identificados e analisados artigos recentes e relevantes sobre o tema em questão. Para tal, recorreu-se ao uso do *VOSviewer*, uma ferramenta de construção e análise de redes bibliométricas.

Como ponto de partida, foi realizada uma pesquisa na base de dados *Web of Science*, devido à sua abrangência e qualidade no repositório de artigos científicos. Utilizaram-se as palavras-chave “*Fire*” and “*Timber*” or “*Thermomechanical*” and “*Timber*”, com um filtro temporal para publicações a partir de 2021. Esta abordagem permitiu obter os 500 registos mais relevantes, os quais foram exportados para uma análise detalhada com o *VOSviewer*.

A análise bibliométrica permite identificar os autores mais citados em artigos recentes que abordam as palavras-chave em questão. Na Figura 19 apresenta-se o mapa de citações resultante da análise realizada com o *VOSviewer*. Este mapa evidencia a relevância de alguns autores citados na presente revisão bibliográfica, incluindo A. Bartlett, A. Buchanan, A. Frangi,

Como complemento à pesquisa realizada, foram analisadas as variantes ortográficas “*thermo-mechanical*” e “*thermo mechanical*”, para se verificar a forma mais adequada e aceite na literatura científica. Verificou-se que a variante com espaço (“*thermo mechanical*”) praticamente não é utilizada. Com hífen (“*thermo-mechanical*”) ocorre, geralmente em contextos, onde se pretende dar ênfase entre a independência dos aspectos térmicos e mecânicos do processo, utilizado como substantivo [65]. A forma mais comum é “*thermomechanical*”, sem hífen e sem espaço, surgindo em diversas fontes, incluindo dicionários técnicos [66], [67], como um adjetivo que descreve processos que envolvem simultaneamente as ações térmicas e mecânicas. Na base de dados *Web of Science* a palavra-chave “*thermo-mechanical*”, não regista diferenças significativas aos resultados já obtidos para “*thermomechanical*”.

A presente revisão bibliográfica permitiu a consolidação de diversos temas associados às ligações em madeira, em particular o seu comportamento térmico e mecânico, assim como a análise dos diferentes tipos de proteção contra o fogo, com especial foco no gesso. Este estudo procurou abordar desde os fundamentos regulamentares e as propriedades dos materiais envolvidos até às metodologias de análise aplicadas, organizando as temáticas de forma a encadear os tópicos de maneira lógica e complementar.

Verifica-se um aumento significativo na utilização da madeira em soluções construtivas, especialmente no contexto da sustentabilidade e da mitigação de emissões de carbono. Esta tendência confirma a necessidade de estudar o comportamento de ligações em madeira, particularmente sob condições de incêndio. Apesar de ser um material renovável e com propriedades favoráveis, como a formação da camada de carvão que contribui para a resistência ao fogo, a variabilidade das condições de incêndio e as diferentes configurações construtivas apresentam desafios na padronização do seu desempenho.

Neste contexto, o gesso mostrou ser uma solução eficiente e amplamente aplicada como proteção passiva, destacando-se pelo seu papel na melhoria da resistência ao fogo das ligações. Por outro lado, a análise numérica manifesta-se como uma ferramenta essencial para avaliar diferentes soluções construtivas, com ou sem materiais adicionais de proteção. Apesar da sua complexidade, devido à interação de materiais com comportamentos não lineares e à natureza transiente da ação térmica, os modelos numéricos oferecem um método promissor para prever a degradação dos elementos em madeira e correlacionar com os critérios de resistência ao fogo.

Com o desenvolvimento da dissertação, pretende-se efetuar um estudo sobre ligações em madeira, com cavilhas em aço, considerando diferentes configurações, com e sem proteção ao fogo. As soluções serão validadas através de modelos numéricos e equações analíticas.

Os modelos apresentados na revisão bibliográfica abordam predominantemente análises térmicas e mecânicas de forma separada, evidenciando a lacuna na investigação conjunta do comportamento termomecânico de ligações em madeira. Embora existam estudos sobre a resistência ao fogo e a influência de ações mecânicas, a interação simultânea dessas ações e das variáveis envolvidas em ligações protegidas com placas de gesso, ainda é limitada.

Outro aspeto identificado foi a relativa falta de estudos que investiguem as diferentes configurações de proteção passiva ao fogo, particularmente considerando variações nas

propriedades das placas de gesso e as suas interações com diferentes tipos de madeira e elementos estruturais.

As lacunas apresentadas anteriormente, destacam a importância em aprofundar as análises termomecânicas de ligações, bem como explorar soluções inovadoras e sustentáveis para a proteção contra o fogo. Este é o motivo principal para o desenvolvimento subsequente deste trabalho de investigação. Compreender melhor essas limitações contribuirá para o desenvolvimento de soluções mais robustas e confiáveis, promovendo uma maior segurança e viabilidade no uso de ligações em madeira em projetos estruturais.

Revisão Bibliográfica

3. Desenvolvimento

3.1. Validação

No presente capítulo procedeu-se à validação do modelo numérico utilizado, com o recurso do programa de elementos finitos *ANSYS Student*, através da comparação de resultados experimentais e numéricos apresentados por M. Audebert, et al [5] em 2013. Os autores referidos analisaram modelos numéricos de duas ligações em madeira com o programa *Msc Marc*, à temperatura ambiente e a altas temperaturas, submetidas a corte duplo, comparando com resultados obtidos em ensaios experimentais entre 1999 e 2003.

Neste capítulo de validação, inicialmente é realizada uma análise térmica em regime transiente à ligação “Connection B_2003”, submetendo-a a condições de incêndio, como descrito no artigo [5]. De seguida é efetuada uma análise estrutural, com carga mecânica incremental, permitindo obter a resistência máxima que leva à rotura da ligação. Os resultados obtidos são comparados com os resultados apresentados pelos autores, validando assim o modelo numérico. A geometria da ligação e todas as propriedades mecânicas são de acordo com a “Connection B_2003”, como apresentado por M. Audebert, et al [5]. Para a madeira foi considerada a classe de resistência GL24h, pois era a que mais se assemelhava com as propriedades apresentadas, cuja massa volúmica (ρ_k) é de 464 kg/m³. Para as cavilhas, foram consideradas as propriedades do aço S275, apresentadas no Eurocódigo 3 (parte 1-1) [39]. Devido à simetria da ligação, a mesma foi modelada em um quarto da sua geometria, utilizando elementos finitos hexaédricos de 20 nós, tal como referido em [5].

3.1.1. Modelo Térmico

Para a validação do modelo, foi efetuada uma simulação térmica, utilizando o elemento finito “Brick 8node 278” (SOLID278) do programa *ANSYS Student*, com 8 nós e um 1 grau de liberdade, correspondente ao cálculo da temperatura, por nó. A solitação térmica das ligações estudadas por M. Audebert, et al [5] é aplicada nas superfícies superior e posterior, correspondente à curva de incêndio padrão ISO 834 [9], descrita na equação (2). As superfícies da ligação pertencentes aos planos de simetria foram consideradas adiabáticas, o contacto entre os vários elementos da ligação foi assumido como perfeito, utilizando uma malha contínua nas interfaces entre elementos. Na Figura 21 apresenta-se a malha de elementos finitos, solitações térmicas e condições fronteiras impostas no modelo desenvolvido.

Desenvolvimento

A temperatura inicial é de 20°C, os autores [5] apresentaram resultados para exposições ao fogo de 30 minutos, incluindo distribuições de temperatura para 50 minutos, de forma a expandir a análise comparativa, o para o modelo desenvolvido, foi aplicada uma duração de 60 minutos (3600 s).

O valor de coeficiente de convecção é igual a 25 W/m²K, e a emissividade é igual a 1, de acordo com o Eurocódigo 1 (parte 1-2) [9].

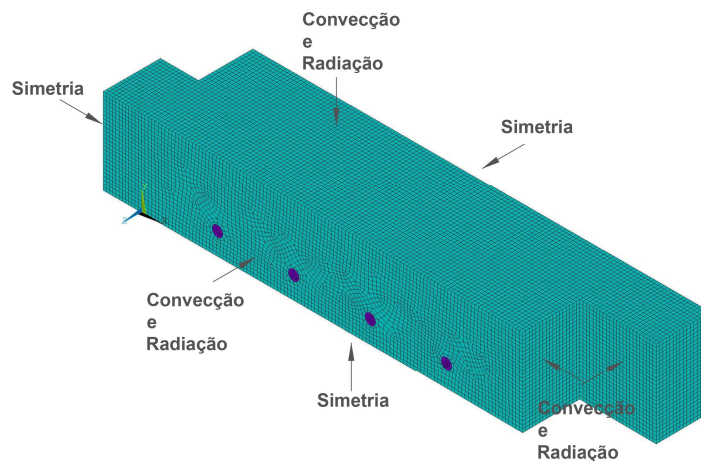


Figura 21 - Representação da malha de elementos finitos e condições fronteiras, para a análise térmica.

De forma a validar o modelo térmico, são obtidos vários resultados da simulação desenvolvida, comparando com aqueles obtidos por M. Audebert, et al. [5]. Na Figura 22 apresenta-se o gradiente de temperatura em ¼ da ligação, a) vista pelo lado interior em um dos planos de simetria, e b) na secção de corte, ao nível de uma cavilha. Os campos de temperatura apresentam-se para 30 min (1800 s) de exposição ao fogo na Figura 22, e na Figura 23 para 60 min (3600 s).

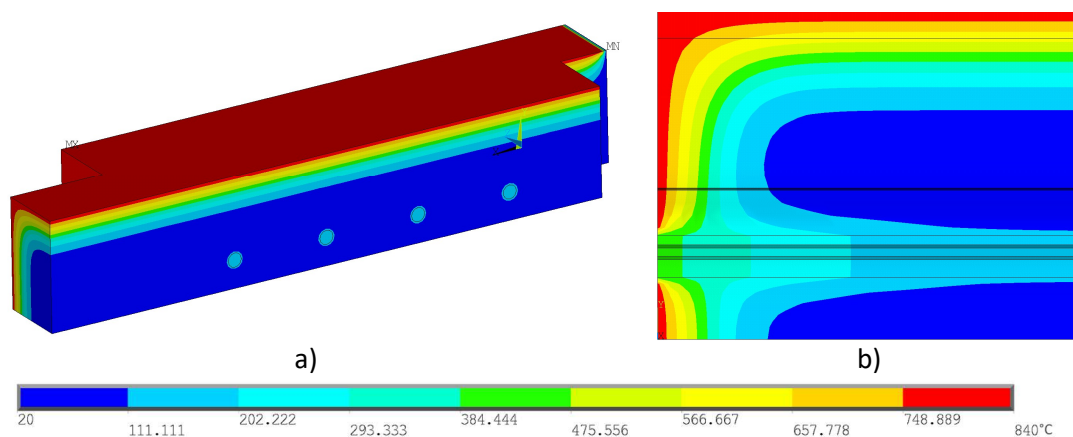


Figura 22 – Gradiente de temperatura do modelo térmico, para 1800s de exposição ao fogo a) do quarto de ligação (interior) e b) secção ao nível da cavilha.

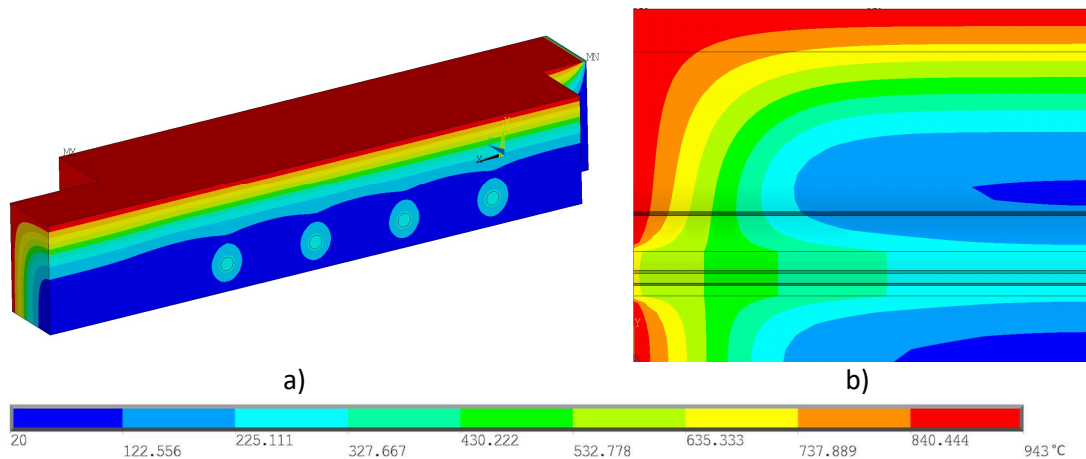


Figura 23 – Gradiente de temperatura do modelo térmico, para 3600s de exposição ao fogo a) do quarto de ligação (interior) e b) secção ao nível da cavilha.

Como esperado, nas Figura 22 e Figura 23, observa-se que, devido ao desenvolvimento da camada de carvão isolante, o interior dos elementos de madeira se mantém a temperaturas inferiores, quando comparado às cavilhas. Próximo das cavilhas, as temperaturas são maiores, devido à transferência de calor do aço para a madeira.

Nos modelos experimentais, as temperaturas foram obtidas através de quatro termopares colocados no interior da ligação de madeira, a nível de meia altura, dois deles localizados no membro central (TC1_Exp e TC2_Exp) e os outros dois no membro lateral (TC3_Exp e TC4_Exp). Os autores do trabalho experimental [5] apresentam ainda os valores registados por esses termopares, tais como as temperaturas de nós do modelo térmico, em posições geométricas equivalentes num modelo numérico (TC1_Num, TC2_Num, TC3_Num e TC4_Num). O mesmo estudo foi efetuado com o atual modelo térmico desenvolvido (TC1, TC2, TC3 e TC4). Na Figura 24, são apresentados os respetivos perfis de temperatura em função do tempo.

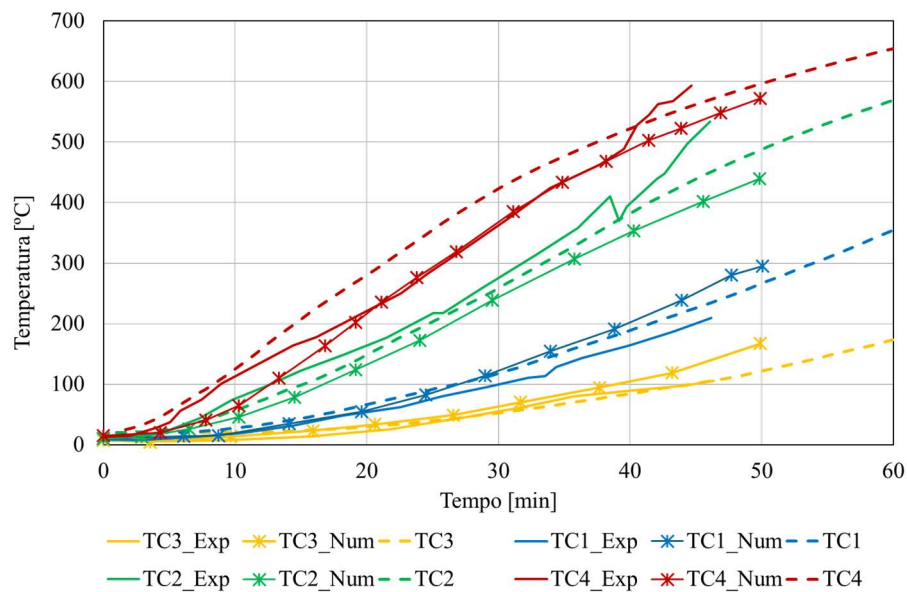


Figura 24 – Comparação da distribuição de temperaturas apresentadas por M. Audebert, et al. [5] e obtidas pelo modelo desenvolvido.

Desenvolvimento

Verifica-se uma aproximação satisfatória dos resultados, os gradientes da Figura 22 são similares aos apresentados pelos autores [5], e a temperatura dos nós na Figura 24 segue uma distribuição próxima dos apresentados por M. Audebert, et al. [5]. Algumas das diferenças verificadas podem ser justificadas pela dificuldade na precisão dos pontos a medir. Os resultados similares indicam que a metodologia foi aplicada de forma correta, validando assim a análise térmica a desenvolver na presente dissertação.

3.1.2. Modelo Mecânico

Para a elaboração do modelo mecânico, e de forma a comparar com os resultados de M. Audebert, et al. [5], é utilizada a mesma malha de elementos finitos que no modelo térmico. O elemento finito é substituído para um elemento estrutural, agora com a designação "SOLID185". As superfícies em contacto do modelo, nomeadamente entre os elementos de madeira e as cavilhas, são modeladas com elementos finitos de contacto, os elementos "TARGE170" e "CONTA174", cujo coeficiente de fricção considerado foi 0,3. São aplicadas as condições fronteira de simetria, e é aplicada uma carga incremental a variar de 0 a 100 MPa, diretamente proporcional ao tempo, de 0 a 100 segundos.

Na Figura 25 apresenta-se a malha de elementos finitos e as respetivas condições de fronteira, considerando as superfícies de simetria e de imposição de carga.

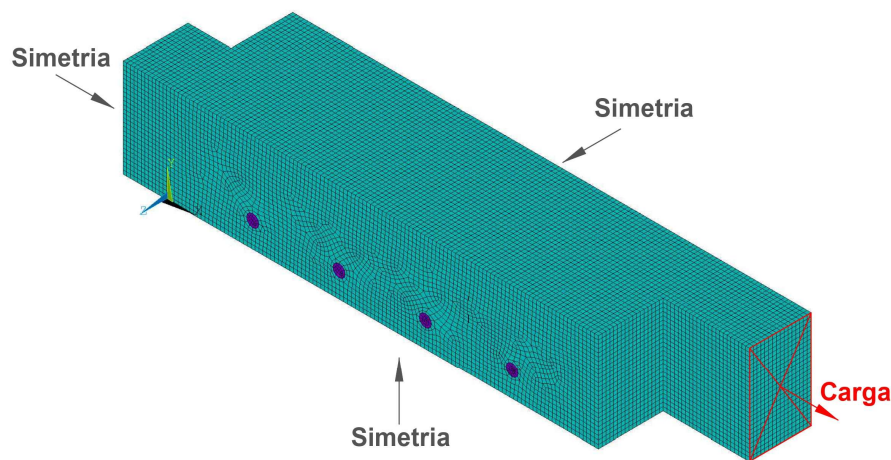


Figura 25 - Representação da malha de elementos finitos e condições de fronteira.

Na Figura 26 apresenta-se o gradiente de tensões equivalentes de Von Mises a) nos elementos de madeira e b) nas cavilhas de aço.

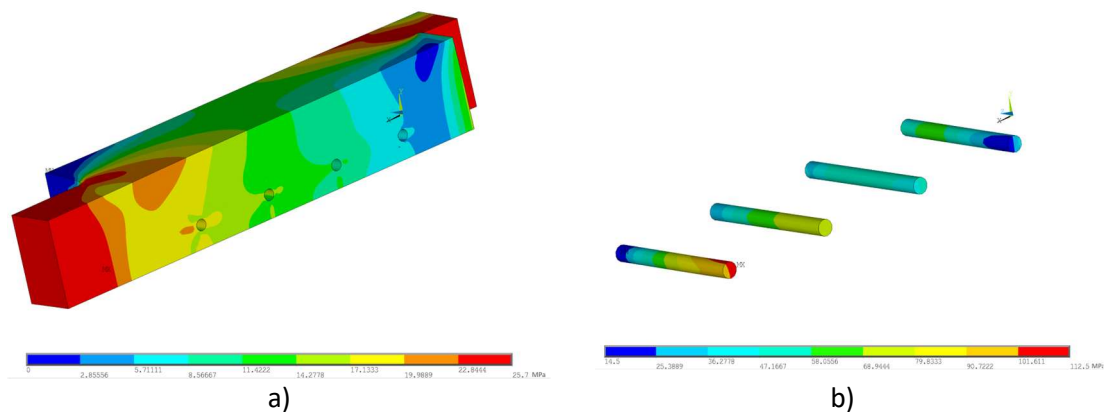


Figura 26 – Gradiente de tensão do modelo mecânico, à temperatura ambiente a) elementos de madeira e b) cavilhas.

As tensões na madeira variam de 0 a 25,7 MPa e no aço entre 14,5 e 112,5 MPa. A rotura ocorre na madeira, pois atinge a tensão de cedência (25,6 MPa), enquanto os elementos de aço alcançam aproximadamente metade da tensão de cedência (275 MPa).

Com o resultado da pressão máxima aplicada no quarto de ligação, 25,5 MPa, é calculada a carga máxima que a ligação resiste à temperatura ambiente ($N_{u,c,Tamb}$), e comparada com os valores apresentados pelos autores [5].

Na Tabela 7 são apresentados os resultados da carga resistente da ligação em madeira “Connection B_2003”, à temperatura ambiente. $N_{u,exp}$ é o resultado do ensaio experimental, e $N_{u,th,J}$ e $N_{u,th,EC5}$ são os valores teóricos esperados, utilizando as expressões da teoria de Johansen e do Eurocódigo 5 (parte 1-1) [7]. Além disso, é apresentado o erro relativo entre os valores apresentadas pelos autores [5], e a força obtida pelo atual modelo mecânico desenvolvido, em relação ao valor obtido.

Tabela 7 – Comparação dos resultados da carga resistente à temperatura ambiente

	$N_{u,c,Tamb}$	$N_{u,exp}$	$N_{u,th,J}$	$N_{u,th,EC5}$
Força [kN]	259,1	269,4	259,7	193,5
Erro relativo		3,98 %	0,23 %	25,32%

Posteriormente, é analisada a capacidade de carga da ligação, para uma situação de fogo. A malha para a análise termomecânica é idêntica à utilizada na análise à temperatura ambiente. Foi imposta uma carga incremental entre 0 e 50 MPa, no intervalo de 0 a 100 s, permitindo a aplicação de menores incrementos de carga, em comparação com o modelo mecânico anterior, para garantir um melhor comportamento na convergência da solução. Além das condições de simetria e da carga mecânica aplicada, são agora impostos os valores de temperatura nodal, para 30 min (1800 s) de exposição ao fogo.

Inicialmente, foram efetuadas diferentes análises para obtenção da presente solução. As análises iniciais não permitiam que a solução convergisse para os resultados esperados, uma vez que apresentavam deformação excessiva num vértice da ligação, onde é aplicada a carga mecânica. De forma a contornar o problema, e a garantir que a sollicitação mecânica é aplicada

Desenvolvimento

na zona não carbonizada da madeira, foi colocada uma chapa de aço fina na superfície de aplicação da carga. Este elemento adicional, foi só para permitir uma transferência de carga uniforme na ligação, tendo sido a mesma colocada na área mais resistente da madeira. Na Figura 27 é representada a malha de elementos finitos da ligação, com a chapa de aço adicional, e as condições de fronteira.

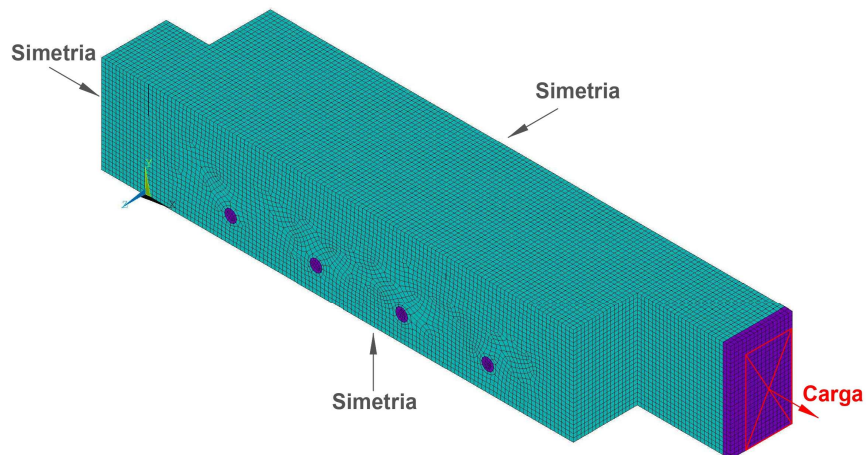


Figura 27 - Representação da malha de elementos finitos e condições de fronteira, para a análise termomecânica.

Na Figura 28 apresenta-se o gradiente de tensões equivalentes de Von Mises nos elementos de madeira.

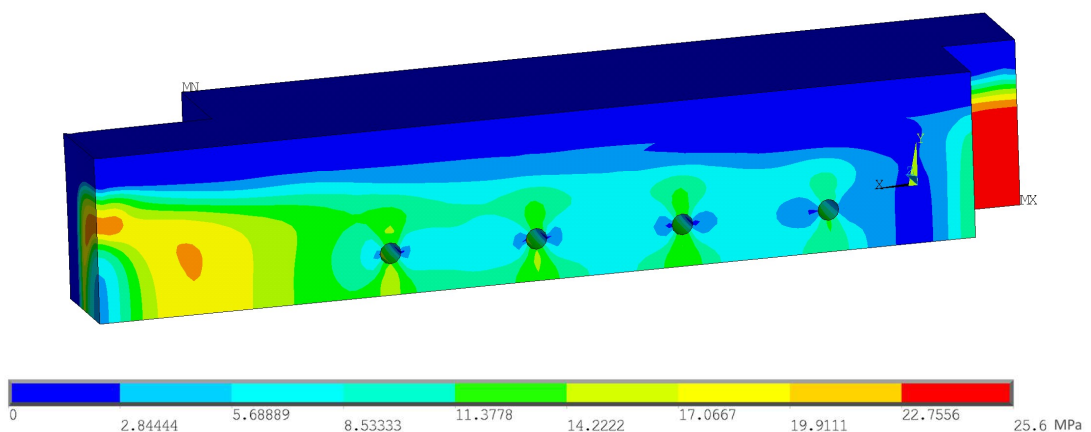


Figura 28 – Gradiente de tensão dos elementos de madeira do modelo termomecânico, para 30 min de exposição ao fogo.

A pressão máxima aplicada é igual a 11,75 MPa, o que equivale a uma capacidade de carga, para 30 min de exposição ao fogo ($N_{u,c,fi30min}$) de 77,8 kN, aproximadamente 30% da capacidade de carga à temperatura ambiente.

Na Tabela 8 são apresentados os tempos de resistência ao fogo apresentados por M. Audebert, et al. [5], pelo seu modelo numérico ($t_{fi30,c,A}$), pelos ensaios experimentais ($t_{fi30,exp}$), e de acordo com o Eurocódigo 5 (parte 1-2) [6] ($t_{fi30,EC5}$), tal como o erro relativo entre estes e o tempo de resistência obtido pelo modelo numérico desenvolvido ($t_{fi30,c}$).

Tabela 8 – Comparação dos resultados para o tempo de resistência ao fogo, para 30% da capacidade de carga à temperatura ambiente

	$t_{fi30,c}$	$t_{fi30,c,A}$	$t_{fi30,exp}$	$t_{fi30,EC5}$
Tempo de resistência ao fogo [min]	30	35	54	39,2
Erro relativo		1,93 %	9,26 %	3,55 %

Analisando os resultados apresentados, constata-se que o modelo numérico apresenta uma boa aproximação para a capacidade de carga da ligação à temperatura ambiente. Já na análise termomecânica, com carga de 30% da capacidade resistente à temperatura ambiente, o modelo desenvolvido apresentou tempos de resistência ao fogo inferiores aos dos autores [5], mas ainda próximos e dentro de uma margem aceitável.

As diferenças nos resultados podem dever-se às metodologias distintas, seja numérica como experimental. As propriedades dos materiais também foram próximas às utilizadas por M. Audebert, et al. [5]. Na capacidade de carga, à temperatura ambiente, é de notar a diferença entre o valor obtido no presente estudo com o do Eurocódigo 5 (parte 1-1) [7], verificando-se desta forma a natureza conservadora no dimensionamento de ligações.

Importa referir que a análise termomecânica conjuga simultaneamente a evolução térmica das propriedades e a resposta mecânica do material, sendo sensível à definição precisa das propriedades dependentes da temperatura. Adicionalmente, este tipo de análise impõe um esforço computacional mais elevado ao programa de simulação, pela necessidade em resolver um problema não-linear e incremental.

3.2. Dimensionamento das ligações de madeira em corte simples

No presente capítulo, as ligações em estudo são dimensionadas e verificadas com base no método simplificado de cálculo, apresentado no Eurocódigo 5 (Parte 1-1) [7], descrito anteriormente.

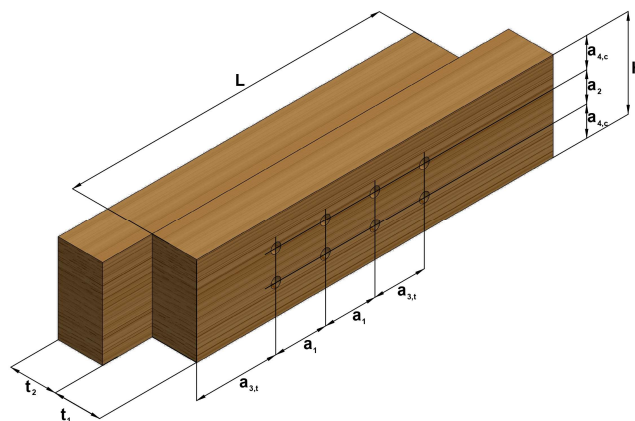


Figura 29 - Ligação madeira-madeira, com parâmetros geométricos.

Desenvolvimento

Para a aplicação do método apresentado foram utilizadas tabelas de projeto, desenvolvidas em Excel, com base nas equações simplificadas do Eurocódigo e ainda validadas com trabalhos anteriores [2]. Foram considerados vários valores para a carga aplicada (10 kN, 15 kN e 20 kN), o diâmetro das cavilhas (6 mm, 8 mm e 10 mm) e diferentes classes de *Glulam* para os membros de madeira da ligação (GL20h, GL24h e GL32h). No APÊNDICE A encontram-se as tabelas de projeto desenvolvidas com base nas variáveis utilizadas. Na Figura 30 apresenta-se a distribuição do número efetivo de cavilhas para as várias ligações estudadas, em função da carga aplicada, da classe de *Glulam* utilizada, e do diâmetro da cavilha.

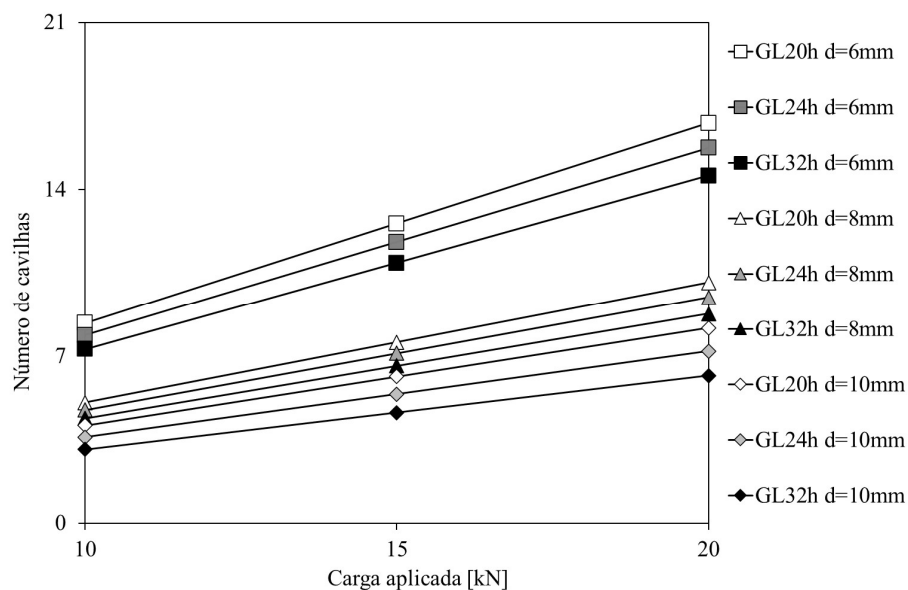


Figura 30 - Número efetivo de cavilhas para ligações madeira-madeira.

Com base nos resultados obtidos, é possível observar que o número de cavilhas é diretamente proporcional à carga aplicada. Como esperado, são necessárias mais cavilhas nas ligações com cavilhas de menor diâmetro, e madeira com menor massa volúmica, devido à menor resistência oferecida à ligação. A variação da classe de *Glulam* tem um efeito menos significativo, em relação às restantes variáveis. Logo, é possível reduzir significativamente o número de cavilhas quando são utilizadas madeiras de alta resistência e cavilhas com maior diâmetro. Comparando com as ligações em madeira, apresentadas por F. Machado [2], as ligações dimensionadas apresentam um ligeiro aumento do número de cavilhas efetivo, particularmente quando são utilizadas cavilhas de menor diâmetro. A proporcionalidade entre o número de cavilhas e a carga aplicada, a massa volúmica e o diâmetro mantêm-se.

Efetuada o dimensionamento à temperatura ambiente, procedeu-se à validação das ligações à ação do fogo, de acordo com o procedimento exposto no Eurocódigo 5 (parte 1-2) [6], e ao dimensionamento das placas de gesso. Todas as ligações verificam os critérios impostos para a imposição da carga de tração sob ação do fogo, com um coeficiente de segurança respetivo de 2,4, aproximadamente. O dimensionamento das placas de gesso tipo A e F, para 60 min de tempo de resistência ao fogo requerido, resultou em espessuras iguais a 23 e 17 mm, respetivamente. No APÊNDICE A encontram-se as respetivas verificações das ligações em madeira.

3.3. Análise por Elementos Finitos

No presente capítulo são descritos os modelos utilizando o método dos elementos finitos, desenvolvidos com base nas ligações dimensionadas, de acordo com o Eurocódigo 5 (parte 1-1) [7]. Entre os diferentes modelos já analisados, será utilizada a ligação com a classe de madeira GL32h, carga imposta de 20 kN, 10 cavilhas de 10 mm de diâmetro, encontrando-se as dimensões da ligação na Figura 31. As ligações protegidas são analisadas com 23 mm de espessura de gesso tipo X, ao longo de toda a área que se considera afetada pela ação do fogo.

As propriedades para a análise térmica, da madeira e do aço, são introduzidas no programa através de ficheiros de texto com código em linguagem *ANSYS Parametric Design Language* (APDL), apresentado no APÊNDICE B. As propriedades do gesso, e as restantes propriedades mecânicas da madeira e do aço, são introduzidas diretamente no programa, na interface de modelos de materiais.

Os modelos numéricos desenvolvidos foram realizados com recurso do programa *ANSYS Student*, aplicado na resolução de uma grande variedade de problemas multifísicos. Este programa é apropriado para resolver o problema transiente e não linear apresentado na presente dissertação. De forma a convergir para uma solução numérica, o *ANSYS Student* utiliza o método de Newton-Raphson, onde, os critérios de convergência se baseiam no cálculo do fluxo de calor, e dos deslocamentos, para as análises térmica e estrutural, respetivamente.

O método de Newton-Raphson é empregue quando se pretende encontrar a raiz de uma função não linear com uma variável. O processo de iteração inicia-se com uma estimativa para a solução. A partir desse ponto, é calculada a reta tangente à função, utilizando a derivada. A interseção dessa reta com o eixo das abcissas fornece uma nova aproximação, repetindo-se o procedimento até que a solução convirja [68].

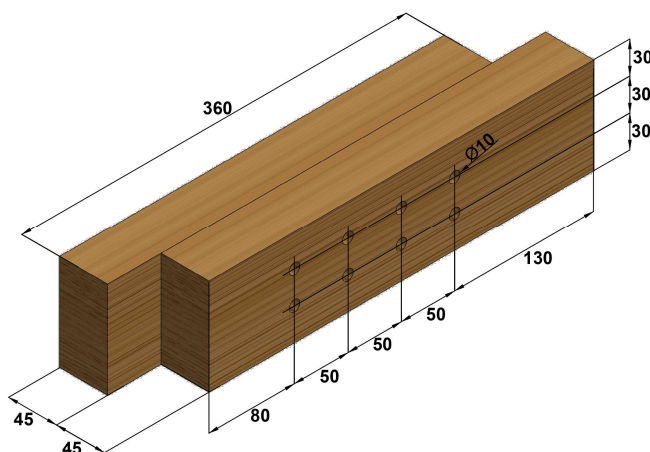


Figura 31 - Dimensões da ligação em madeira a estudar.

Na Figura 32 apresentam-se as malhas de elementos finitos das ligações estudadas na presente dissertação a) sem proteção e b) com proteção. A dimensão da aresta de cada elemento é 6 mm, em função do tamanho mínimo permitido no modelo com a placa de gesso.

Desenvolvimento

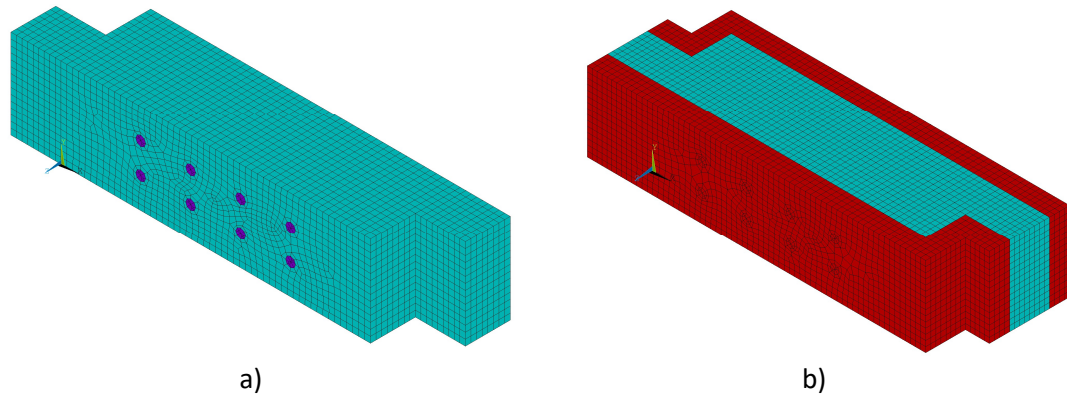


Figura 32 – Malha de elementos das ligações em estudo a) sem proteção e b) com proteção.

A análise de elementos finitos é composta por duas fases distintas. Na primeira realizou-se a análise térmica, onde é criado o modelo da ligação, gerada a malha, e a ligação é submetida ao fogo. Na segunda fase, utilizando o mesmo modelo, são removidas as cargas térmicas e é aplicada a solicitação à tração para avaliar o comportamento mecânico à temperatura ambiente; de seguida, é imposto o campo de temperaturas correspondente a um instante específico da análise térmica, que representa o tempo de exposição ao fogo, permitindo assim estudar o seu comportamento a altas temperaturas.

A malha utilizada no estudo térmico é idêntica à utilizada posteriormente, na análise termomecânica, sendo necessário utilizar elementos com o mesmo número de nós, de forma a existir uma imposição nodal entre os modelos. O processo de análise numérica encontra-se resumido no fluxograma apresentado na Figura 33.

Simulação Numérica em *Ansys Student*

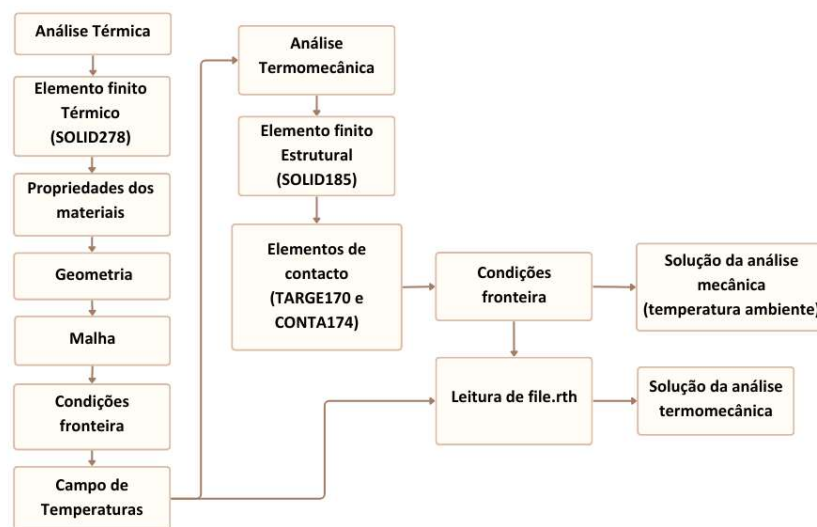


Figura 33 – Fluxograma da simulação numérica.

3.3.1. Análise Térmica

De forma a analisar o comportamento das ligações a altas temperaturas, é necessário determinar as temperaturas nodais para cada instante de tempo. A ação do fogo traduz-se através das condições fronteiras de convecção e radiação, aplicadas nas superfícies laterais da ligação, encontrando-se as restantes adiabáticas, como se observa na Figura 34. A curva temperatura-tempo imposta corresponde à curva nominal de incêndio padrão ISO 834 [9], introduzida no *ANSYS Student* através de código em APDL, apresentado no APÊNDICE B. O coeficiente de convecção é igual a $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ e a emissividade é igual a 1, de acordo com o Eurocódigo 1 (parte 1-2) [9]. A temperatura inicial do modelo é igual a 20°C . É utilizado o elemento finito "Brick 8node 278" (SOLID278), com 8 nós e um 1 grau de liberdade, correspondente ao cálculo da temperatura, por nó. Nesta fase, o contacto entre elementos é considerado como perfeito, utilizando uma malha contínua nas interfaces entre elementos.

A análise é realizada em regime transiente, impondo um incremento de tempo de 60 s, para uma duração total de 3600 s (60 min). Para os critérios de convergência, no cálculo do fluxo de calor, é considerada uma tolerância absoluta de 0,9 e um valor de referência mínimo de 1.

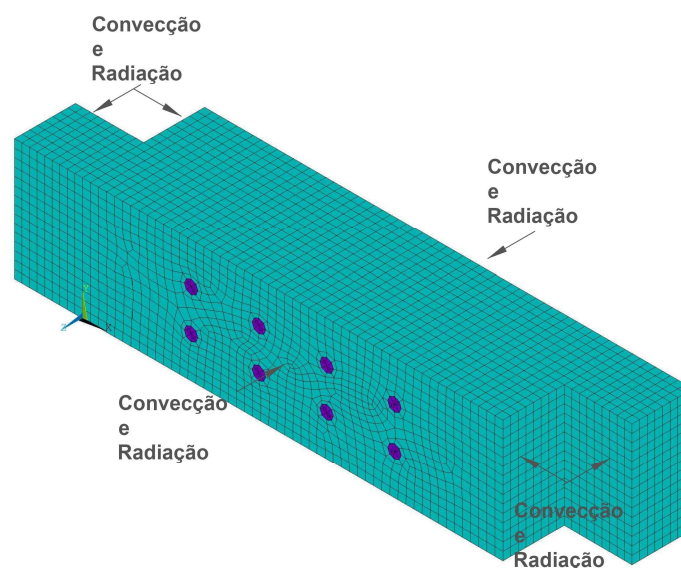


Figura 34 - Representação da malha de elementos finitos e condições de fronteira, para a análise térmica.

Com a solução desenvolvida, é selecionado um plano de corte ao nível de duas cavilhas, de forma a analisar a transferência de calor no interior da ligação. São ainda selecionados alguns nós específicos no plano de corte para a obtenção da evolução de temperatura, Figura 35. O nó específico na superfície não exposta ao fogo é designado por S1, no exterior da cavilha por S2, no interior da cavilha por S3 e na superfície exposta ao fogo definiu-se por S4, para a ligação sem proteção a). Na ligação protegida, em b), os nós G1, G2, G3 e G4, correspondem aos mesmos pontos para a ligação protegida.

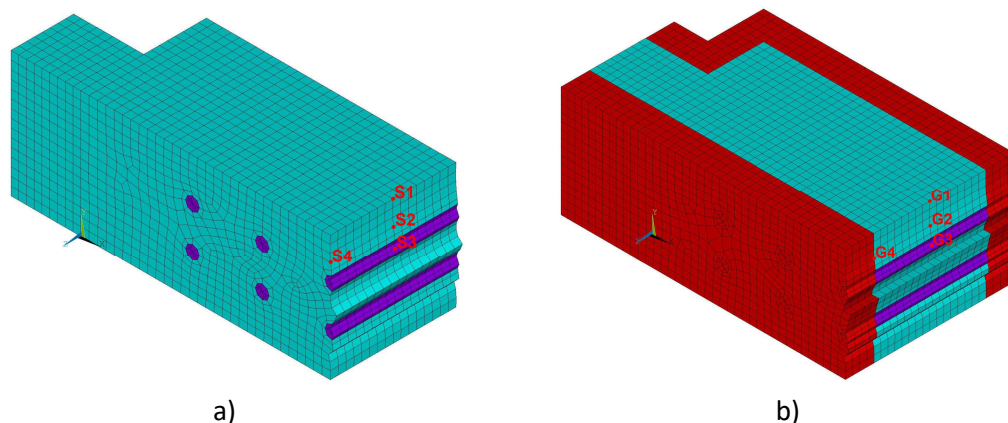


Figura 35 – Planos de corte e nós para obtenção de resultados na ligação a) sem proteção e b) com proteção.

3.3.2. Análise Termomecânica

A análise termodinâmica permite avaliar a capacidade de carga da ligação, à temperatura ambiente e a altas temperaturas, aplicando uma sollicitação mecânica no modelo desenvolvido anteriormente. O modelo de elementos finitos é o mesmo utilizado na análise térmica, sendo que as sollicitações impostas na análise térmica são previamente retiradas e o elemento finito térmico é convertido num elemento estrutural. Nesta análise, utiliza-se o elemento finito “SOLID185”, com 8 nós e 3 graus de liberdade, correspondente ao cálculo dos deslocamentos nos eixos x, y e z. São também consideradas as superfícies em contacto dos componentes, entre os elementos de madeira e as cavilhas, utilizando elementos finitos de contacto, “TARGE170” e “CONTA174”, com um coeficiente de fricção de 0,3.

Numa das extremidades da ligação é imposta a carga de tração incremental, a variar entre 0 e 100 MPa, diretamente proporcional ao tempo, de 0 a 100 s. A superfície oposta é considerada fixa, em que os deslocamentos nas 3 direções são nulos. De forma a evitar possíveis efeitos de flexão da ligação, os deslocamentos em z na superfície onde é aplicada a carga são mantidos nulos. Como se observa na Figura 36, em ambos os modelos, a) para a ligação não protegida e b) protegida, a pressão incremental é somente aplicada no elemento de madeira, sendo que os deslocamentos abrangem as áreas nas placas de gesso pertencentes ao mesmo plano.

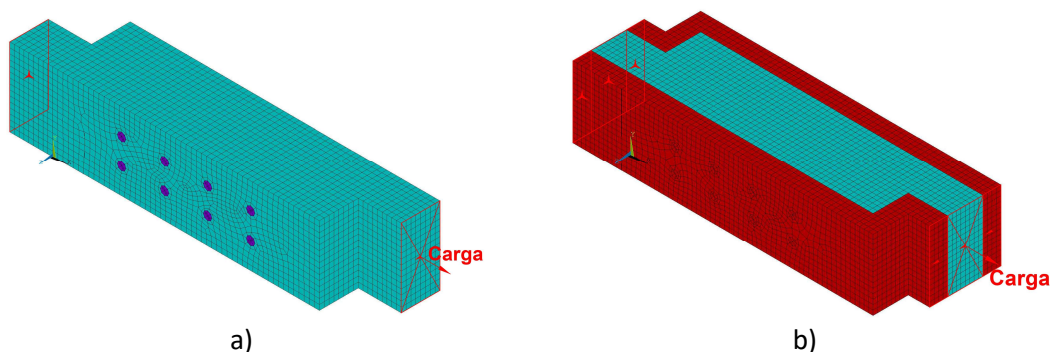


Figura 36 – Representação da malha e com condições fronteira na ligação a) sem proteção e b) com proteção.

Na análise efetuada anteriormente, para a validação da metodologia, verificou-se que aplicar a carga diretamente na madeira, na análise termomecânica, origina deformações excessivas na zona carbonizada, impedindo a convergência da solução. De forma a garantir um melhor comportamento na convergência, a superfície de aplicação da carga é reduzida, sendo colocada também uma chapa de aço fina na superfície, assegurando assim, uma transferência de carga uniforme na área resistente da madeira. Além disso, a carga varia entre 0 e 50 MPa, permitindo a aplicação de menores incrementos de carga. Para modelar o comportamento da ligação num tempo determinado de exposição ao fogo, é imposto o campo de temperaturas, previamente já calculado, através do ficheiro de resultados com as temperaturas dos nós (file.rth).

A análise é realizada em regime transiente, para uma duração de 100 s. Na análise mecânica à temperatura ambiente, foi imposto um incremento de tempo de 6 s, para os critérios de convergência, no cálculo dos deslocamentos, sendo considerada uma tolerância absoluta de 0,001 e um valor de referência mínimo de 1. Na análise termomecânica a altas temperaturas, foi imposto um incremento de tempo de 2 s, nos critérios de convergência, considerando uma tolerância absoluta de 0,9 e um valor de referência mínimo de 1.

Desenvolvimento

4. Resultados e Discussão

No presente capítulo são apresentados e analisados os resultados das simulações efetuadas para as ligações em madeira, protegidas e não protegidas com placas de gesso.

Relativamente à análise térmica, são analisados os campos de temperatura para vários instantes correspondentes ao tempo de exposição ao fogo e é avaliada a evolução de temperatura para os pontos identificados anteriormente no interior da ligação. Além disso, é analisada a carbonização e a sua velocidade para vários instantes.

Para a análise termomecânica, é avaliada a capacidade de carga da ligação, com e sem influência da carga térmica. Os campos de tensões equivalentes também são analisados.

4.1. Resultados de Análise Térmica

4.1.1. Distribuição de temperaturas

O gráfico da evolução da temperatura em função do tempo de exposição ao fogo, dos vários nós no interior da ligação, indicados na Figura 35, apresenta-se na Figura 37.

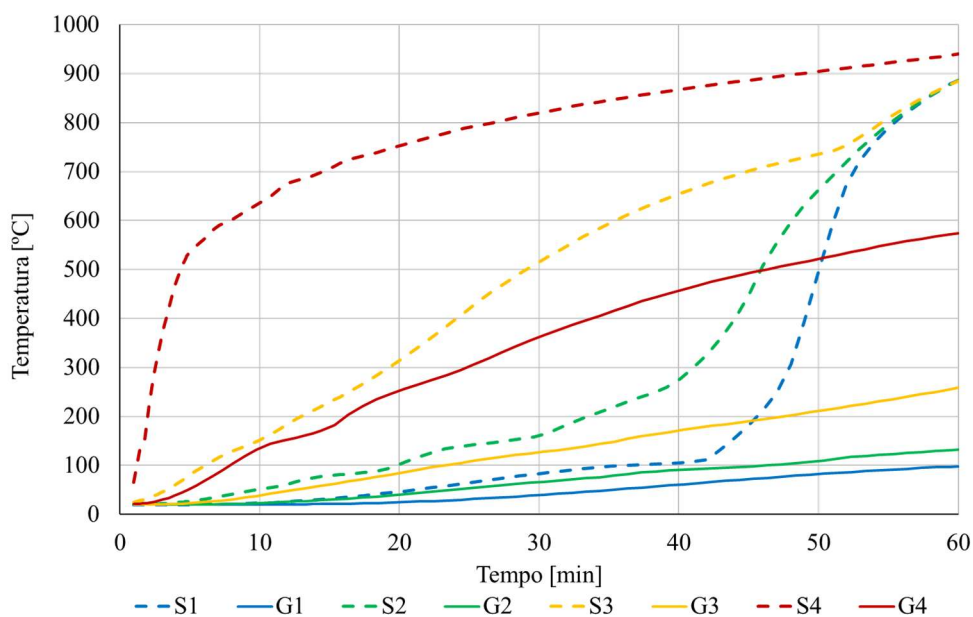


Figura 37 - Temperatura de nós no interior da ligação, em função do tempo de exposição ao fogo.

Resultados e Discussão

Como esperado, observa-se que o interior da cavilha (S3) aumenta de temperatura significativamente mais rápido do que o interior da madeira (S1 e S2), devido à alta condutividade térmica do aço. Este comportamento mantém-se, até, aproximadamente, os 35 minutos, onde os pontos S1 e S2 registam um aumento abrupto de temperatura. A partir dos 55 minutos de exposição ao fogo, S1, S2 e S3 apresentam temperaturas aproximadas.

A partir dos 300°C, inicia-se a carbonização da madeira, que resulta na formação de uma camada isolante à superfície, retardando temporariamente a propagação de calor para o interior. Este efeito é visível na evolução mais gradual da temperatura em S1 e S2. No entanto, com o aumento da temperatura, a degradação térmica da madeira intensifica, conduzindo à fissuração e perda progressiva de material. Este fenómeno traduz-se num aumento significativo da condutividade térmica, especialmente a partir dos 500°C, o que justifica a subida acentuada de temperatura observada a partir dos 35 minutos.

Já nos pontos localizados no interior da madeira da ligação protegida, G1 e G2, a temperatura mantém-se consideravelmente mais baixa ao longo do tempo, não atingindo a temperatura de carbonização ao longo do período de exposição ao fogo analisado. Até cerca dos 35 minutos, observa-se uma evolução semelhante à dos pontos equivalentes da ligação não protegida (S1 e S2), a partir desse momento verifica-se uma divergência significativa, refletindo a eficácia da proteção em gesso, que contribui para manter as temperaturas no interior da madeira mais baixas durante consideravelmente mais tempo.

Nas ligações protegidas, o aço não está diretamente exposto à ação do fogo, o que reduz de forma significativa a transferência de calor para o interior da ligação. Essa diferença é evidente quando comparamos os pontos S3 e G3, localizados no interior da cavilha.

A evolução de temperatura do ponto S4 é quase idêntica à curva nominal de incêndio padrão ISO 834 [9], pois se encontra na superfície da madeira. Por contraste, a evolução da temperatura de G4 apresenta um aumento quase linear ao longo do tempo, este comportamento é justificado pela condutividade térmica constante considerada para o gesso no modelo.

Na Figura 38 apresenta-se o gradiente de temperaturas, para 60 minutos (3600 s) de exposição ao fogo, da ligação sem proteção em estudo, cortada como indicado na Figura 35, de forma a melhor observar a distribuição de temperatura no interior dos elementos, em a) apresenta-se a vista isométrica e em b) a vista do plano de corte. Na Figura 39 apresenta-se o gradiente de temperaturas para a ligação com proteção em gesso.

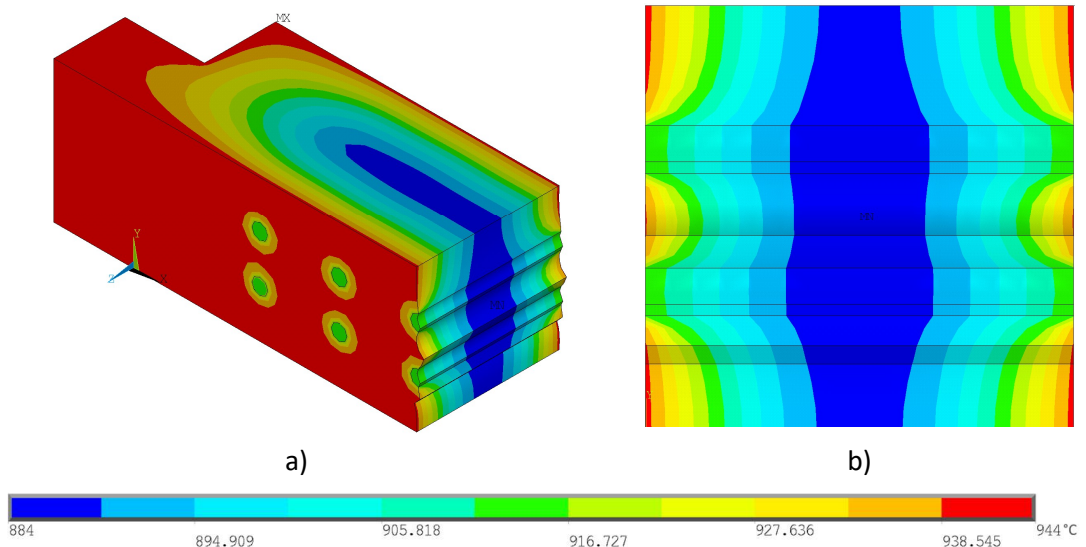


Figura 38 – Gradiente de temperatura do modelo térmico da ligação sem proteção, para 3600s de exposição ao fogo a) vista isométrica e b) vista do plano de corte.

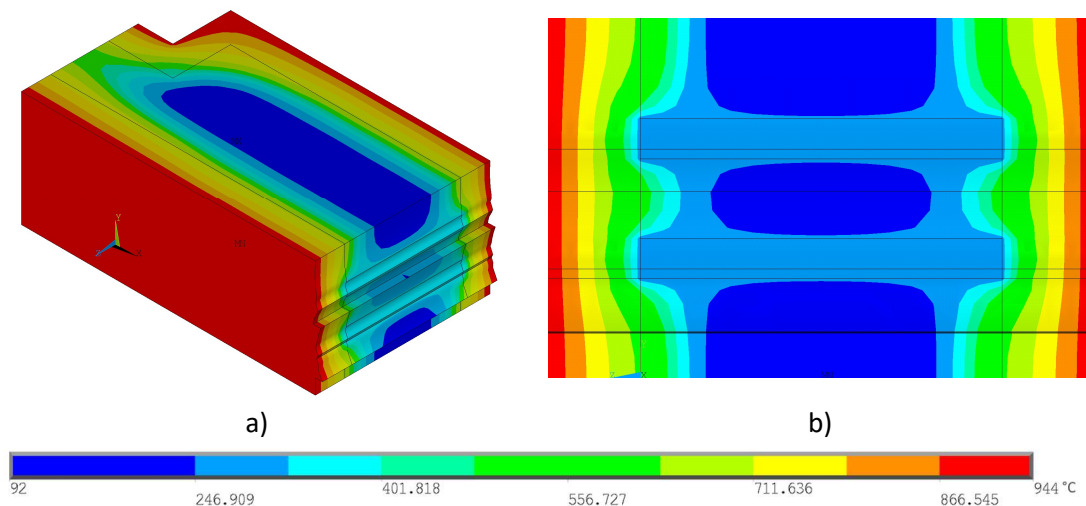


Figura 39 – Gradiente de temperatura do modelo térmico da ligação com proteção, para 3600s de exposição ao fogo a) vista isométrica e b) vista do plano de corte.

Observam-se diferenças significativas entre os gradientes de temperatura no interior das duas ligações. Para 60 min (3600 s) de exposição ao fogo, a temperatura mínima na ligação sem proteção é igual a 884°C, o que indica a carbonização total da madeira e perda completa da sua resistência mecânica. Já, na ligação com proteção, a temperatura mínima registada é 92°C, significativamente inferior. A temperatura máxima registada para ambos os modelos é quase idêntica, aproximadamente 944°C. A temperatura na superfície exposta à ação do fogo depende principalmente da curva de temperatura considerada, neste caso, a curva nominal de incêndio padrão ISO 834 [9], e do instante considerado, isto não se verifica para materiais com elevada condutividade térmica, como o aço, que rapidamente transferem o calor ao longo de todo o elemento.

Na Figura 40 apresenta-se o gradiente de temperaturas, para 30 minutos (1800 s) de exposição ao fogo, em a) da ligação sem proteção e b) com proteção, cortadas em vista isométrica.

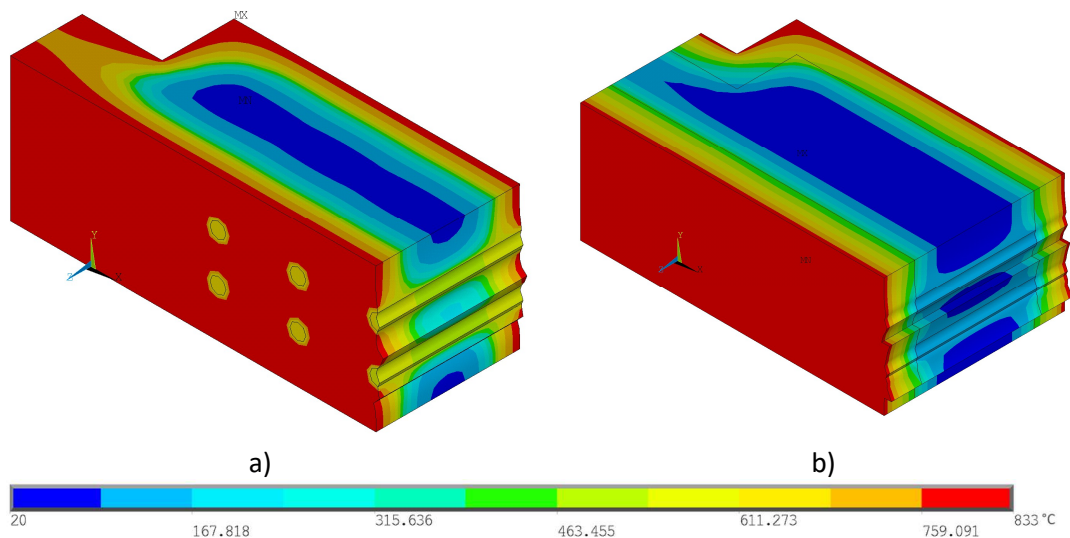


Figura 40 – Gradiente de temperatura do modelo térmico, para 1800s de exposição ao fogo, da ligação a) sem proteção e b) com proteção.

Para 30 min (1800 s) de exposição ao fogo, ambos os modelos apresentam temperaturas no patamar de 20°C a 833°C, mas com distribuições bastante distintas. Na ligação protegida, grande parte da espessura da madeira ainda permanece preservada, a baixas temperaturas, apresentando ainda uma área resistente significativa. Por outro lado, na ligação sem proteção, a carbonização já compromete uma porção substancial da secção, resultando numa redução crítica da sua resistência.

Para os diferentes resultados obtidos, verifica-se que a distribuição de temperaturas ao longo dos elementos de aço é praticamente uniforme, comportamento expectável dada a sua elevada condutividade térmica. Os elementos de madeira apresentam uma variação mais acentuada entre as zonas internas e externas, essa diferença é ainda mais pronunciada nos elementos de gesso. Esta diversidade na distribuição térmica reflete as distintas propriedades de condução de calor de cada material, bem como a forma como essas propriedades evoluem com o aumento da temperatura. Este comportamento destaca a eficácia do gesso como material de proteção passiva contra o fogo, ao limitar significativamente a transmissão de calor para o interior da ligação.

4.1.2. Carbonização

Como apresentado anteriormente nas Figura 37 a Figura 40, a ligação sem proteção encontra-se com consideravelmente mais volume carbonizado do que a ligação protegida. Para melhor ilustrar a progressão da carbonização, a Figura 41 mostra os elementos de madeira isoladamente, visualizados no plano de corte, com a zona carbonizada destacada a cinzento, na ligação sem proteção em a) para 900 s de exposição ao fogo e b) para 1800 s, na ligação com proteção em c) para 1800 s e d) para 3600 s.

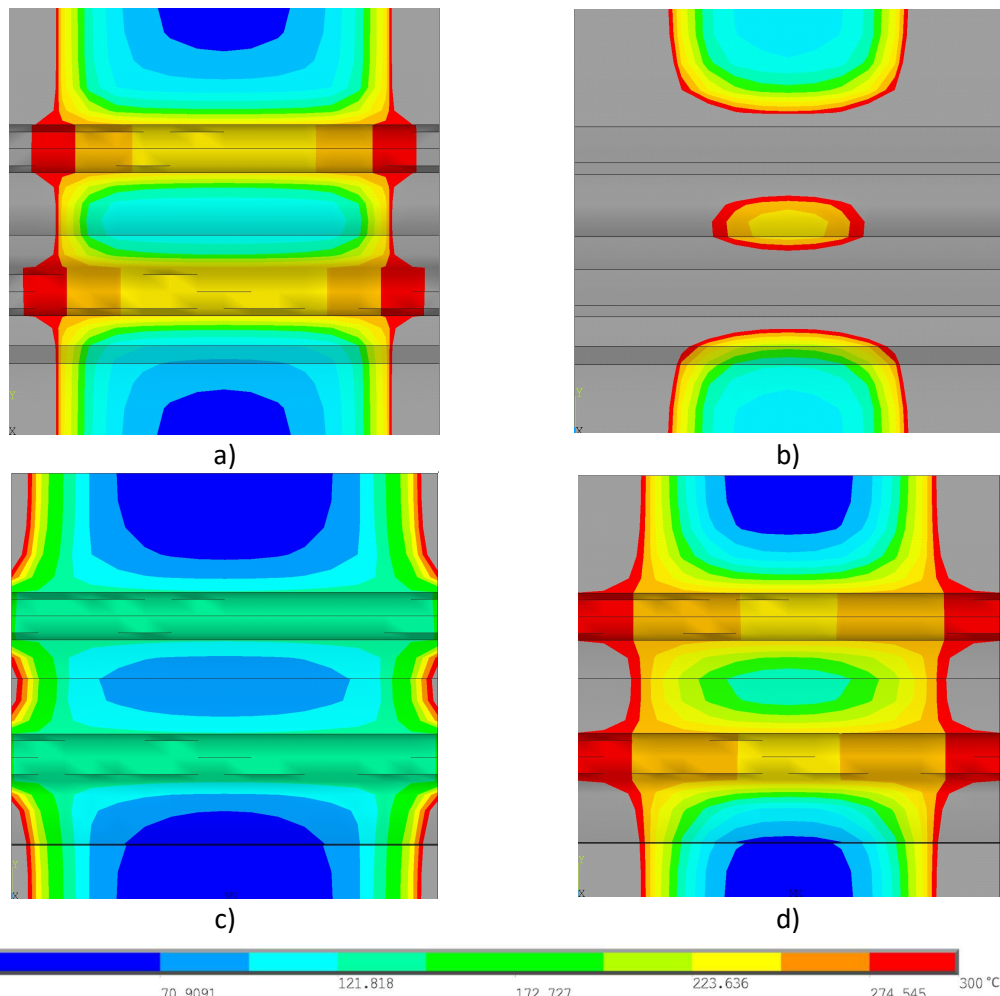


Figura 41 – Carbonização dos elementos de madeira, da ligação a) sem proteção para 900 s e b) 1800 s; c) com proteção para 1800 s e d) 3600 s de exposição ao fogo.

Observam-se grandes diferenças entre as secções apresentadas. Aos 1800 s, a ligação sem proteção encontra-se praticamente toda carbonizada, com uma área resistente muito reduzida, enquanto a ligação protegida apresenta uma quantidade substancial de madeira preservada. Na ligação sem proteção, para 900 s, a cavilha está muito próxima de estar totalmente a 300°C, e observa-se que há uma quantidade grande de madeira no processo de carbonização à sua volta. Nesta fase, a espessura de madeira entre as cavilhas não difere significativamente daquela afastada dos ligadores. Para 1800 s, toda a madeira em torno das cavilhas encontra-se carbonizada, permanecendo uma pequena quantidade de madeira preservada nas áreas mais afastadas. Na ligação com proteção observam-se diferenças mais acentuadas entre a madeira afastada e mais próxima das cavilhas, para os instantes considerados. Esta ligação mantém as cavilhas a temperaturas inferiores a 300°C durante mais tempo, contribuindo para a conservação da madeira adjacente. Para 3600 s de ação do fogo, de forma similar à ligação desprotegida aos 900 s, as cavilhas aproximam-se dos 300°C, observando-se uma grande quantidade de madeira no processo de carbonização no seu redor.

Para melhor avaliar a eficácia da proteção do gesso nos modelos elaborados, foi efetuada a medição da taxa de carbonização direta ($\beta_{0,dc}$), para as ligações não protegidas, com madeira

diretamente exposta à ação do fogo, e da taxa de carbonização indireta ($\beta_{0,ic}$), para as ligações protegidas, onde a madeira não se encontra diretamente exposta. A medição é efetuada no plano de corte apresentado na Figura 35, na direção normal ao plano de contacto entre os elementos de madeira. É realizada a medição da profundidade de carbonização para 2 pontos distintos, no ponto mais distante das cavilhas (p1) e num ponto médio entre duas cavilhas (p2); e em 3 instantes diferentes. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9 – Taxa de carbonização das ligações em estudo

		Instantes	Profundidade	Profundidade média	Taxa de Carbonização
		[s]	[mm]	[mm]	[mm/min]
Ligação s/ proteção	p1	878	10,5	11,25	0,68
		999	11,25		
		1102	12		
	p2	878	10,5	11,75	0,71
		999	11,25		
		1102	13,5		
Ligação c/ proteção	p1	2301	6	9,33	0,20
		2841	10		
		3320	12		
	p2	2301	3,3	6,30	0,13
		2841	6		
		3320	9,6		

Para a ligação sem proteção, os valores resultantes da taxa de carbonização, para ambos os pontos considerados, são muito próximos, mas ligeiramente superiores aos valores estipulados pelo Eurocódigo 5 (parte 1-2) [6], para *Glulam* sob ação do fogo, de 0,65 mm/min. Já na ligação protegida, as taxas de carbonização indiretas são significativamente inferiores, evidenciando a eficácia do gesso na limitação da penetração térmica e, conseqüentemente, na preservação da madeira. Adicionalmente, confirma-se o efeito de atraso da carbonização entre cavilhas, observado na Figura 41. Para o ponto p2, a taxa de carbonização medida é aproximadamente 68% da registada no ponto p1, mais afastado dos ligadores.

F. Machado [2] mediu a taxa de carbonização de um modelo numérico sob as mesmas condições, com as mesmas características geométricas, considerando os instantes 900 s, 1000 s e 1100 s, apresentando um valor de 0,69 mm/min, muito próximo dos valores obtidos para a ligação sem proteção.

E. M. M. Fonseca, et al. [69] avaliaram a taxa de carbonização, em pontos distintos de modelos numéricos de ligações em madeira, considerando a evolução da camada carbonizada até os 900 s. Comparando os valores para a mesma classe de *Glulam*, mas com cavilhas de 8 mm de diâmetro, e uma distância entre cavilhas inferior, a taxa de carbonização para o ponto mais distante das cavilhas é muito próxima à obtida, 0,70 mm/min, já o valor apresentado para o

ponto entre cavilhas é igual a 0,43 mm/min, substancialmente inferior. Estes resultados indicam que o efeito de proteção térmica inicial promovido pelas cavilhas é mais pronunciado em geometrias com ligadores mais pequenos e mais próximos entre si.

Os resultados da Figura 41 e da Tabela 9 sugerem que, para o início da exposição ao fogo, enquanto as cavilhas se encontram a uma temperatura inferior a 300°C, contribuem para a contenção da temperatura local, retardando a carbonização da madeira adjacente. No entanto, ultrapassando esta temperatura, aceleram a carbonização da madeira à sua volta. Este comportamento tem sido descrito em diversos estudos que avaliam ligações com elementos de madeira e aço. Elementos metálicos, como ligadores e placas, tendem a proteger a madeira nas fases iniciais de exposição ao fogo [69], [70], mas, com o aumento da temperatura, tornam-se vias preferenciais para a condução de calor, promovendo uma carbonização mais acelerada no interior da ligação [69], [71].

A perda da capacidade de carga da ligação está diretamente associada à progressão da carbonização, que leva à redução da área resistente, pois o material carbonizado deixa de contribuir estruturalmente. Para evidenciar a evolução da secção resistente ao longo do tempo de exposição ao fogo, a Figura 42 apresenta a madeira não carbonizada dos modelos numéricos, ocultando os elementos cuja temperatura ultrapassa os 300°C, através da introdução do código APDL descrito no APÊNDICE C. Observam-se os resultados da ligação sem proteção em a) para 900 s e b) para 1200 s, da ligação com proteção em c) para 2300 s e d) para 3000 s.

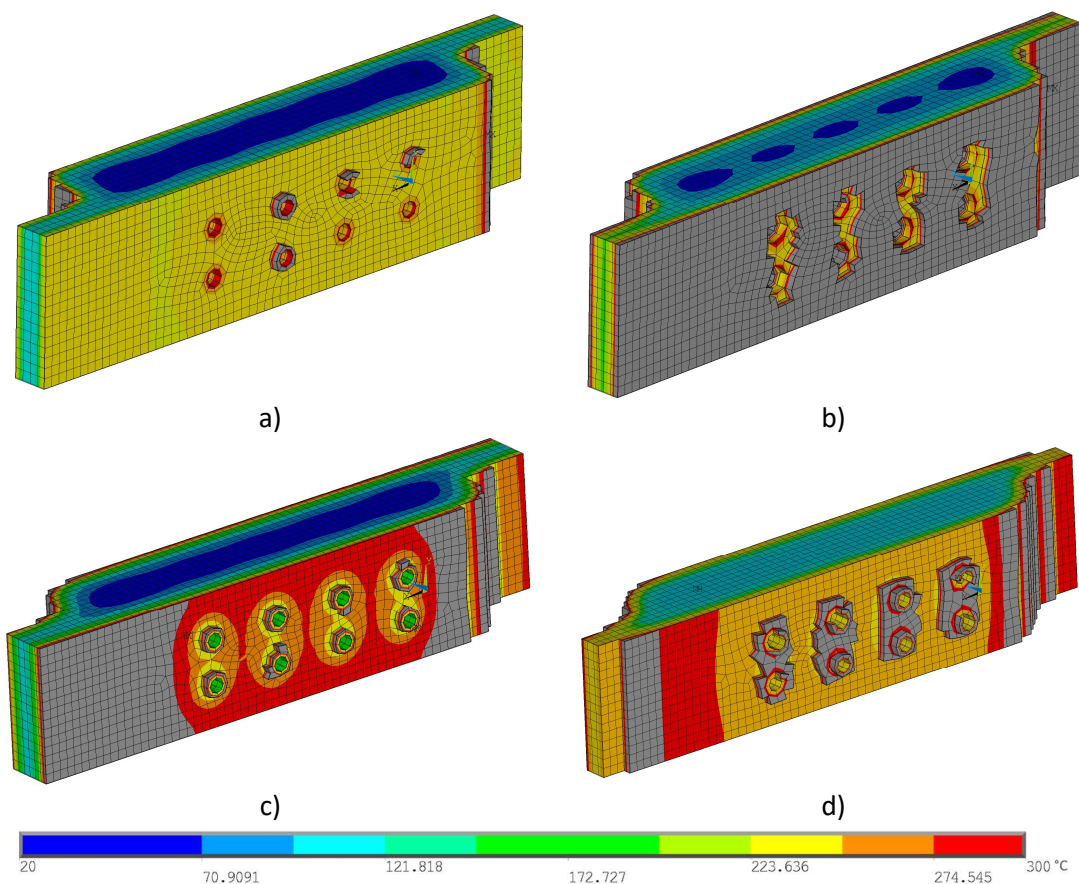


Figura 42 – Madeira não carbonizada, da ligação a) sem proteção para 900 s e b) 1200 s; c) com proteção para 2300 s e d) 3000 s de exposição ao fogo.

Nos instantes representados, verifica-se que a ligação sem proteção sofre uma redução mais rápida da espessura, particularmente na zona dos ligadores. Aos 900 s, ainda subsiste alguma madeira preservada junto às cavilhas, mas, a partir dos 1200 s, esta região encontra-se consideravelmente mais comprometida. Já na ligação com proteção, o efeito isolante do gesso atrasa a degradação nestas zonas, sendo possível observar, mesmo aos 3000 s, a presença de material preservado em torno das cavilhas, apesar da carbonização mais avançada nas zonas periféricas da ligação. A representação apresentada na Figura 42 confirma os resultados previamente discutidos, reforçando a influência do gesso na diminuição da taxa de carbonização, especialmente na madeira em contacto com os ligadores.

4.2. Resultados da Análise Termomecânica

4.2.1. Análise à temperatura ambiente

Na primeira fase, foi avaliada a capacidade resistente da ligação sem proteção, à temperatura ambiente, comparando com a carga resistente obtida através do método simplificado de cálculo, baseado no Eurocódigo 5 (parte 1-1) [7], aplicado anteriormente. Posteriormente é avaliado o efeito da adição das placas de gesso no modelo em estudo.

A ligação em madeira, sem proteção, atingiu o seu limite de cedência para um valor de pressão igual a 17,88 MPa. Na ligação com proteção, a pressão máxima obtida sobe para 25,88 MPa. Na Tabela 10 são apresentados os resultados da força resistente última da ligação em madeira, onde $N_{u,cg,Tamb}$ e $N_{u,cs,Tamb}$ são os resultados obtidos nos modelos em estudo, com e sem proteção, respetivamente, e $N_{u,th,EC5}$ é o valor teórico esperado, utilizando as expressões do Eurocódigo 5 (parte 1-1) [7]. Além disso, é apresentada a diferença relativa, em relação a $N_{u,cs,Tamb}$.

Tabela 10 – Comparação dos resultados da capacidade resistente à temperatura ambiente

	$N_{u,cs,Tamb}$	$N_{u,cg,Tamb}$	$N_{u,th,EC5}$
Força [kN]	72,41	104,81	53,92
Diferença relativa		44,74 %	25,53 %

Como esperado, devido à natureza conservadora do método de cálculo do Eurocódigo 5 (parte 1-1) [7], a resistência mecânica resultante do modelo numérico desenvolvido é superior, apresentando um erro relativo de, aproximadamente, 25,5%, esta diferença é muito próxima daquela apresentada no estudo analisado anteriormente, de M. Audebert, et al [5]. A carga resistente do modelo da ligação com proteção é significativamente superior, com um erro relativo de 44,74%. Este aumento é justificado pelo acréscimo de área da secção transversal, devido à espessura da placa de gesso adicionada. Apesar do gesso possuir uma resistência mecânica consideravelmente inferior aos restantes materiais da ligação, a sua contribuição geométrica influencia o resultado global. Importa ainda referir, que este reforço pode depender do método utilizado para fixar a placa de gesso à ligação, uma vez que tal afeta diretamente a transferência de tensões entre os elementos.

Nas Figura 43 e Figura 44, apresentam-se o gradiente de tensões equivalentes de Von Mises, para as ligações sem e com proteção, respetivamente.

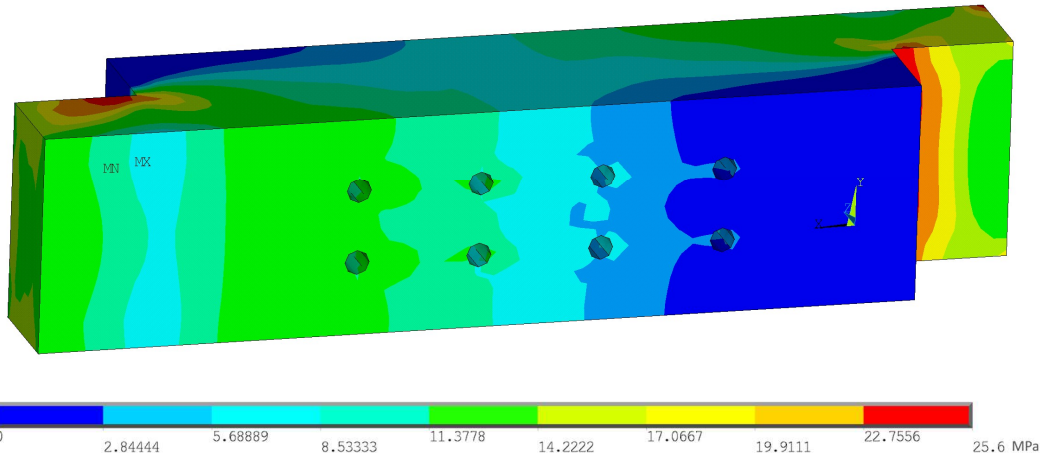


Figura 43 – Gradiente de tensão dos elementos de madeira, da ligação sem proteção, à temperatura ambiente.

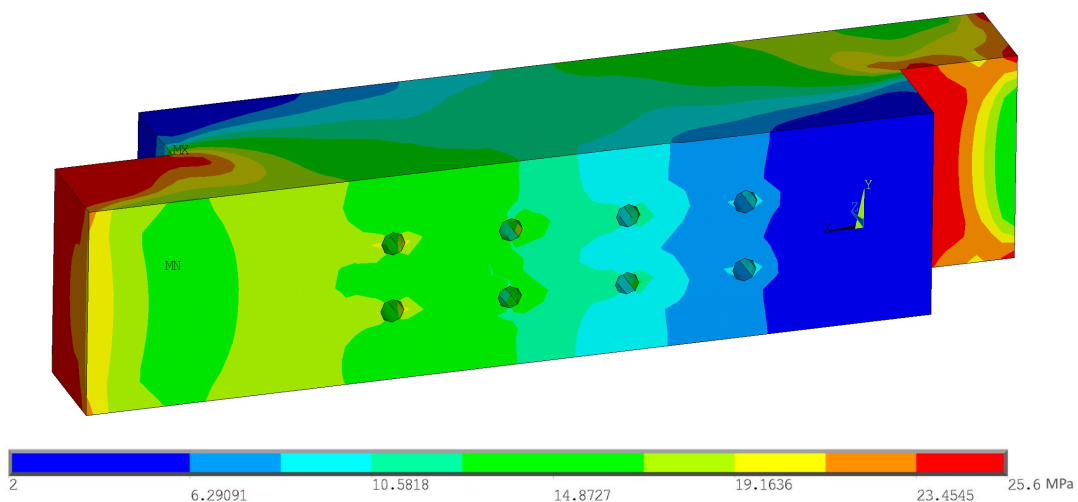


Figura 44 – Gradiente de tensão dos elementos de madeira, da ligação com proteção, à temperatura ambiente.

Em ambos os modelos, a madeira atinge a rotura, exibindo a tensão máxima de 25,6 MPa em zonas similares, próximas da aplicação das condições fronteira, e de zonas de concentração de tensões. Na ligação sem proteção há zonas com tensão igual a 0, ao longo de superfícies livres. Na ligação com proteção, a tensão mínima observada é igual a 2 MPa.

4.2.2. Análise a altas temperaturas

Na análise termomecânica, é avaliada a capacidade resistente das ligações para diferentes instantes de exposição ao fogo, com o objetivo de quantificar o decréscimo de resistência mecânica ao longo do tempo e analisar a eficácia da proteção em gesso. A Figura 45 apresenta os resultados obtidos, com curvas de tendência polinomiais de segundo grau. As respetivas equações são fornecidas no gráfico, permitindo a previsão da carga resistente em função do

tempo de exposição ao fogo. Observa-se ainda que o quadrado do coeficiente de correlação de Pearson é muito próximo de 1, para ambos os casos, indicando um elevado grau de correlação entre os resultados e as curvas obtidas.

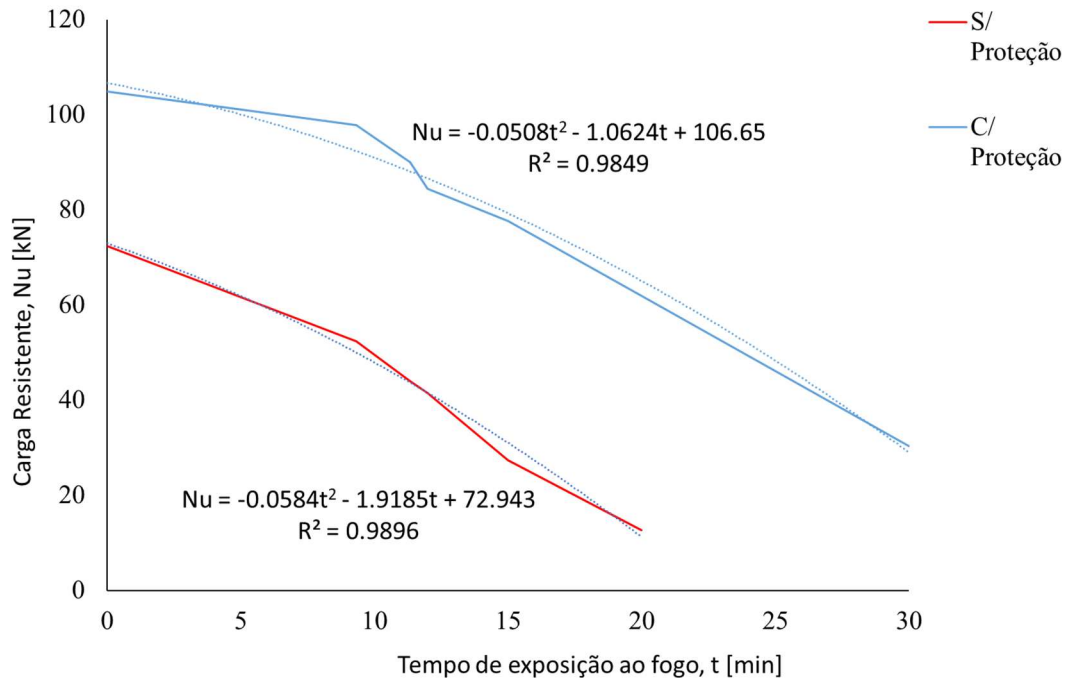


Figura 45 - Carga resistente das ligações com e sem proteção, em função do tempo de exposição ao fogo.

Para a ligação sem proteção, foi avaliada a capacidade resistente para os instantes de tempo de exposição ao fogo de 0 s, 560 s, 680 s, 720 s, 900 s e 1200 s. No caso da ligação protegida com placas de gesso, que mantém a resistência mecânica durante mais tempo, foi possível estender a análise até aos 1800 s.

Observa-se uma clara tendência de superior desempenho da ligação protegida pelas placas de gesso, retendo a sua capacidade de carga durante substancialmente mais tempo, sobretudo nas fases iniciais da ação do fogo. Para o primeiro instante considerado, 560 s, a ligação sem proteção possui, aproximadamente, 72% da sua capacidade resistente à temperatura ambiente, a ligação com proteção conserva ainda 93%. Com o aumento do tempo de exposição, a ligação sem proteção apresenta uma redução progressiva mais acentuada da capacidade resistente, exibindo apenas 17% da resistência original aos 1200s. A partir deste ponto verifica-se uma perda total da resistência mecânica. Por contraste, embora a ligação protegida inicie uma descida acentuada após os 560 s, mantém um desempenho significativamente superior, conservando cerca de 59% da sua capacidade de carga resistente aos 1200 s.

Entre os 560 s e os 720 s, a capacidade resistente da ligação protegida diminui de forma substancial, o que se pode dever à degradação das propriedades mecânicas do gesso. A temperaturas próximas de 400°C, o módulo de elasticidade e a resistência mecânica tendem para 0, como se verifica na Tabela 4. Após os 900 s, embora o gesso já não exerça função estrutural relevante, continua a desempenhar o papel importante como barreira térmica,

retardando a propagação de calor e, conseqüentemente, a perda de resistência dos componentes interiores da ligação.

Em termos globais, confirma-se que a ligação protegida apresenta uma degradação mais gradual, demorando consideravelmente mais tempo a apresentar, a total perda de resistência mecânica perante a ação do fogo, face à ligação sem proteção. Os resultados obtidos reforçam a eficácia do gesso como material de proteção passiva contra a ação do fogo.

Nas Figura 46 e Figura 47 , apresentam-se o gradiente de tensões equivalentes de Von Mises, para as ligações sem e com proteção, a 1200 s e 1800 s de exposição ao fogo, respetivamente.

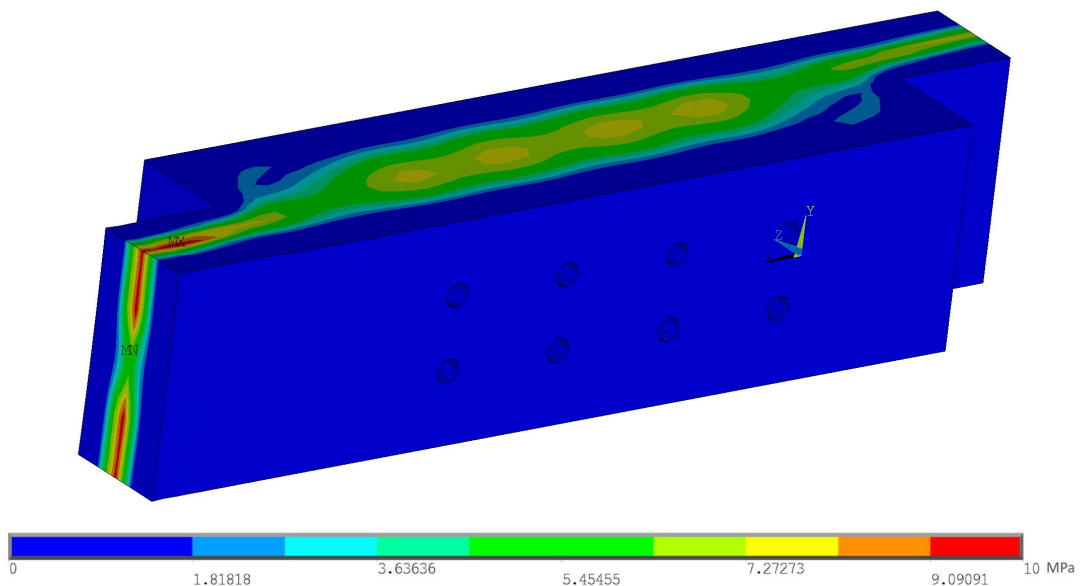


Figura 46 – Gradiente de tensão dos elementos de madeira, da ligação sem proteção, para 1200 s de exposição ao fogo.

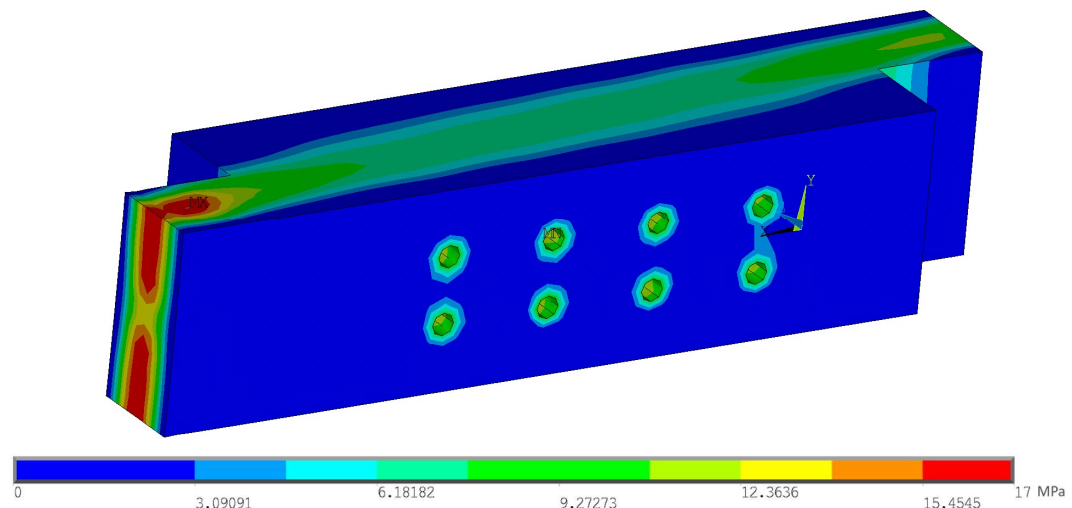


Figura 47 – Gradiente de tensão dos elementos de madeira, da ligação com proteção, para 1800 s de exposição ao fogo.

Para ambos os modelos, observa-se uma diminuição da tensão máxima observada nos elementos de madeira, 10 MPa para a ligação não protegida e 17 MPa para a protegida, nas zonas de aplicação de condições fronteira. Ao longo do comprimento dos elementos, o volume

carbonizado da madeira apresenta tensão nula. Na ligação protegida, além da tensão máxima ser consideravelmente superior, observa-se que os elementos de madeira têm um nível de tensões instalado, devido à sua capacidade em atrasar a carbonização, mantendo por isso, uma área resistente superior durante mais tempo de exposição ao fogo.

De acordo com o Eurocódigo 5 (parte 1-2) [6], o tempo de resistência ao fogo para a ligação sem proteção ($t_{d,fi}$), com cavilhas, é igual a 20 min (1200 s). Na verificação ao fogo das ligações, de acordo com o método simplificado, a ligação é verificada para a carga de 12 kN, correspondente ao resultado das ações de projeto na situação de exposição ao fogo ($E_{d,fi}$). De acordo com os resultados da análise termomecânica, para 1200 s de exposição ao fogo, a carga resistente da ligação é igual a 12,66 kN, o que resulta num coeficiente de segurança de 1,05, consideravelmente inferior ao obtido através da verificação através do Eurocódigo 5 (parte 1-2) [6]. Além disso, como se observa na Figura 46, a tensão máxima suportada pela ligação no instante da rotura é de 10 MPa, muito inferior à resistência à tração em exposição ao fogo ($f_{d,fi}$), calculada no método simplificado, de 23,55 MPa.

Esta discrepância pode dever ao facto dos membros de madeira da ligação em estudo possuírem uma espessura de 45 mm, o valor mínimo exigido pelo Eurocódigo 5 (parte 1-2) [6], para atingir os 20 min de resistência ao fogo. Tal como observado nos resultados de M. Audebert, et al. [5], ligações com membros de espessura significativamente superior apresentam uma redução mais lenta da capacidade resistente ao longo do tempo.

P. Palma e A. Frangi [72] realizaram um estudo dedicado à análise da influência de diferentes parâmetros geométricos na resistência ao fogo de ligações madeira-aço. Os autores demonstraram que a espessura dos membros de madeira destaca-se como uma variável crítica no desempenho termomecânico das ligações. O aumento da espessura dos membros de madeira tem consideravelmente mais impacto na resistência ao fogo da ligação do que os outros fatores geométricos considerados, como a altura da ligação, e o espaçamento e o diâmetro dos ligadores [72].

Os resultados apresentados evidenciam algumas das limitações do Eurocódigo 5 (parte 1-2) [6], cujos fatores de redução de resistência não são dependentes de variáveis geométricas relevantes, como a espessura dos elementos ou a configuração dos ligadores, mas, como se demonstrou, estes fatores podem exercer uma influência significativa no comportamento de ligações em situação de incêndio.

5. Conclusão

5.1. Conclusões finais

A presente dissertação incidiu sobre o estudo de ligações mecânicas de madeira em corte simples, com e sem proteção em gesso, submetidas à ação do fogo. O trabalho combinou uma abordagem analítica, com base no Eurocódigo 5, e uma abordagem numérica, através da análise por elementos finitos, com o objetivo de avaliar o comportamento térmico e estrutural destas ligações ao longo do tempo de exposição ao fogo.

No dimensionamento à temperatura ambiente, os resultados demonstraram que o método simplificado de cálculo, baseado nas equações explicitadas no Eurocódigo 5 (parte 1-1) [7], apresenta-se como uma ferramenta conservadora, estimando cargas resistentes inferiores às obtidas por modelos numéricos e às registadas em estudos experimentais. Esta diferença confirma a adequação do método para fases iniciais de projeto, destacando o carácter preventivo.

Já na análise em situação de incêndio, recorrendo ao Eurocódigo 5 (parte 1-2) [6], há uma menor incidência no projecto mecânico das ligações expostas ao fogo. A discrepância entre os valores de carga resistente obtidos analiticamente e os resultantes da análise termomecânica, com os modelos numéricos, evidencia a necessidade de um tratamento mais detalhado, ajustado à geometria da ligação e às condições específicas de projeto. Adicionalmente, o cálculo da resistência ao fogo através do Eurocódigo 5 (parte 1-2) [6], não abrange a influência de parâmetros como a espessura dos elementos de madeira ou o distanciamento e diâmetro dos ligadores, que demonstraram ter impacto significativo na degradação da capacidade resistente da ligação ao longo do tempo.

No caso das ligações com proteção passiva, as metodologias apresentadas no Eurocódigo revelam-se ainda mais limitadas. Embora o Eurocódigo 5 (parte 1-2) [6] preveja a redução da taxa de carbonização com a adição de gesso, é baseado na utilização de placas de gesso do tipo A, H e F, cujas propriedades ainda são de difícil caracterização, comprometendo por isso, a fiabilidade da sua aplicação em situações específicas de projeto. Entretanto, os modelos numéricos desenvolvidos, com base na utilização de um tipo de placa de gesso, evidenciaram uma redução significativa da transferência de calor para o interior da ligação e um atraso relevante do início da carbonização, validando a eficácia da proteção.

Importa salientar que os métodos analíticos disponíveis não permitem prever o possível aumento da capacidade de carga resultante da adição das placas de gesso, efeito que pode

depender da própria forma de ligação do sistema proteção passiva. Os modelos numéricos demonstraram que a adição da proteção pode não só atrasar a degradação térmica da ligação, como também contribui para um acréscimo da carga resistente, particularmente nos primeiros instantes de exposição ao fogo.

Finalmente, a comparação entre os modelos térmicos permitiu quantificar o efeito da proteção ao longo do tempo. Verificou-se uma degradação mais gradual da ligação protegida, mantendo a capacidade de carga estrutural durante um intervalo temporal substancialmente superior. Esta diferença salienta o papel do gesso como material de proteção passiva, e destaca a necessidade de metodologias de dimensionamento mais ajustadas às características dos materiais utilizados, bem como à variabilidade das configurações construtivas das ligações em madeira. Com base nos resultados obtidos, são propostas duas equações de projeto de fácil utilização, permitindo o cálculo da carga resistente em ligações de madeira, com ou sem proteção, em corte simples, função do tempo de exposição ao fogo.

5.2. Limitações e trabalhos futuros

Com base na análise desenvolvida na presente dissertação, identificam-se diversas áreas com necessidade de investigação adicional, tanto no domínio experimental como no numérico, que permitam consolidar o conhecimento existente sobre o comportamento de ligações em madeira sujeitas à ação do fogo.

Uma das principais limitações identificadas prende-se com a escassez de dados relativos às propriedades térmicas e mecânicas das placas de gesso referidas no Eurocódigo 5 (parte 1-2) [6], nomeadamente do tipo A, H e F. Estes materiais são recomendados como solução de proteção passiva, mas continuam a ser pouco caracterizados, particularmente em regime de altas temperaturas. Trabalhos futuros que investiguem experimentalmente estas propriedades, assim como a sua evolução com a temperatura, podem contribuir de forma relevante para o incremento nas normas em vigor e para a aplicação das mesmas em projetos reais. Paralelamente, recomenda-se o estudo aprofundado das diferentes formas de fixação das placas de gesso às ligações. A forma como o sistema de proteção é unido aos elementos estruturais tem um impacto direto na transferência de esforços, na rigidez global da estrutura e na sua eficiência térmica. A realização de ensaios experimentais e simulações que avaliem o comportamento de diferentes soluções construtivas, como a aplicação de ligadores mecânicos ou colas, poderá fornecer dados fundamentais para o desenvolvimento de orientações técnicas mais precisas sobre a utilização destas soluções.

Por fim, a realização de estudos paramétricos mais abrangentes, envolvendo variações nos tipos de madeira, espessura dos elementos, diâmetro e disposição dos ligadores, bem como diferentes configurações de proteção, poderá fornecer uma base mais robusta para a calibração dos modelos numéricos e analíticos. Este tipo de investigação é fundamental não apenas para a compreensão detalhada do comportamento de ligações, mas também para o aperfeiçoamento e atualização das normas técnicas de dimensionamento para situações de incêndio, respondendo também à crescente utilização de madeira como material estrutural em soluções sustentáveis.

Referências

- [1] E. M. M. Fonseca, P. A. S. Leite, L. D. S. Silva, V. S. B. Silva, e H. M. Lopes, «Parametric Study of Three Types of Timber Connections with Metal Fasteners Using Eurocode 5», *Appl. Sci.*, vol. 12, p. 1701, 2022, doi: 10.3390/app12031701.
- [2] F. M. Machado, «Avaliação da capacidade resistente de ligações aço madeira em corte simples quando submetidas ao fogo, Dissertação em Engenharia Mecânica», Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2023.
- [3] X. Zang *et al.*, «Contemporary Fire Safety Engineering in Timber Structures: Challenges and Solutions», *Fire*, vol. 7, p. 2, 2023, doi: 10.3390/fire7010002.
- [4] R. Jockwer, G. Fink, e J. Köhler, «Assessment of the failure behaviour and reliability of timber connections with multiple dowel-type fasteners», *Eng. Struct.*, vol. 172, pp. 76–84, 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.05.081.
- [5] M. Audebert, D. Dhima, M. Taazount, e 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.
- [6] European Committee for Standardization, *Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General Structural fire design*. Brussels, 2003.
- [7] European Committee for Standardization, *Eurocode 5: Design of Timber Structures. Part 1-1: General Common Rules and Rules for Buildings*. Brussels, 2004.
- [8] Diário Da República, *Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios*. Lisboa, 2020, pp. 2–214.
- [9] European Committee for Standardization, *Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire*. Brussels, 2004.
- [10] International Organization for Standardization, *ISO 834-1, Fire Resistance Tests - Elements of Building Construction, Part 1: General requirements*, vol. 1. Geneva, 1999, p. 25.
- [11] D. A. M. Pereira, «Análise computacional para a avaliação da resistência ao fogo em elementos construtivos de suporte em aglomerado de madeira com proteção, Dissertação em Engenharia Mecânica», Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2023.
- [12] British Standard, *BS EN 1194:1999: Timber structures - Glued laminated timber*. Brussels, 1999.
- [13] B.-H. Xu, A. Bouchaïr, M. Taazount, e P. Racher, «Numerical simulation of embedding strength of glued laminated timber for dowel-type fasteners», *J. Wood Sci.*, vol. 59, pp. 17–23, 2013, doi: 10.1007/s10086-012-1296-0.

Referências

- [14] E. M. M. Fonseca, «Brief Overview of the Thermal and Mechanical Properties of Wood, Steel, and Gypsum Board for Structural Connections», *GeoStruct Innov.*, vol. 2, pp. 77–89, 2024, doi: 10.56578/gsi020203.
- [15] P. N. Oliveira, E. M. M. Fonseca, R. D. S. G. Campilho, e P. A. G. Piloto, «Analytical Equations Applied to the Study of Steel Profiles under Fire According to Different Nominal Temperature-Time Curves», *Math. Comput. Appl.*, vol. 26, p. 48, 2021, doi: 10.3390/mca26020048.
- [16] A. H. Buchanan e A. K. Abu, *Structural Design for Fire Safety*, Second Edi. Canterbury, New Zealand: John Wiley & Sons, Ltd, 2017. doi: 10.1088/1751-8113/44/8/085201.
- [17] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman, e A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Sixth Edit. Jefferson City: John Wiley & Sons, Inc., 2006. doi: 10.1007/978-981-99-0957-5.
- [18] K. Mróz, I. Hager, e K. Korniejenko, «Material Solutions for Passive Fire Protection of Buildings and Structures and Their Performances Testing», em *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2016, pp. 284–291. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.388.
- [19] Impact Fire Services, «Active vs. Passive Fire Protection Systems». Acedido: 23 de Novembro de 2024. Disponível em: <https://resources.impactfireservices.com/active-vs.-passive-fire-protection-systems-the-basics-you-need-to-know>
- [20] FireRite, «The Difference Between Active and Passive Fire Protection», FireRite. Acedido: 29 de Novembro de 2024. Disponível em: <https://www.firerite.co.uk/fire-protection-companies-news/difference-between-active-passive-fire-protection/>
- [21] C. Petrone, G. Magliulo, L. Giannetti, e G. Manfredi, «Stress-Strain Behavior of Plasterboards Subjected in Tension and Compression», *16th World Conf. Earthq.*, pp. 1–11, 2017.
- [22] I. Rahmanian, «Thermal and Mechanical Properties of Gypsum Boards and their Influences on Fire Resistance of Gypsum Board Based Systems, Thesis in Mechanical, Aerospace and Civil Engineering», University of Manchester - Faculty of Engineering and Physical Sciences, 2011.
- [23] S. Kukuck, «Heat and mass transfer through gypsum partitions subjected to fire exposures», Gaithersburg, MD, 2009. doi: 10.6028/NIST.IR.7461.
- [24] P. Kalifa, G. Chéné, e C. Gallé, «High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres», *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, pp. 1487–1499, 2001, doi: 10.1016/S0008-8846(01)00596-8.
- [25] Volcalis, «Volcalis - Lã Mineral». Acedido: 8 de Dezembro de 2024. Disponível em: <https://volcalis.pt/>
- [26] T. Mariappan, «Recent developments of intumescent fire protection coatings for structural steel: A review», *J. Fire Sci.*, vol. 34, pp. 120–163, 2016, doi: 10.1177/0734904115626720.
- [27] A. Buchanan e B. Östman, *Fire Safe Use of Wood in Buildings*, First. Boca Raton: CRC Press, 2022. doi: 10.1201/9781003190318.
- [28] I. Hansen-Bruhn e T. R. Hull, «Flammability and burning behaviour of fire protected timber», *Fire Saf. J.*, vol. 140, p. 103918, 2023, doi: 10.1016/j.firesaf.2023.103918.
- [29] X. Qiu, Z. Li, X. Li, e Z. Zhang, «Flame retardant coatings prepared using layer by layer

Referências

- assembly: A review», *Chem. Eng. J.*, vol. 334, pp. 108–122, 2018, doi: 10.1016/j.cej.2017.09.194.
- [30] M. H. Nguyen, S.-E. Ouldboukhitine, S. Durif, V. Saulnier, e A. Bouchair, «Passive fire protection of steel profiles using wood», *Eng. Struct.*, vol. 275, p. 115274, 2023, doi: 10.1016/j.engstruct.2022.115274.
- [31] European Committee for Standardization, *Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-2: General Rules Structural Fire Design*. Brussels, 2005.
- [32] M. Łukomski, P. Turkowski, P. Roszkowski, e B. Papis, «Fire Resistance of Unprotected Steel Beams – Comparison between Fire Tests and Calculation Models», *Procedia Eng.*, vol. 172, pp. 665–672, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.02.078.
- [33] A. I. Bartlett, R. M. Hadden, e L. A. Bisby, «A Review of Factors Affecting the Burning Behaviour of Wood for Application to Tall Timber Construction», *Fire Technol.*, vol. 55, pp. 1–49, 2018, doi: 10.1007/s10694-018-0787-y.
- [34] L. Jiang, C. Cheng, e A. Usmani, «A conceptual timber-steel composite section using char layer as insulation to protect steel», em *World Conference on Timber Engineering 2021*, Santiago, Chile, 2021, pp. 1–9.
- [35] Colwill Passive Fire Protection, «Fire Doors - CFPF». Acedido: 29 de Novembro de 2024. Disponível em: <https://www.cfpf.co.uk/fire-doors-bristol/>
- [36] I. Hansen-Bruhn e T. R. Hull, «Smoke toxicity of fire protecting timber treatments», *Fire Saf. J.*, vol. 141, p. 103977, 2023, doi: 10.1016/j.firesaf.2023.103977.
- [37] B. Östman, D. Brandon, e H. Frantzich, «Fire safety engineering in timber buildings», *Fire Saf. J.*, vol. 91, pp. 11–20, 2017, doi: 10.1016/j.firesaf.2017.05.002.
- [38] MHI, «Hidrantes de Coluna Seca 80mm 3"». Acedido: 1 de Dezembro de 2024. Disponível em: <https://mhi.pt/loja/hidrantes/hidrante-superficie/hidrantes-de-coluna-seca-80mm-3/>
- [39] European Committee for Standardization, *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules*. Brussels, 2005.
- [40] A. Frangi, V. Schleifer, M. Fontana, e E. Hugi, «Experimental and Numerical Analysis of Gypsum Plasterboards in Fire», *Fire Technol.*, vol. 46, pp. 149–167, 2010, doi: 10.1007/s10694-009-0097-5.
- [41] I. Rahmanian e Y. Wang, «Thermal Conductivity of Gypsum at High Temperatures – A Combined Experimental and Numerical Approach», *Acta Polytech.*, vol. 49, pp. 16–20, 2009, doi: 10.14311/1081.
- [42] S. M. Cramer, O. M. Friday, R. H. White, e G. Sriprutkiat, «Mechanical properties of gypsum board at elevated temperatures», *Fire Mater.*, pp. 33–42, 2003.
- [43] S. L. Manzello, S.-H. Park, T. Mizukami, e D. P. Bentz, «Measurement of Thermal Properties of Gypsum Board At Elevated Temperatures», *Proc. Fifth Int. Conf. Struct. Fire*, pp. 656–665, 2008.
- [44] United States Department of Agriculture, «Wood handbook : wood as an engineering material», Madison, Wisconsin, U.S., 2010. doi: 10.2737/FPL-GTR-190.
- [45] F. Wiesner e L. Bisby, «The structural capacity of laminated timber compression elements in fire: A meta-analysis», *Fire Saf. J.*, vol. 107, pp. 114–125, 2019, doi:

Referências

- 10.1016/j.firesaf.2018.04.009.
- [46] Buckland Timber, «Buckland Timber - Glulam Beam Span Tables / Strength Grades». Acedido: 16 de Março de 2025. Disponível em: <https://www.bucklandtimber.co.uk/glulam-span-tables-strength-grades/>
- [47] 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, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.163.
- [48] J. Purkiss, *Fire Safety Engineering Design of Structures*, 2.^a ed. Aston, UK: Elsevier Ltd, 2007. doi: 10.1201/b12845.
- [49] M. C. Gonçalves e M. Fernanda, *Materials for Construction and Civil Engineering*, First. Lisboa: Springer International Publishing, 2015. doi: 10.1007/978-3-319-08236-3.
- [50] E. M. M. Fonseca e P. J V Gouveia, «Analysis of simply supported wood beams at ambient and high temperatures», *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 7, p. 180, 2018, doi: 10.14419/ijet.v7i2.23.11911.
- [51] L. Peng, G. Hadjisophocleus, J. Mehaffey, e M. Mohammad, «Predicting the Fire Resistance of Wood–Steel–Wood Timber Connections», *Fire Technol.*, vol. 47, pp. 1101–1119, 2011, doi: 10.1007/s10694-009-0118-4.
- [52] N. Bénichou e M. A. Sultan, «Fire Resistance Performance of Lightweight Wood-Framed Assemblies», *Fire Technol.*, vol. 36, pp. 184–219, 2000, doi: <https://doi.org/10.1023/A:1015414827695>.
- [53] American Society for Testing and Materials, *Standard Test Method for Determining Specific Heat Capacity by Differential Scanning Calorimetry*. 2001.
- [54] D. P. Bentz, D. R. Flynn, J. H. Kim, e R. R. Zarr, «A slug calorimeter for evaluating the thermal performance of fire resistive materials», *Fire Mater.*, vol. 30, pp. 257–270, 2006, doi: 10.1002/fam.906.
- [55] E. Frühwald, S. Thelandersson, E. Serrano, T. Toratti, e A. Emilsson, «Design of safe timber structures - How can we learn from structural failures in concrete, steel and timber?», Lund, 2007.
- [56] M. Yurrita e J. M. Cabrero, «On the need of distinguishing ductile and brittle failure modes in timber connections with dowel-type fasteners», *Eng. Struct.*, vol. 242, p. 112496, 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.112496.
- [57] R. F. P. da Silva, «Cálculo ao Fogo de Ligações de Madeira», Universidade de Aveiro, 2009.
- [58] M. Audebert, D. Dhima, A. Bouchaïr, e A. Frangi, «Review of experimental data for timber connections with dowel-type fasteners under standard fire exposure», *Fire Saf. J.*, vol. 107, pp. 217–234, 2019, doi: 10.1016/j.firesaf.2019.102905.
- [59] M. Johanides, A. Lokaj, P. Dobes, e D. Mikolasek, «Numerical and Experimental Analysis of the Load-Carrying Capacity of a Timber Semi-Rigid Dowel-Type Connection», *Materials (Basel)*, vol. 15, p. 5622, 2022, doi: 10.3390/ma15207222.
- [60] M. Shabanian e N. L. Braxtan, «Thermomechanical behavior of Glulam-beam connected to CLT-wall assemblies with steel doweled connections before, during and after fire», *J. Struct. Fire Eng.*, vol. 14, pp. 365–384, 2023, doi: 10.1108/JSFE-02-2022-

Referências

- 0007.
- [61] M. Dorn e K. Hofstetter, «3D-modeling of dowel-type timber connections», *Austrian Res. Promot. Agency*, 2008.
- [62] J. Zhang, Y. Wang, L. Li, e Q. Xu, «Thermo-mechanical behaviour of dovetail timber joints under fire exposure», *Fire Saf. J.*, vol. 107, pp. 75–88, 2019, doi: 10.1016/j.firesaf.2017.11.008.
- [63] M. Khelifa, V. D. Thi, M. Oudjène, A. Khennane, M. El Ganaoui, e Y. Rogaume, «Modelling the Response of Timber Beams Under Fire», *Int. J. Civ. Eng.*, vol. 22, pp. 1537–1549, 2024, doi: 10.1007/s40999-024-00973-2.
- [64] A. F. Bower, «Applied Mechanics of Solids». Acedido: 9 de Janeiro de 2025. Disponível em: https://solidmechanics.org/Text/Chapter3_2/Chapter3_2.php
- [65] textranch, «thermomechanical vs thermo-mechanical». Acedido: 7 de Maio de 2025. Disponível em: <https://textranch.com/c/thermomechanical-or-thermo-mechanical/>
- [66] Merriam-Webster, «Thermomechanical». Acedido: 5 de Julho de 2025. Disponível em: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/thermomechanical>
- [67] Oxford English Dictionary, «thermomechanical - adjective». Acedido: 7 de Maio de 2025. Disponível em: https://www.oed.com/dictionary/thermomechanical_adj?tab=factsheet#18505500
- [68] S. J. Garrett, «Introductory Numerical Methods», em *Introduction to Actuarial and Financial Mathematical Methods*, Elsevier, 2015, pp. 411–463. doi: 10.1016/B978-0-12-800156-1.00013-3.
- [69] E. M. M. Fonseca, L. Silva, e P. A. S. Leite, «Numerical model to predict the effect of wood density in wood–steel–wood connections with and without passive protection under fire», *J. Fire Sci.*, vol. 38, pp. 122–135, 2020, doi: 10.1177/0734904119884706.
- [70] K. A. Harman e J. R. Lawson, «A Study of Metal Truss Plate Connectors When Exposed to Fire», *Natl. Inst. Stand. Technol.*, vol. NISTIR 739, pp. 1–16, 2007.
- [71] L. Peng, G. Hadjisophocleous, J. Mehaffey, e M. Mohammad, «On the Fire Performance of Double-shear Timber Connections», *Fire Saf. Sci.*, vol. 10, pp. 1207–1218, 2011, doi: 10.3801/IAFSS.FSS.10-1207.
- [72] P. Palma e A. Frangi, «Modelling the fire resistance of steel-to-timber dowelled connections loaded perpendicularly to the grain», *Fire Saf. J.*, vol. 107, pp. 54–74, 2019, doi: 10.1016/j.firesaf.2017.12.001.

Referências

Declaração de Integridade

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

NOME: João Campos Pinto Coelho de Aguiar

ISEP, Porto, 14 de junho de 2025

Apêndice A

Folha de cálculo das ligações em madeira em corte simples, dimensionamento à temperatura ambiente e verificação para a ação do fogo.

Glulam	Fd [kN]	d [mm]	ft0k [N/mm ²]	W [mm]	Nt	Nc	NL	a1 [mm]	a2 [mm]	a3,t [mm]	a4,c [mm]	t1 [mm]	L [mm]	H [mm]	t2 [mm]	ft,0,d [N/mm ²]	min Fv,rk	Fv,rd [N]	fdfi [MPa]	Edfi/As [MPa]	cs
GH20h	10	6	16	90	10	5	2	30	18	80	18	45	280	54	45	10.24	2481.71	1191.22	14.72	6.14	2.40
	10	8	16	90	6	3	2	40	24	80	24	45	240	72	45	10.24	4120.70	1977.94	14.72	6.14	2.40
	10	10	16	90	4	2	2	50	30	80	30	45	210	90	45	10.24	5089.73	2443.07	14.72	6.14	2.40
	15	6	16	90	14	7	2	30	18	80	18	45	340	54	45	10.24	2481.71	1191.22	14.72	6.14	2.40
	15	8	16	90	8	4	2	40	24	80	24	45	280	72	45	10.24	4120.70	1977.94	14.72	6.14	2.40
	15	10	16	90	6	3	2	50	30	80	30	45	260	90	45	10.24	5089.73	2443.07	14.72	6.14	2.40
	20	6	16	90	18	9	2	30	18	80	18	45	400	54	45	10.24	2481.71	1191.22	14.72	6.14	2.40
	20	8	16	90	12	6	2	40	24	80	24	45	360	72	45	10.24	4120.70	1977.94	14.72	6.14	2.40
GL24h	10	6	19.2	90	10	5	2	30	18	80	18	45	280	54	45	12.29	2644.09	1269.16	17.66	7.37	2.40
	10	8	19.2	90	6	3	2	40	24	80	24	45	240	72	45	12.29	4390.31	2107.35	17.66	7.37	2.40
	10	10	19.2	90	6	3	2	50	30	80	30	45	260	90	45	12.29	5777.53	2773.22	17.66	7.37	2.40
	15	6	19.2	90	14	7	2	30	18	80	18	45	340	54	45	12.29	2644.09	1269.16	17.66	7.37	2.40
	15	8	19.2	90	8	4	2	40	24	80	24	45	280	72	45	12.29	4390.31	2107.35	17.66	7.37	2.40
	15	10	19.2	90	6	3	2	50	30	80	30	45	260	90	45	12.29	5777.53	2773.22	17.66	7.37	2.40
	20	6	19.2	90	18	9	2	30	18	80	18	45	400	54	45	12.29	2644.09	1269.16	17.66	7.37	2.40
	20	8	19.2	90	10	5	2	40	24	80	24	45	320	72	45	12.29	4390.31	2107.35	17.66	7.37	2.40
	20	10	19.2	90	8	4	2	50	30	80	30	45	310	90	45	12.29	5777.53	2773.22	17.66	7.37	2.40
	GH32h	10	6	25.6	90	8	4	2	30	18	80	18	45	250	54	45	16.38	2855.94	1370.85	23.55	9.83
10		8	25.6	90	6	3	2	40	24	80	24	45	240	72	45	16.38	4742.08	2276.20	23.55	9.83	2.40
10		10	25.6	90	4	2	2	50	30	80	30	45	210	90	45	16.38	6740.46	3235.42	23.55	9.83	2.40
15		6	25.6	90	12	6	2	30	18	80	18	45	310	54	45	16.38	2855.94	1370.85	23.55	9.83	2.40
15		8	25.6	90	8	4	2	40	24	80	24	45	280	72	45	16.38	4742.08	2276.20	23.55	9.83	2.40
15		10	25.6	90	8	4	2	50	30	80	30	45	310	90	45	16.38	6740.46	3235.42	23.55	9.83	2.40
20		6	25.6	90	16	8	2	30	18	80	18	45	370	54	45	16.38	2855.94	1370.85	23.55	9.83	2.40
20		8	25.6	90	10	5	2	40	24	80	24	45	320	72	45	16.38	4742.08	2276.20	23.55	9.83	2.40
20		10	25.6	90	8	4	2	50	30	80	30	45	310	90	45	16.38	6740.46	3235.42	23.55	9.83	2.40

Apêndice B

Código em linguagem APDL para a curva de incêndio padrão ISO 834 e para as propriedades térmicas da madeira e do aço.

Curva de Incêndio Padrão ISO 834	Propriedades Térmicas da Madeira e do Aço
*DIM,ISO834,TABLE,241,1,1,,	/COM,ANSYS RELEASE Release 18.2 BUILD 18.2 UP20170726 11:34:54
*SET,ISO834(1,0,1),0	MPTEMP
*SET,ISO834(1,1,1),20	MPTEMP, 1, 0.200000E+02, 0.990000E+02, 0.120000E+03, 0.200000E+03, 0.250000E+03
*SET,ISO834(2,0,1),60	MPTEMP, 6, 0.300000E+03, 0.350000E+03, 0.400000E+03, 0.600000E+03, 0.800000E+03
*SET,ISO834(2,1,1),349.2	MPTEMP, 11, 0.120000E+04,
*SET,ISO834(3,0,1),120	MPDATA,DENS, 1, 1, 0.504000E-06, 0.504000E-06, 0.450000E-06, 0.450000E-06, 0.418500E-06
*SET,ISO834(3,1,1),444.5	MPDATA,DENS, 1, 6, 0.342000E-06, 0.234000E-06, 0.171000E-06, 0.126000E-06, 0.117000E-06
*SET,ISO834(4,0,1),180	MPDATA,DENS, 1, 11, 0.100000E-08,
*SET,ISO834(4,1,1),502.3	MPTEMP
*SET,ISO834(5,0,1),240	MPTEMP, 1, 0.200000E+02, 0.200000E+03, 0.350000E+03, 0.500000E+03, 0.800000E+03
*SET,ISO834(5,1,1),543.9	MPTEMP, 6, 0.120000E+04,
*SET,ISO834(6,0,1),300	MPDATA,KXX, 1, 1, 0.120000E-03, 0.150000E-03, 0.700000E-04, 0.900000E-04, 0.350000E-03
*SET,ISO834(6,1,1),576.4	MPDATA,KXX, 1, 6, 0.150000E-02,
*SET,ISO834(7,0,1),360	MPTEMP
*SET,ISO834(7,1,1),603.1	MPTEMP, 1, 0.200000E+02, 0.990000E+02, 0.110000E+03, 0.120000E+03, 0.130000E+03
*SET,ISO834(8,0,1),420	MPTEMP, 6, 0.200000E+03, 0.250000E+03, 0.300000E+03, 0.350000E+03, 0.400000E+03
*SET,ISO834(8,1,1),625.8	MPTEMP, 11, 0.600000E+03, 0.800000E+03, 0.120000E+04,
*SET,ISO834(9,0,1),480	MPDATA,C, 1, 1, 0.153000E+04, 0.177000E+04, 0.136000E+05, 0.135000E+05, 0.212000E+04
*SET,ISO834(9,1,1),645.5	MPDATA,C, 1, 6, 0.200000E+04, 0.162000E+04, 0.710000E+03, 0.850000E+03, 0.100000E+04
*SET,ISO834(10,0,1),540	MPDATA,C, 1, 11, 0.140000E+04, 0.165000E+04, 0.165000E+04,
...	MPTEMP
*SET,ISO834(50,1,1),915.1	MPTEMP, 1, 0.000000E+00,
*SET,ISO834(51,0,1),3000	MPDATA,EMIS, 1, 1, 0.800000E+00,
*SET,ISO834(51,1,1),918.1	MPTEMP
*SET,ISO834(52,0,1),3060	MPTEMP, 1, 0.000000E+00,
*SET,ISO834(52,1,1),921.0	MPDATA,DENS, 2, 1, 0.785000E-05,
*SET,ISO834(53,0,1),3120	MPTEMP
*SET,ISO834(53,1,1),923.9	MPTEMP, 1, 0.200000E+02, 0.799000E+03, 0.120000E+04,
*SET,ISO834(54,0,1),3180	MPDATA,KXX, 2, 1, 0.533340E-01, 0.273933E-01, 0.273000E-01,
*SET,ISO834(54,1,1),926.8	MPTEMP
*SET,ISO834(55,0,1),3240	MPTEMP, 1, 0.200000E+02, 0.500000E+02, 0.100000E+03, 0.150000E+03, 0.200000E+03
*SET,ISO834(55,1,1),929.6	MPTEMP, 6, 0.250000E+03, 0.300000E+03, 0.350000E+03, 0.400000E+03, 0.450000E+03
*SET,ISO834(56,0,1),3300	MPTEMP, 11, 0.500000E+03, 0.550000E+03, 0.600000E+03, 0.650000E+03, 0.700000E+03
*SET,ISO834(56,1,1),932.3	MPTEMP, 16, 0.730000E+03, 0.735000E+03, 0.750000E+03, 0.785000E+03, 0.800000E+03
*SET,ISO834(57,0,1),3360	MPTEMP, 21, 0.825000E+03, 0.850000E+03, 0.890000E+03, 0.120000E+04,
*SET,ISO834(57,1,1),935.0	MPDATA,C, 2, 1, 0.439802E+03, 0.459700E+03, 0.487620E+03, 0.510420E+03, 0.529760E+03
*SET,ISO834(58,0,1),3420	MPDATA,C, 2, 6, 0.547310E+03, 0.564740E+03, 0.583710E+03, 0.605880E+03, 0.632920E+03
*SET,ISO834(58,1,1),937.7	MPDATA,C, 2, 11, 0.666500E+03, 0.708280E+03, 0.760220E+03, 0.813750E+03, 0.100816E+04
*SET,ISO834(59,0,1),3480	MPDATA,C, 2, 16, 0.229125E+04, 0.500000E+04, 0.148289E+04, 0.875000E+03, 0.803260E+03
*SET,ISO834(59,1,1),940.3	MPDATA,C, 2, 21, 0.734570E+03, 0.694750E+03, 0.657080E+03, 0.650000E+03,
*SET,ISO834(60,0,1),3540	MPTEMP
*SET,ISO834(60,1,1),942.8	MPTEMP, 1, 0.000000E+00,
*SET,ISO834(61,0,1),3600	MPDATA,EMIS, 2, 1, 0.700000E+00,

Apêndice C

Código em linguagem APDL para ocultar os elementos de madeira com temperatura superior a 300°C, para um tempo de exposição ao fogo especificado.

Exclusão de elementos carbonizados
/POST1
SET,,1,,3000,,
ETABLE,CHAR,TEMP,
PLNSOL,TEMP,0,1.0
ESEL,S,ETAB,CHAR,20,300,,0
! ESEL,A,MAT,,2
CONT,1,5,20,,300
/REPLOT
! ETABLE,REFL

Apêndice C

Glossário

***Cross-laminated timber* ou Madeira lamelada cruzada**

Membro estrutural formado através da colagem de madeira lamelada com as fibras perpendiculares entre si [16].

***Fiber Saturation Point* ou Ponto de Saturação das Fibras**

Conteúdo em água da madeira quando as paredes das células estão saturadas com água, sem evidência da sua presença nas cavidades das células [49].

Glulam

Membro estrutural formado através da colagem de madeira lamelada com as fibras paralelas entre si [12].

Pirólise

Processo de decomposição dos materiais, quando expostos a altas temperaturas [33].

Sprinkler

Sistema de supressão de incêndio que liberta CO₂, gases inertes, espuma, ou água pulverizada, limitando a propagação de chamas e contribuindo para a sua extinção [20].